

10/10/97

6^o Congresso Nacional de Geotecnia

A Geotecnia
nas Infraestruturas
de Transportes, Energia e Ambiente

IST, Lisboa
15 a 18 de Setembro de 1997

Volume
1/3

Editado por:
Sociedade Portuguesa de Geotecnia
e Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico

SOLOS RESIDUAIS DE GNAISSE ESTABILIZADOS COM CIMENTO, CAL E VINHOTO

STABILIZATION OF RESIDUAL SOILS OF GNEISS WITH CEMENT, LIME AND VINASSE

Ferraz, Roberto Lopes; *Professor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Brasil.*

Lima, Dario Cardoso de; *Professor Titular, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Brasil*

Bueno, Benedito de Souza; *Professor Livre Docente, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos-USP, Brasil.*

Costa, Liovano Marciano da; *Professor Titular, Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Brasil.*

RESUMO

Este artigo aborda a estabilização de solos típicos da cidade de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil, com cimento, cal e vinhoto para fins rodoviários. Apresenta-se os resultados dos ensaios de compressão simples e CBR realizados com misturas obtidas de quatro ocorrências de solos residuais de gnaiss, englobando a faixa das argilas areno-siltosas às areias silto-argilosas. Os resultados evidenciam que: (1) cimento e cal, ao contrário do vinhoto, foram responsáveis por aumentos substanciais na resistência mecânica dos solos, podendo-se recomendar a mistura obtida da adição de cimento à amostra mais granular para a função de camada de base e as outras misturas para a função de sub-base de pavimentos rodoviários; (2) recomenda-se o emprego do vinhoto no controle da pressão de expansão dos solos; (3) observou-se acréscimos na expansão CBR das amostras argilosas, para o teores de cimento na faixa de 0 a 2%, fato este que pode estar relacionado à expansão da dupla camada dos solos.

ABSTRACT

This paper reports a research on soil stabilization with cement, lime and vinasse for highway purpose. Data are presented on the effect of addition of stabilizers on the CBR and unconfined compression strength of four typical residual soils of gneiss from the County of Viçosa, Minas Gerais State, Brazil, ranging from a sandy silty clay to a silty clayey sand. The laboratory testing program data support the following conclusions: (1) cement and lime, contrary to vinasse, increase substantially the strength of the tested soil samples, suggesting the use of the more granular soil-cement mixture as base and the others mixtures as sub-base of pavements; (2) vinasse can be used to control soil expansion, as measured in the CBR test; (3) at the range of 0% to 2% of cement, it was noted an increase in CBR expansion of fine-grained soil samples which can be related to soils double layer expansion.

1) INTRODUÇÃO

Solos estabilizados com cimento e cal têm sido empregados durante décadas como camadas de reforço, sub-base e base de estradas. No Brasil, o solo-cimento possui especificações técnicas de projeto apoiadas em estudos de laboratório e na análise do comportamento das misturas em serviço, em geral referenciadas às recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1990); porém, o emprego das misturas solo-cal não está, até o presente momento, oficialmente regulamentado por especificações construtivas.

Apesar do uso do cimento e da cal se constituírem em soluções tradicionais e relativamente econômicas, existem situações onde a redução de custos pode ser ainda maior com o emprego de materiais alternativos

0935277

SYSNO	0935277
PROD	002887
ACERVO EESC	

com características regionais de produção. Dentre estes, cita-se o vinhoto que é um subproduto da indústria açucareira, com grande produção na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais onde se insere a cidade de Viçosa. Em uma primeira análise, este produto pode ser visto com potencial para o emprego como estabilizante de solos, sendo comum o seu emprego no tratamento contra poeira nas rodovias vicinais da região.

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo de laboratório destinado a averiguar a eficiência da estabilização química com cimento cal e vinhoto quando aplicada a quatro amostras de solo que podem ser consideradas como representativas das ocorrências de solo típicas da microrregião de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, para fins de aplicação em pavimentação rodoviária.

2) MATERIAIS E MÉTODOS

2.1) Materiais

Quatro amostras de solos foram analisadas neste trabalho, sendo duas representativas do manto superficial, poroso, bastante intemperizado (horizonte B) e duas da camada subjacente (horizonte C) de perfis de solos comuns na microrregião de Viçosa.

O material do horizonte B, amostras AM 1 e AM 2, que nas elevações constitui uma capa de espessura variável, apresenta razoável resistência mecânica quando compactado na energia do ensaio AASHO Normal, com CBR da ordem de 8% a 11% e expansão da ordem de 0,1%, refletindo sua constituição argilo-silto-arenosa; no entanto, o mesmo não se enquadra, por exemplo, nas exigências do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais (DER-MG), Brasil, para material de sub-base de pavimentos flexíveis.

O horizonte C, manto saprolítico, que aflora em vários pontos da microrregião, exhibe dois tipos de materiais com características bem diferenciadas. A parte superior, amostra AM 3, apresenta-se bastante micácea, com coloração esbranquiçada (rôsea quando seca), granulometria compreendida entre as frações silte e areia fina, CBR em torno de 7% (energia de compactação do ensaio AASHO Normal) e expansão medida no ensaio CBR da ordem de 2%. A parte inferior do horizonte C, amostra AM 4, mostra-se com coloração acinzentada, com granulometria entre areia média a fina e silte, notando-se, porém, a ocorrência de uma maior quantidade de areia e menor presença de mica do que na parte superior. Essas particularidades levam a se ter um material mecânicamente superior àquele da parte superior do horizonte C, mas, ainda, de qualidade insuficiente para atender às exigências do DNER ou do DER-MG para camadas de sub-base de pavimentos rodoviários. A partir destas observações, optou-se por coletar as amostras do horizonte C em pontos distintos, sendo uma representativa da parte superior e outra da parte inferior do horizonte em questão.

A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas e o Quadro 1 introduz os resultados dos ensaios de caracterização e de resistência mecânica realizados com as amostras de solos.

Quanto aos estabilizantes químicos, trabalhou-se com: cimento Portland da marca Barroso, tipo CP-II-E 32; cal cálcica hidratada fabricada pela ICAL; vinhoto produzido pela Companhia Industrial e Agrícola Oeste de Minas, Lagoa da Prata-Estado de Minas Gerais. Os resultados das análises químicas efetuadas sobre os estabilizantes empregados estão resumidas nos Quadros 2 a 4.

2.2) Métodos

Nas misturas solo-cimento e solo-cal, trabalhou-se com os teores de 2, 4, 6, 8, 10 e 12% de estabilizante em relação à massa de solo seco.

No que tange às misturas solo-cimento, elas foram compactadas segundo o método brasileiro MB

3359/90 (Solo-Cimento, Ensaio de Compactação, AASHO Normal), da ABNT. Após a adição de cimento ao solo seco, homogeneizou-se a mistura para, em seguida, adicionar-se a água necessária à realização do ensaio, proceder a nova homogeneização e compactação, de modo a minimizar os efeitos nocivos de atrasos na compactação.

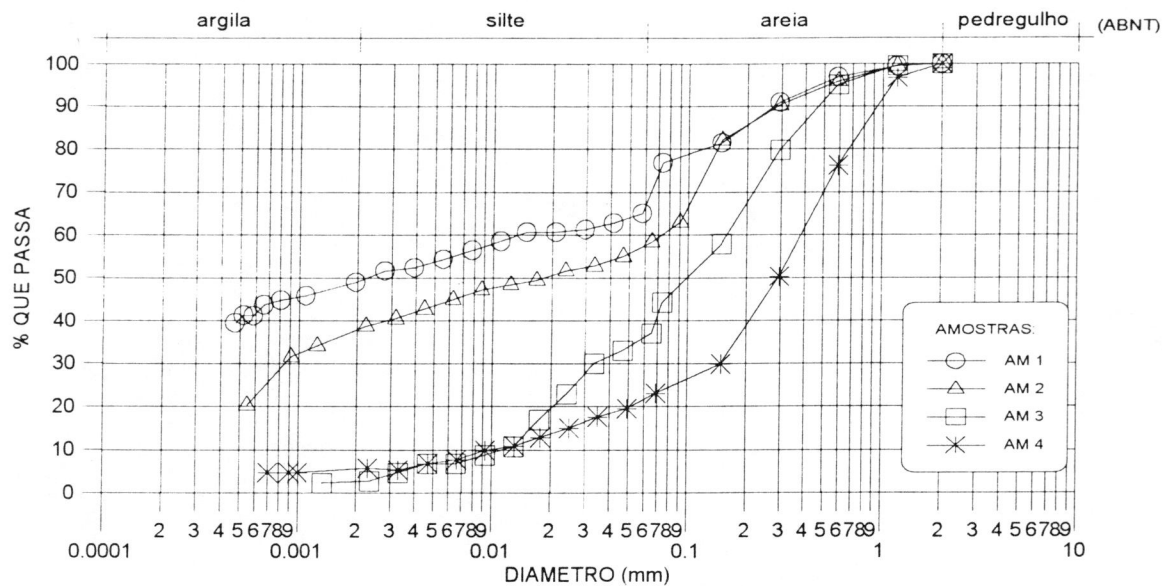


Figura 1. Curvas granulométricas das amostras de solo ensaiadas.

Quadro 1. Resultados dos ensaios de caracterização e compactação (energia do ensaio AASHO Normal) das amostras de solo

PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	SOLOS			
	AM 1	AM 2	AM 3	AM 4
LL (%)	63	70	36	29
LP (%)	33	48	19	19
IP (%)	30	22	17	10
γ_s (kN/m³)	27,25	27,48	26,44	26,15
W _{ot} (%)	31,60	30,00	19,53	13,62
γ_{dmax} (kN/m³)	14,06	14,00	16,57	18,07
RCS (kPa)	218	210	180	80
CBR (%)	11	8	7	15
Expansão _{CBR} (%)	0,10	0,10	2,00	0,40
Classificação HRB	A-7-5 (20)	A-7-5 (9)	A-6 (4)	A-2-4 (0)

Onde: LL - Limite de liquidez, LP - Limite de plasticidade, IP - Índice de plasticidade, γ_s - Peso

específico dos sólidos, W_{ot} - Teor ótimo de umidade, γ_{dmax} - Peso específico seco máximo, RCS - Resistência à compressão simples, CBR - Índice de suporte Califórnia, HRB - Classificação de solos do "Bureau of Public Roads" dos Estados Unidos da América.

Quadro 2. Composição química do cimento marca Barroso, CP-II-E 32,utilizado nas misturas

COMPONENTE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cal Livre
TEOR (%)	21,87	5,65	3,22	57,29	2,68	2,89	0,71	1,57

Quadro 3. Composição química da cal cálcica, marca ICAL, empregada nas misturas solo-cal

COMPONENTE	TEOR (%)
CaO	74,00
MgO	0,70
SiO ₂	1,50
Perda por calcinação	22,00
CaO disponível	70,00
Ca(OH) ₂ disponível	92,00
CaO na base não volátil	92,00
CaO não hidratado máximo	1,00
Umidade em excesso da máxima	1,00

Quadro 4. Composição química do vinhoto fornecido pela Companhia Industrial e Agrícola Oeste de Minas-Lagoa da Prata-MG e utilizado nas misturas

COMPONENTE	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	pH	Matéria Orgânica
TEOR (kg/m ³)	0,35	0,20	2,10	1,23	0,40	4,25	32,24

Para as misturas solo-cal, como não se dispõe de regulamentação específica no Brasil, adotou-se a energia sugerida no MB 3359/90 da ABNT. Após a adição de cal ao solo seco, procedeu-se a homogeneização da mistura para, em seguida, adicionar a água necessária e proceder a nova homogeneização. Contudo, deixou-se a mistura em repouso pelo período de uma hora, de modo a permitir a ocorrência dos fenômenos de troca catiônica e a consequente floculação das partículas de solo, para em seguida se executar o ensaio de compactação.

No que se refere aos ensaios CBR realizados com as misturas solo-cimento e solo-cal, os corpos de prova foram colocadas em imersão por 96 horas logo após serem compactados. Para o ensaio de compressão simples, observou-se os tempos de cura de 7 e 28 dias.

Na dosagem das misturas solo-vinhoto optou-se pela utilização direta do produto, efetuando-se os estudos de dosagem com a substituição, pelo vinhoto, de parte da água necessária para se levar o solo a um determinado teor de umidade. Realça-se que o procedimento adotado apresenta a vantagem de permitir a utilização do vinhoto "in natura", o que, além de facilitar os procedimentos de dosagem, permite o seu emprego sem os riscos de alterações químicas. A dosagem empregada foi, como se segue: 20, 40, 60 e 80 % de vinhoto em relação à quantidade de líquido total presente no solo. Por razões óbvias não foi estudada a dosagem de 100% de vinhoto, pois seria necessário que as amostras estivessem completamente secas para que se pudesse, então, ter como líquido intersticial apenas o vinhoto.

3) APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES PERTINENTES

A discussão dos resultados da estabilização química pauta-se, para efeitos comparativos, nas exigências do DER-MG, para as camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários, e nas exigências da NB 1336/90 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3.1) Misturas solo-cimento

A Figura 2 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples e as Figuras 3 e 4 trazem os resultados dos ensaios CBR realizados nas misturas solo-cimento.

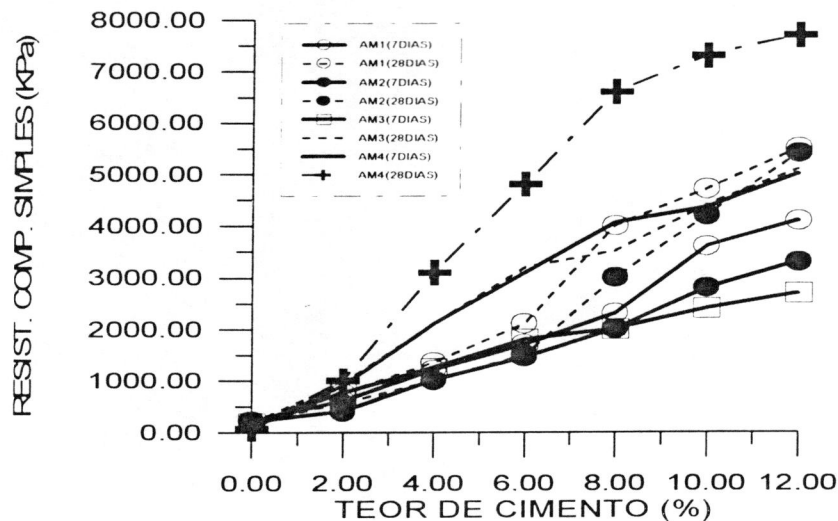


Figura 2. Variação na resistência à compressão simples com o teor de cimento das misturas.

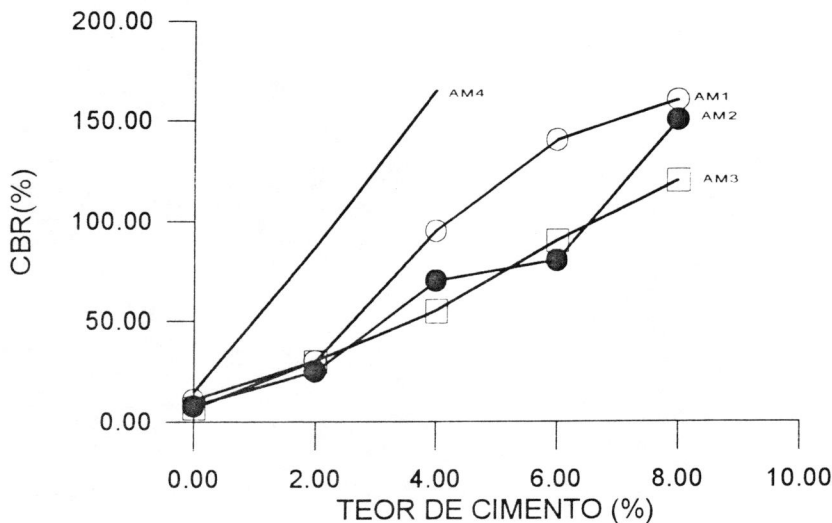


Figura 3. Variação no índice CBR com o teor de cimento das misturas.

Nota-se, da Figura 2, que acréscimos no teor de cimento relacionam-se diretamente com acréscimos no valor da resistência mecânica. Percebe-se que embora a amostra AM 3 seja originária do horizonte C do perfil, a mesma não atingiu os níveis de melhoria de resistência mecânica observados para a amostra AM 4, ficando no mesmo patamar de resistência das amostras do horizonte B ensaiadas. Aventa-se a possibilidade de que este comportamento esteja relacionado com o seu teor elevado em material micáceo que, devido ao formato em placas destas partículas, não proporciona pontos de cimentação entre partículas eficientes.

Quanto aos valores CBR, Figura 3, nota-se uma tendência de acréscimos destes com aumentos no teor de cimento, atingindo-se, para todas as amostras, valores superiores a 100%, o que relaciona-se com a ocorrência de efeito de placa nas misturas e pode minimizar a importância prática dos resultados.

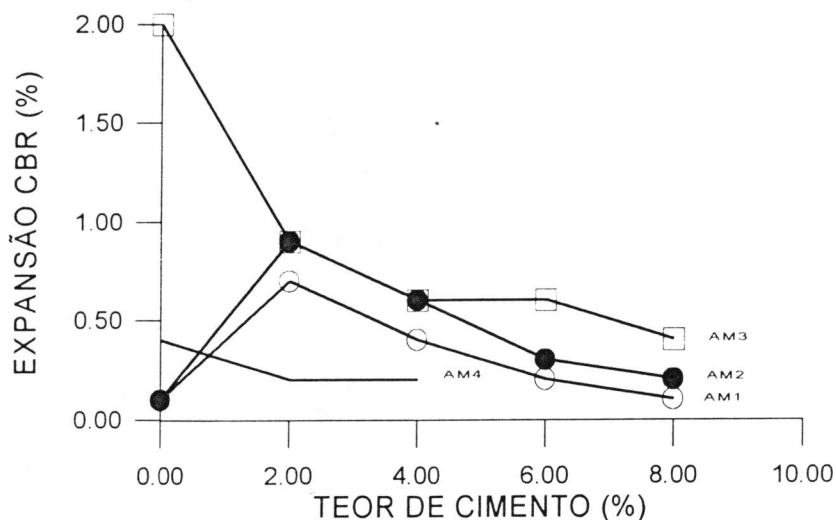


Figura 4. Variação na expansão com o teor de cimento das misturas.

Os resultados das medidas de expansão no ensaio CBR, Figura 4, mostram comportamentos diferenciados entre as amostras dos horizontes B e C ensaiadas. Estranhamente, para as amostras do horizonte B, de características argilosas, obteve-se acréscimos na expansão até se atingir o teor de 2% de cimento, e, em seguida, diminuições com incrementos no teor de cimento, atingindo finalmente valores próximos aos dos solos sem aditivo. Para as amostras do horizonte C, a tendência foi ocorrer redução nos valores da expansão.

No que se refere aos aumentos detectados nos valores da expansão na faixa de 0 a 2% de cimento, CARDOSO et alii (1994) consideram que uma explicação para o fenômeno possa estar relacionada ao fato de que, nos solos argilosos, a expansão está associada às características da dupla camada difusa. Assim, a superfície da argila, carregada negativamente, adsorve cátions de modo a neutralizar as suas cargas negativas. No complexo de troca catiônica dos solos tropicais encontram-se, principalmente, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H^+ , Fe^{3+} e Mn^{2+} . Com a adição de cimento, aumenta-se o pH e a concentração de íons Ca^{2+} no solo, o que pode atuar no sentido de aumentar a pressão destes íons sobre os demais cátions do complexo sortivo do solo, fazendo com que estes sejam deslocados, liberando as cargas que eles estavam neutralizando, passando os íons Ca^{2+} a ocuparem os pontos negativos da superfície dos colóides. Portanto, se o Ca^{2+} está substituindo um cátion de maior força de ligação, como o Al^{3+} que é abundante nos solos tropicais, ele não poderá satisfazer toda a carga negativa que era neutralizada por este íon, o que eleva a carga líquida negativa. Como resultado, pode-se ter a expansão da dupla camada e a dispersão, o que redundará em maior expansão do solo.

3.2) Misturas solo-cal

A Figura 5 mostra os resultados dos ensaios de compressão simples e as Figuras 6 e 7 sintetizam os parâmetros obtidos nos ensaios CBR realizados nas misturas solo-cal.

Segundo a Figura 5, considerando-se o solo sem aditivo, há ganhos substanciais de resistência para todos os solos, aos 7 e aos 28 dias de cura. As amostras pertencentes a um mesmo horizonte exibem comportamentos similares para ambos os períodos de cura, ou seja, as amostras do horizonte B (amostras AM 1 e AM 2) mostram tendência de aumento da resistência com acréscimos no teor de cal, e as amostras do horizonte C (amostras AM 3 e AM 4) apresentam tendência para a estabilização da resistência a partir de determinado teor de cal. É patente que em todas as amostras as resistências aos 28 dias suplantam as determinadas aos 7 dias de cura, evidenciando o caráter da dependência no tempo das reações pozolânicas das misturas solo-cal.

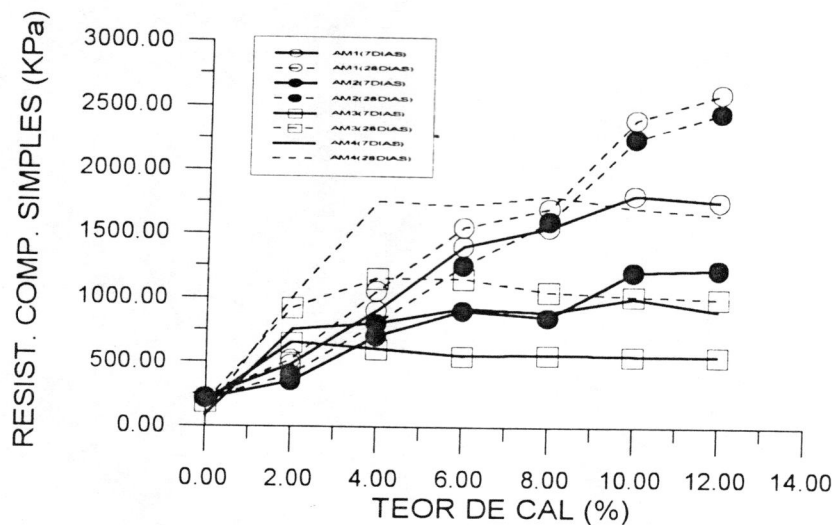


Figura 5. Variação na resistência à compressão simples com o teor de cal das misturas.

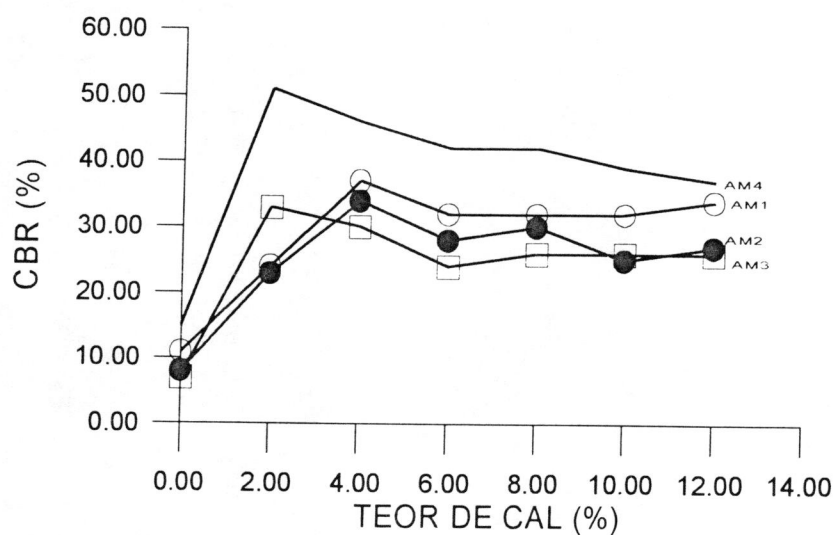


Figura 6. Variação no índice CBR com o teor de cal das misturas.

Nota-se, pela Figura 6, que os valores CBR sugerem que as amostras de um mesmo horizonte exibem comportamentos similares, ou seja, as amostras do horizonte B apresentam picos de valores CBR para o teor de 4%, enquanto que para as amostras do horizonte C estes picos ocorrem para o teor de 2% de cal. Todas as amostras apresentam tendência de queda dos valores CBR após os valores de pico, tendência esta mais acentuada nas amostras do horizonte C. Estes dados sugerem que aumentos nos teores de cal, acima de certos limites, não implicam necessariamente em melhorias na resistência mecânica, como ocorreu nas misturas solo-cimento. Este comportamento certamente está relacionado ao tipo e ao curto período de cura das misturas adotados, não havendo tempo e condições ambientais adequadas para a ocorrência de reações pozolânicas significativas nas misturas solo-cal.

Quanto à expansão medida nos ensaios CBR, Figura 7, os dados obtidos confirmam a capacidade da cal de reduzir as características expansivas dos solos, fato este bem evidenciado nos resultados da amostra AM 3, caindo a expansão de 2% para 0,8% para o teor de 2% de cal e, posteriormente, para 0,5% para o teor de 6% de cal.

3.3) Mistura solo-vinhoto

Advoga-se que o efeito estabilizante do vinhoto deva-se à sua propriedade de retenção de água

determinada pela higroscopicidade do açúcar, que ocasiona uma quebra nas tensões de vapor dos poros do solo, resultando em um aumento na coesão aparente provocado pelo acréscimo na tensão superficial (FERRAZ, 1994). O efeito de higroscopicidade do vinhoto pode ser notado durante os processos de mistura, homogeneização e compactação das amostras, quando observa-se uma tendência de aglutinação das partículas dos solos, como se fossem unidas por uma substância com aparência de muco. Esta aglutinação de partículas resulta em grumos de material mais úmido que não se misturam com o restante da massa de solo, dificultando as operações de mistura e homogeneização e contribuindo no sentido de se produzir pequenas elevações na massa específica seca máxima e pequenas quedas nos teores ótimos de umidade para teores crescentes de vinhoto. Os resultados dos ensaios executados com as misturas solo-vinhoto são apresentados nas Figuras 8 a 10.

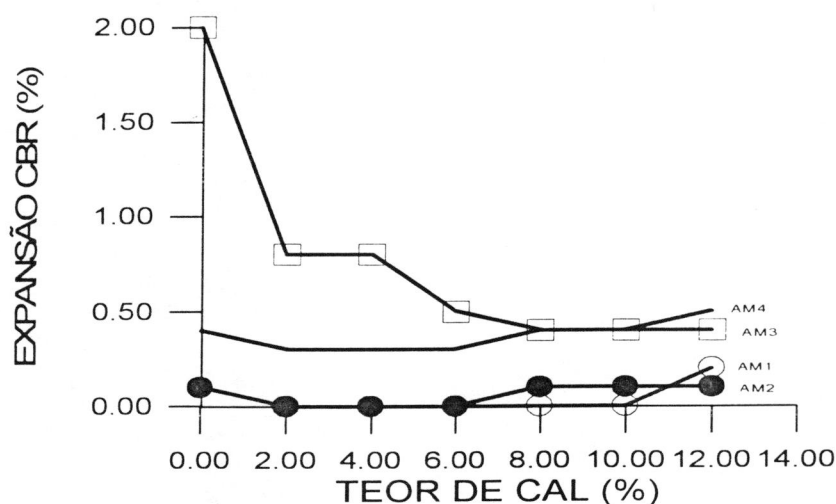


Figura 7. Variação na expansão com o teor de cal das misturas.

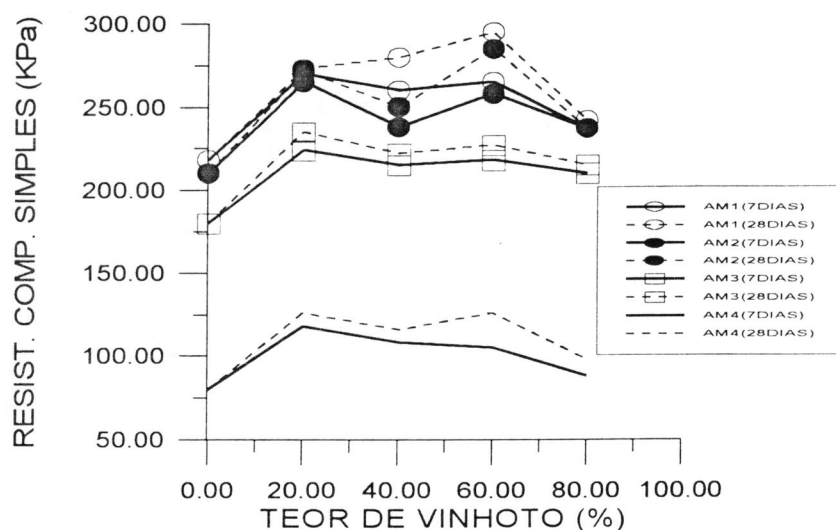


Figura 8. Variação da resistência à compressão simples com o teor de vinhoto das misturas.

A Figura 8 ilustra os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, onde se nota a ocorrência de pequenas perdas e ganhos de resistência, mas observando-se sempre valores superiores àqueles iniciais dos solos. Contudo, para fins práticos, os ganhos de resistência observados podem ser considerados de pequena monta se comparados com os obtidos com as misturas solo-cimento e solo-cal. Os resultados sugerem que a adição de vinhoto aos solos resulta em pequena elevação da coesão, mas

considerando-se que os ensaios foram realizados sem imersão em água dos corpos de prova, uma vez que estes não suportavam a imersão, tem-se que os pequenos ganhos de resistência medidos não devem ser considerados, para fins práticos, em misturas sujeitas à presença de água.

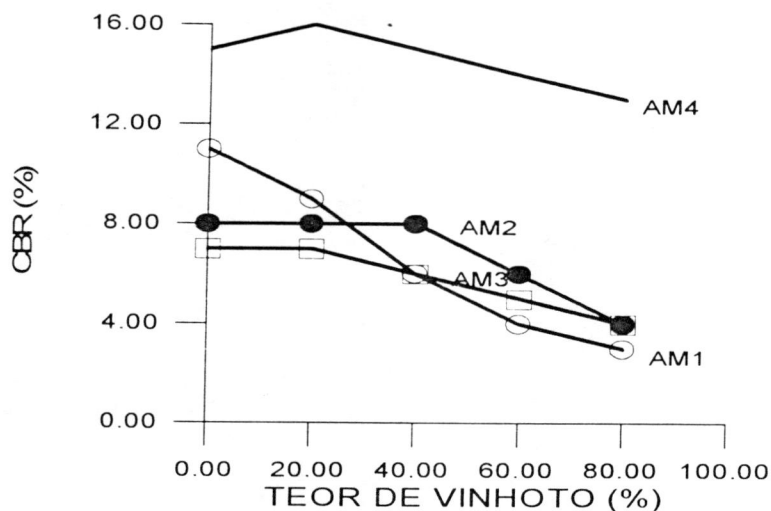


Figura 9. Variação do índice CBR com o teor de vinhoto das misturas.

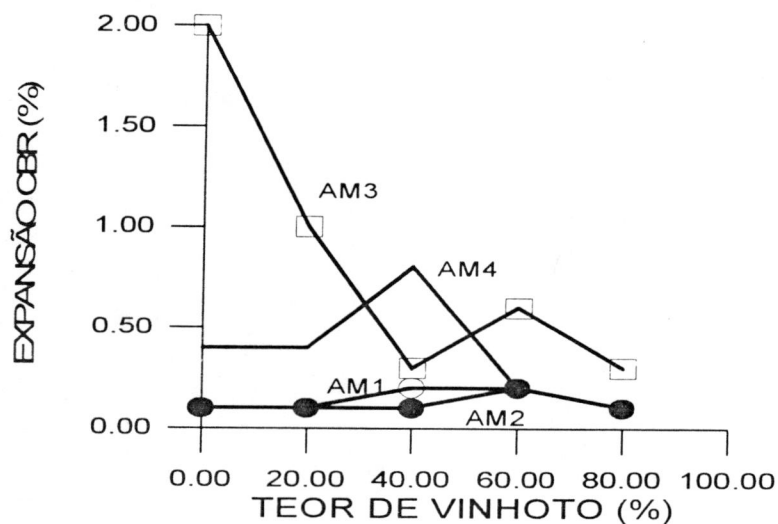


Figura 10. Variação da expansão com o teor de vinhoto das misturas.

Os resultados dos ensaios CBR, Figura 9, mostram uma tendência de queda na resistência com acréscimos no teor de vinhoto. Resultados semelhantes foram obtidos por FONTES (1989), que detectou um efeito negativo do vinhoto na resistência do solo determinada via um penetrômetro de impacto, quando atribuiu este comportamento à presença deletéria da matéria orgânica presente no vinhoto.

Os valores de expansão, Figura 10, mostram tendência de redução para as amostras AM 3 e AM 4, que apresentam valores iniciais mais elevados de expansão. As amostras AM 1 e AM 2, com valores menores de expansão, exibem acréscimos pouco significativos de expansão para os teores de vinhoto na faixa de 20 a 60%.

4) ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO

Segundo o DER-MG (1976), os materiais para emprego como camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários devem satisfazer às seguintes exigências, no que tange à resistência mecânica e expansão

medida no ensaio CBR: (i) sub-base - $\text{CBR} \geq 20\%$ e expansão $\leq 1\%$; (ii) base - valores CBR dependentes do número de solicitações do eixo padrão de 8,2 t, variando de 40% para $N \leq 5 \times 10^6$ solicitações, a 60% para $N > 5 \times 10^7$ solicitações; expansão $\leq 0,5\%$. Analisando-se estas exigências em comparação com os dados apresentados no Quadro 1, conclui-se que nenhuma das amostras de solo no estado natural consideradas neste trabalho atende aos requisitos mínimos para emprego como camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários. Do ponto de vista da resistência mecânica e expansibilidade, e considerando as misturas estabilizadas, constata-se que um teor de cimento ou de cal de 2% leva o valor CBR da amostra AM 4 ao nível que se pode aplicá-la como camada de base; quanto às demais amostras, pode-se sugerir o seu emprego como camadas de sub-base. Com base apenas nos valores CBR das misturas, pode-se afirmar que a amostra AM 1 com um teor de 4% de cimento já é passível de emprego como camada de base, e com um teor de 6% apenas a amostra AM 3, com expansão superior a 0,5%, não se enquadra nas exigências para camadas de base.

No que se refere ao campo de aplicação das misturas solo-cimento, este pode ser analisado a partir dos critérios estabelecidos pela norma brasileira NB 1336/90 (ABNT, 1990), que restringe a estabilização solo-cimento aos grupos A-1, A-2, A-3 e A-4 da classificação de solos do "Bureau of Public Roads" dos Estados Unidos, desde que os solos contenham 100% de material passando na peneira de abertura nominal de 76 mm e, no máximo, 45% de material retido na peneira de abertura nominal de 4,8 mm. Fixa, também, o teor mínimo de cimento em 5%, em massa, podendo-se empregar também teores de até 3,5% para os solos A-1-a, A-1-b ou A-2-4, desde que a mistura se processe em usina e se atinja uma resistência à compressão simples mínima de 2,1 MPa aos 7 dias de cura. Portanto, segundo a NB 1336/90, somente a amostra 4 pode ser utilizada em misturas solo-cimento, com um teor de cimento de 6%.

5) CONCLUSÕES

Os dados apresentados permitem concluir que: (i) todos os solos estudados mostraram-se reativos aos estabilizantes químicos empregados; (ii) observou-se acréscimos na expansão determinada no ensaio CBR das amostras argilosas, para as faixas de 0 a 2% de cimento que podem estar realacionadas a fenômenos de dispersão e expansão da dupla camada difusa das amostras de solos; (iii) do ponto de vista da resistência mecânica e expansibilidade foi possível definir o emprego de misturas como camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, segundo as recomendações do DER-MG e da ABNT.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar os seus sinceros agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Viçosa pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990). Solo-Cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 4 p.
- Cardoso, D.L. (1994). Contribuição à identificação e tratamento dos solos expansivos da região de Viçosa-MG. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG., Brasil, 194 p. (Tese M.S.).
- Ferraz, R.L. (1994). Contribuição ao estudo da estabilização dos solos para fins rodoviários e habitacionais. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG., Brasil, 180 p. (Tese M.S.).
- Fontes, L.E.F. (1989). Propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-escuro de Goianásia, GO, cultivado com cana-de-açúcar e irrigado com vinhaça. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, Brasil, 76 p. (Tese M.S.).