

Estabilização de solos siltosos expansivos de São Paulo com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação

Juliana Kawahashi¹; Ronaldo Bitello Tomei Junior²; Evelyn Kaori Tatsuta³;
José Tadeu Balbo⁴; Dirce Carregã Balzan⁵

Resumo: Ocorrências de solos residuais siltosos de rochas de micaxisto e gnaiss em vastas áreas da região de São Paulo representam uma grande dificuldade para a pavimentação de vias em periferias. Tais solos apresentam expansão elevada quando saturados e baixa capacidade de suporte, sendo que sua estabilização é tradicionalmente realizada com emprego de agregados quando não são simplesmente descartados. Isso impõe custos elevados de pavimentação nessas zonas. Neste artigo são apresentadas recentes experiências com a modificação desses solos com cimentos de alto forno, buscando-se controlar sua expansão e com ganhos de capacidade portante. Foram obtidos resultados positivos no controle de expansão com baixos consumos de ligante hidráulico, porém sem melhorias significativas quanto ao módulo de resiliência das misturas. Misturas solo-brita-cimento requereram maior consumo ligante com aumento do módulo de resiliência, com restrições para a resistência à tração do material. Os resultados apontam a viabilidade das misturas estudadas para reforços de subleitos e sub-bases.

Abstract: Residual silt finely granulated soils from micaschists and gneisses in Sao Paulo represent huge limitations for urban paving in suburban areas. Those soils have high expansion as well as low bearing capacity; its stabilization, whenever possible, is done by means of soil-aggregate mixtures or they are replaced by alternative soils at high excavation and transportation costs. This paper analyses results of soil-cement stabilization for such soils using blast furnace cements aiming at the control of its expansion and improvements on its strength. Nevertheless good results were achieved for controlling expansion with low cement content, resilient modulus did not increase. Soil-aggregate-cement mixtures achieved good improvement on its resilient modulus although the tensile strength of the material was still low, making it not prudent, under a mechanistic stand point, to use it as pavement bases. Results point out the suitability of the blast furnace cement stabilized soils as subgrade and sub-bases layers.

1. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM LIGANTES HIDRÁULICOS

A estabilização de solos com ligantes hidráulicos é um método eficiente de tratamento de solos e agregados de qualidade inferior do ponto de vista de pavimentação; é um método rápido e de baixo custo se comparado à remoção do solo e sua substituição por solos de reposição que exigem a escavação e transporte. Além disso, a estabilização com ligantes hidráulicos de camadas de pavimentos poderá trazer contribuição estrutural significativa para seu comportamento e desempenho. Uma melhoria da rigidez de camadas inferiores protege o subleito de características pobres ao impor menores pressões verticais para as mesmas cargas bem como é benéfica para a redução de deformações de tração no revestimento asfáltico. A presença de camada estabilizada com cimento muda completamente a

forma de resposta estrutural e de desempenho dos pavimentos. Contudo, camadas estabilizadas com cimento, com elevada rigidez, no que tange ao desenvolvimento de fissuras de retração e de fadiga, revelam algo preocupante em especial para pavimentos com bases e sub-bases estabilizadas com cimento (Molenaar e Pu, 2008; Balbo, 2005; Sebesta e Scullion, 2004). Os materiais estabilizados com ligantes hidráulicos retraem como resultado da hidratação dos compostos silicosos, de cálcio, ferrosos e aluminosos presentes dos cimentos, perda de umidade durante as primeiras idades, e também por efeitos ambientais como a variação sazonal de temperaturas (deformações de origem térmica). Essas fissuras posteriormente se propagam naturalmente para a camada de revestimento quando o pavimento é solicitado por cargas, induzindo mecanismos de fratura nessas camadas. Quanto maior a quantidade de ligante nos solos e agregados, mais retrátil e frágil torna-se a mistura. A idéia primária da estabilização de solos foi de criar um material estável sob ação do gelo e da umidade (La Route en Beton, 1961). O emprego das misturas solo-cimento, no século XX, foi bastante disseminado para redução dos elevados custos de transporte de materiais britados que não eram encontrados em locais facilmente acessíveis para todas as obras rodoviárias. Esse tipo de mistura foi inclusive classificado como de baixo custo para pavimentação, a partir de 1932, nos EUA (Catton, 1962). Na ação dos ligantes hidráulicos, por meio de seus cristais de silicatos de cálcio hidratados após as

¹ **Juliana Kawahashi**, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: ju.kawahashi@gmail.com).

² **Ronaldo Bitello Tomei Junior**, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: rbitello@gmail.com).

³ **Evelyn Kaori Tatsuta**, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: evelyn.tatsuta@gmail.com).

⁴ **José Tadeu Balbo**, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: jotbalbo@usp.br).

⁵ **Dirce Carregã Balzan**, Prefeitura do Município de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: dbalzan@prefeitura.sp.gov.br).

Manuscrito recebido em 7/12/2009 e aprovado para publicação em 1/3/2010. Este artigo é parte de TRANSPORTES, volume XVIII, número 2, junho de 2010. ISSN: 2237-1346 (online).

reações, há a criação de um esqueleto, ou encastelamento de cristais, sendo que as partículas de solo ficam envolvidas em uma matriz que as fixa, embora não estejam aderidas entre si (Lilley, 1971; Kezdi, 1979). Como consequência, tem-se incremento na resistência dos solos finos; no caso de solos argilosos, a liberação de cal e suas interações posteriores durante a hidratação do ligante hidráulico contribuem para sua melhoria quanto à suscetibilidade à água.

Poucos estudos amplos e de consistência são encontrados ainda hoje no Brasil quanto ao aproveitamento de solos finos tropicais, residuais ou transportados, como camadas de misturas do tipo solo-cimento (SC) ou solo melhorado ou modificado com cimento (SMC), como por exemplo, aquele conduzido por Ceratti (1991) que estabeleceu diversos parâmetros para misturas SC com solos finos, sobretudo arenosos, de comportamento laterítico e não laterítico (DNER, 1996). De modo geral, soluções em solo-cimento têm sido continuamente empregadas com solos arenosos finos lateríticos (LA e LA' na Classificação MCT) para a construção de bases de pavimentos asfálticos no Estado de São Paulo; há caso recente de seu emprego como base de pavimento de concreto em rodovia na região Centro-Oeste (MT-130). Os estudos de Ceratti (1991) foram realizados com emprego de solos LA, LA', NA, NA' e LG', misturados com cimento tipo CP-II-E, um cimento essencialmente tipo Portland. Resistências à tração na flexão para as misturas indicaram valores próximos de 1 MPa, para consumos de 6 a 12% de ligante hidráulico em peso, valores compatíveis se comparados, por exemplo, com aqueles de Larsen (1967) para solos de clima temperado, que para consumos de 8,6 a 10% de cimento encontrou resistências à compressão de 7,2 e 7,8 MPa. Koliass e Willians (1978) encontraram valores também semelhantes: para consumo de cimento de 10% com solo silto-arenoso, o valor de resistência à tração na flexão foi de 0,7 MPa. Tais valores dão apoio a duas idéias importantes: a adição de cimento ao solo causa uma grande elevação na resistência e, conseqüentemente, também resulta em módulos de elasticidade elevados (que variaram entre 2.900 a 20.000 MPa nos referidos estudos em laboratório); os pavimentos que possuem um material dessa natureza trabalham com esta camada em flexão. Em projetos, há que se compatibilizar resistência estática e à fadiga com as espessuras, módulos de elasticidade e tensões que ocorrem nessas camadas.

Macedo (2004) estudou o efeito da adição de pequenos consumos de cimento Portland em dois tipos de solos (melhorados ou modificados com cimento, SMC), observando ser plenamente possível melhora expressiva no comportamento de solo NA' (com módulo de resiliência abaixo de 700 MPa) com pequenas

adições de CP II 32 (com limitada adição de escória), obtendo incrementos importantes nos valores de módulo de resiliência das misturas estudadas (o solo estudado, arenoso, atingiu entre 1.000 e 2.100 MPa de módulo de resiliência para um consumo de 3% de cimento Portland). SMC foram também estudados por Larsen (1967), quando para consumos de cimento de 3,3 e 4,7% em peso, com misturas empregando solos dos tipos A-7-5 e A-7-6, foram encontrados valores de resistência à compressão de 2,4 e 4,9 MPa e de módulo de elasticidade estático de 930 e 1.200 MPa, respectivamente. Isto denota que, para menores consumos de cimento, em cerca de 50% do consumo tradicional para misturas solo-cimento, as misturas SMC apresentam módulo de elasticidade de até cerca de dez vezes inferior a misturas SC (que podem superar, em testes de laboratório, 20.000 MPa). Este é um aspecto importante, pois, na estabilização para confecção de misturas SMC não é objetivo obter-se uma camada que trabalhe em flexão, como as bases em SC. O SMC é preferencialmente empregado como reforço do subleito e eventualmente como sub-base. Os solos modificados ou melhorados com cimento (SMC) são misturas cujo objetivo primordial é a obtenção de material estável e não suscetível à ação d'água em camadas inferiores de pavimentos asfálticos ou de concreto. Podem ser empregados como reforços para subleitos de pouca resistência ao cisalhamento como também como sub-bases de pavimentos asfálticos se considerada que a resistência alcançada pelo material pode atingir um valor de índice de suporte Califórnia de 20% (na norma federal, segundo Souza, 1981) ou 30% na norma da Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP, 2004).

Modernamente, os ligantes hidráulicos não se restringem aos cimentos do tipo Portland convencionais. O excedente de escória granulada de alto forno em indústrias siderúrgicas motivou, na última década, o emprego em maior amplitude do cimento tipo CP-III na região Sudeste do Brasil, cujo teor de escória em peso durante a moagem do clínquer pode chegar e normalmente atinge 70% como tolera a especificação brasileira para cimentos (NBR 5735). Nesse montante é um paradoxo designar a escória granulada de "adição", pois o clínquer estaria cumprindo esse papel, além de seus compostos servirem de ignição para início de reação dos compostos da escória moída em meio aquoso. O uso de cimento de alto forno é de tal sorte comum, sendo que se dispõe no mercado brasileiro inclusive de ligante de escória granulada moída (que será designada aqui por LEGM sem objetivo de se criar novo termo) que por sua vez é praticamente um ligante hidráulico integralmente produzido com escória (com introdução de sulfato de sódio ou outras substâncias como reagentes). Tais cimentos apresentam

como característica principal o baixo calor de hidratação, que é um fato relevante para o controle de fissuras de retração em misturas tipo SC ou SMC. Além de serem economicamente produzidos com custos inferiores aos cimentos com altos teores de clínquer Portland (CP I e CP II), são também produtos mais sustentáveis ambientalmente na medida em que dão destino final e nobre à escória produzida em quantidades crescentes nas últimas décadas pela siderurgia brasileira além de consumirem menos clínquer em sua fabricação.

2. CONTEXTO DE SOLOS RESIDUAIS NA REGIÃO DE SÃO PAULO

A região de São Paulo caracteriza-se pela presença de solos geneticamente associados a domínios geológicos representados por sedimentos (terciários e quaternários) e rochas do embasamento cristalino pré-cambriano (ígneas e metamórficas). Dentre os domínios geológicos na área de São Paulo destaca-se em extensa área o complexo Embu, com grande variedade litológica agrupando as rochas mais antigas no município, com predominância de xistos, micaxistos e filitos (predominando nas regiões sul e leste do município) bem como de gnaisses graníticos de localização mais restrita. Os solos residuais de micaxistos e de gnaisses, dos quais se ocupa este trabalho (Figura 1), apresentam como problemas predominantes a compactação de aterros - dificuldade de compactação e escorregamentos frequentes quando lançados em encosta - e as pobres características como subleito e camadas do pavimento denotadas por baixa capacidade de

suporte e expansão elevada. Estes solos, também denominados solos de comportamento saprolítico, decompostos a partir das rochas cristalinas mencionadas, apresentam no tocante à pavimentação problemas decorrentes principalmente da sua heterogeneidade, da natureza areno-siltosa ou silto-argilosa (siltos micáceos, caulíníticos ou mesmo quartzosos) e possibilidade de em suas condições naturais exibirem estruturas anisotrópicas herdadas da rocha matriz. Algumas observações em obras mostraram por vezes solos de comportamento saprolítico no estado natural apresentando melhores características como subleito do que quando compactados, no tocante a capacidade de suporte e expansão. Os solos saprolíticos siltosos com fração silte constituída por elevada porcentagem de mica ou macrocristais de caulinita, ou ainda arenosos e siltosos, contendo elevada porcentagem de areia micácea, possuem uma série de peculiaridades dentre as quais se destaca o valor de suporte muitas vezes abaixo daqueles previstos pelos índices das classificações geotécnicas às quais pertencem. As variedades mais granulares ou arenosas, ao contrário, podem exibir elevada capacidade de suporte, em função da presença de fragmentos de rocha decomposta. O valor da expansão geralmente é elevado. Essa expansão é rápida, porém a pressão de expansão é relativamente baixa. Apresentam variação volumétrica por saturação devido à presença de argilominerais expansivos. Na composição mineralógica dos solos saprolíticos originados a partir da decomposição das rochas ígneas ou metamórficas características da região metropolitana de São Paulo existe predomínio do quartzo, argilominerais, feldspatos parcialmente decompostos e micas.

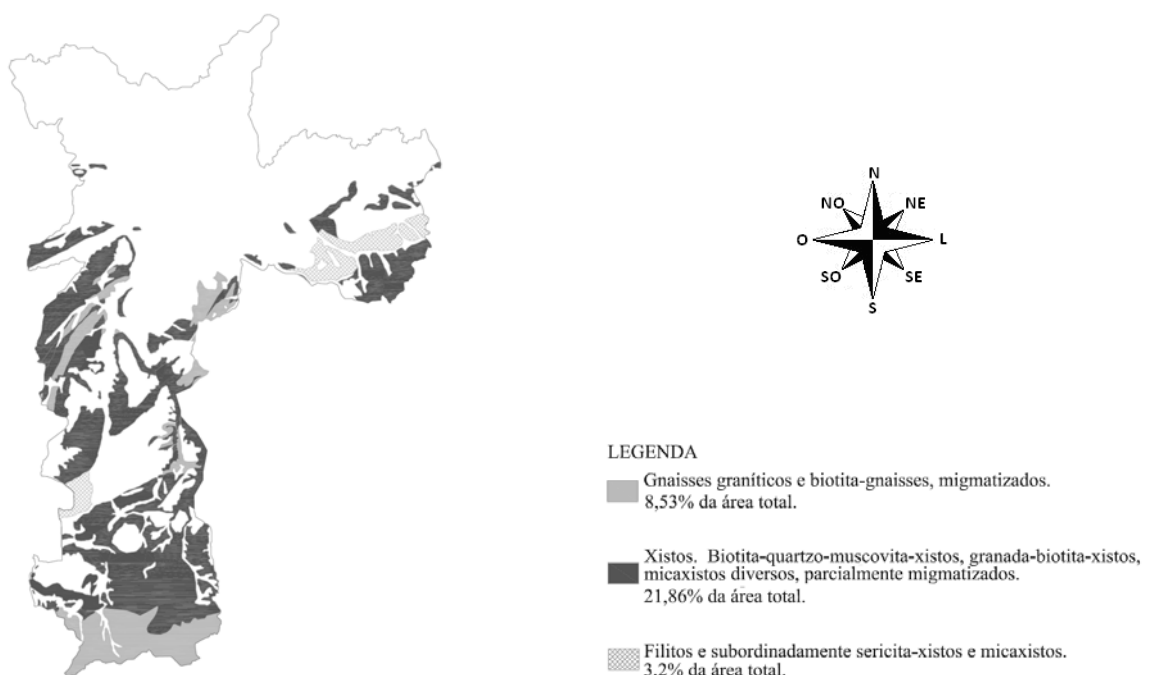


Figura 1. Áreas de ocorrências de rochas de micaxistos e gnaisses decompostas em solos residuais siltosos, adaptado de <<http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br/>>

Dentre os argilominerais podem ser encontrados a caulinita, a haloisita, a gibsita e, ocasionalmente, a montmorilonita e lentes e illita, geralmente associados à decomposição de diques de rocha básica.

Grande parte das extensas áreas, aproximadamente 33,6 % da área total do município, com solos residuais de micaxistos e de gnaisses engloba regiões distantes do centro da capital paulista, em geral urbanizadas de maneira muito irregular, abrigando população de baixa renda. A demanda por pavimentação de vias que compõem essas grandes áreas de periferia urbana é da ordem de milhares de quilômetros, sendo que tais solos residuais, como subleitos, em geral implicam em elevados custos de pavimentação. O critério tradicional de projeto, com base nos valores de resistência e de expansão, acaba por impor espessuras de camadas granulares sobre esses subleitos que inviabilizariam economicamente as obras de pavimentação para essas vias com baixo volume de tráfego comercial. Contudo, o atendimento dessa enorme demanda possui outros aspectos a ser considerados como a melhoria da acessibilidade para a população bem como de segurança pública. De acordo com o método de projeto da Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP, 2004), face à ocorrência de solos expansivos, no caso de suporte com $CBR > 2\%$ e expansão $> 2\%$, deve ser determinada em laboratório a sobrecarga necessária para que o solo apresente expansão menor que 2%. O peso próprio do pavimento projetado deverá transmitir para o subleito uma pressão igual ou maior à determinada pelo ensaio. Portanto, a espessura da estrutura do pavimento deve ser tal que leve o pavimento a apresentar um peso superior ao peso determinado no ensaio. Para os casos quando além da expansão elevada a capacidade de suporte do subleito também é insatisfatória ($CBR < 2\%$) deve ser realizada troca de solo selecionado em espessura preconizada no projeto. Nos casos de subleito do tipo NG' (conforme classificação MCT), com estrutura estratificada e problemas de drenagem, deve-se utilizar um mínimo de 20 cm de reforço de solo selecionado ou estabilizado com $CBR \geq 11\%$. Essas exigências não podem sempre ser cumpridas apenas com a seleção de solos de melhor qualidade, pois em geral são raros na mesma região, além de impor elevados custos de escavação e de transporte. Misturas solo-agregado têm sido empregadas para essa função, embora nem sempre seja fácil, dada a natureza desses solos siltosos residuais, atender às especificações quanto à resistência e à expansão (especialmente nesse último caso quando a expansão de solos residuais de micaxisto supera a barreira dos 10%).

3. ABRANGÊNCIA DOS ESTUDOS REALIZADOS

3.1. Solos estudados

Os estudos visaram à análise de solos de comportamento essencialmente não laterítico de acordo com a classificação MCT (DNER-CLA 259/96) comuns na Região Metropolitana de São Paulo. Esses solos pertencem aos grupos NS' e NG', embora este último, conforme indicado na Figura 2, esteja bem próximo da zona de transição para solos não lateríticos siltosos. Os solos I e II são residuais de micaxisto (siltosos), o primeiro do km 18 da Rodovia Anhanguera e o segundo de bota-fora no Rodoanel Metropolitano Mário Covas em São Paulo em Carapicuíba, trecho Oeste. Os solos III e IV são solos provenientes, respectivamente, do campus da Cidade Universitária (USP) em São Paulo e da zona Norte da Capital, sendo o solo III também residual de micaxisto enquanto que o solo IV é um residual da decomposição de rocha gnáissica. Na Figura 3 são apresentadas as distribuições granulométricas completas para os solos I e IV que foram submetidos a peneiramentos grossos e finos e ensaios de sedimentação para determinação da distribuição dos diâmetros inferiores a 0,075 mm. Os solos II e III são considerados com textura similar aos demais solos apresentados.

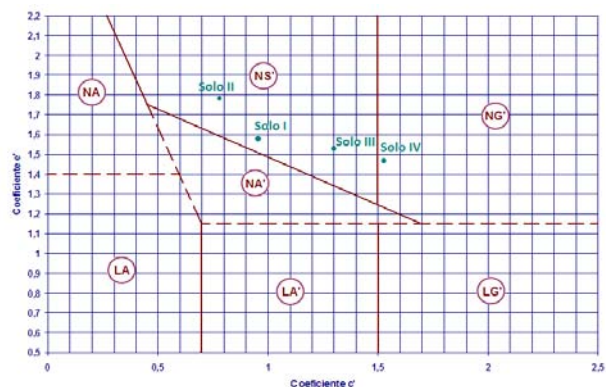


Figura 2. Solos estudados segundo a classificação MCT

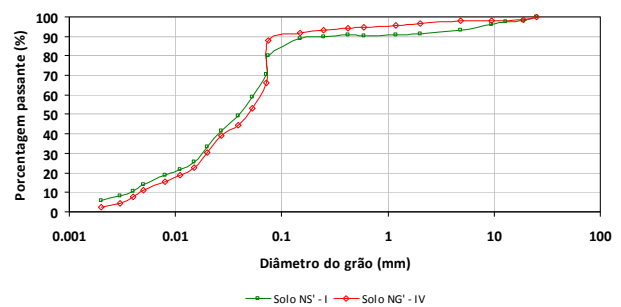


Figura 3. Distribuição granulométrica dos solos (de acordo com NBR 7181, ABNT, 1984)

3.2. Ligantes hidráulicos com escória de alto forno

Os ligantes empregados para os ensaios foram o CP-

III-40-RS e ligante de escória granulada moída (LEGM), ambos procedentes do Estado de Minas Gerais e fabricados pela HOLCIM. Os ligantes foram coletados no centro de distribuição da empresa fabricante em São Paulo na forma de sacarias. O CP III é composto por 70% de escória granulada de alto forno moída enquanto que o LEGM não é misturado com clínquer, podendo ser considerado aproximadamente 100% procedente da moagem fina da escória granulada. A composição química aproximada do LEGM bem como algumas de suas características são apresentadas na Tabela 1, comparativamente ao cimento Portland comum (sem adições), denotando suas similaridades.

Tabela 1. Componentes da escória granulada moída empregada

<i>Compostos e Características</i>	<i>Escória Granulada Moída empregada</i>	<i>Cimento Portland comum</i>
% SiO ₂	30 – 35	21
% Al ₂ O ₃	10 – 13	5
% Fe ₂ O ₃	0,5 – 3	3
% CaO	42,5 – 45,5	62
% MgO	5 – 7	traços
Finura (m ² /kg)	400	370
Densidade (kN/m ³)	29,6	31,5
Início de pega (h)	5 – 7	2 – 4

4. MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS

4.1. Características dos solos coletados e estudados

Os ensaios de compactação realizados para este estudo seguiram a norma NBR 7182 (ABNT, 1986). Os solos I e II são solos siltosos classificados como NS'. O solo III, um pouco mais arenoso, apresenta umidade ótima de compactação próxima aos demais solos siltosos (Figura 4). Já o solo IV, uma argila muito siltosa,

apresenta umidade de compactação relativamente maior que os demais solos estudados. As umidades de compactação para os solos siltosos variaram entre 12 a 15% enquanto para o solo argilo-siltoso foi de aproximadamente 22%. Essas umidades ótimas foram mantidas para a elaboração das misturas com ligantes e também com brita descontínua (ligantes sempre em consumo muito baixo), conforme se detalha na sequência.

4.2. Ensaio realizados

Para o emprego do solo argilo-siltoso (IV) foi estudada a possibilidade de estabilização exclusivamente do ponto de vista de critérios tradicionais, ou seja, analisando-se os efeitos da adição de ligante hidráulico na redução de sua suscetibilidade à água e aumento da resistência ao cisalhamento do material, para emprego como reforço de subleito na forma de solo modificado ou melhorado com cimento. Devido à natureza argilosa e mais coloidal desse solo, estabeleceu-se a adição de pequenas proporções em peso de ligante tipo LEGM. Para os solos mais siltosos, duas condições foram investigadas, em decorrência das características previamente conhecidas desses materiais. O solo I, com expansão próxima do limite tolerado pela norma nacional (Souza, 1981) para subleitos de pavimentos asfálticos (2%), foi estudado do ponto de vista de estabilização com o LEGM em pequenas proporções. Todavia os solos II e III sabidamente apresentariam expansão muito elevada, próxima a 10%, o que naturalmente requereria um maior montante de ligante hidráulico em sua estabilização. Em decorrência de efeitos mais proeminentes de retração de secagem que aumenta com o aumento do consumo de ligante hidráulico e tendo em vista também aspectos de custo e tradições existentes localmente, decidiu-se por se realizar, com os solos II e III, misturas do tipo solo-brita-cimento (SBC). O recurso poderia, com a diminuição

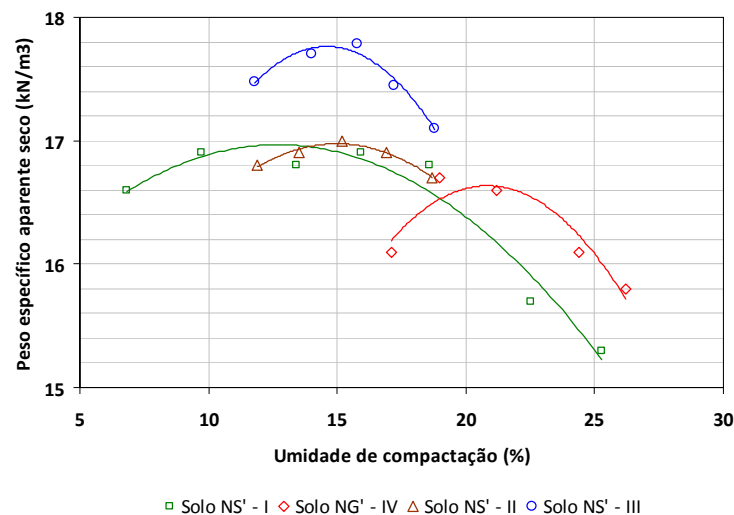


Figura 4. Curvas de compactação dos solos estudados

Tabela 2. Misturas e materiais empregados para os ensaios realizados

Mistura	Materiais empregados	Ensaios realizados
Solo Melhorado com Cimento (SMC)	Solo NS' - I LEGM em peso de 0,5, 1 e 2%	Expansão e CBR para todos os consumos Módulo de resiliência do solo Módulo de resiliência do SMC com 1% de LEGM
Solo Melhorado com Cimento (SMC)	Solo NG' - IV LEGM em peso de 0,5 e 1,5%	Expansão e CBR para todos os consumos
Solo-Brita-Cimento (SBC)	Solo NS' - II CP-III em peso de 1, 2, 3, 4 e 5%	Expansão e CBR para todos os consumos Módulo de resiliência do solo Módulo de resiliência do SBC com 5% de CP-III
Solo-Brita-Cimento (SBC)	Solo NS' - III CP-III em peso de 1, 2, 3, 4 e 5%	Expansão e CBR para todos os consumos Módulo de resiliência do solo Módulo de resiliência do SBC com 5% de CP-III

do volume de material siltoso expansivo na mistura, reduzir sua expansão, e assim, requerer menor volume de ligante hidráulico para sua estabilização (esses solos costumam requerer cerca de 10% em peso de cimento para controle de expansão, o que é tecnicamente e economicamente inviável). Na Tabela 2 são apresentadas, de maneira sumarizada, as misturas preparadas e os ensaios mecânicos realizados com elas, conforme o interesse de emprego do material.

Para o caso específico das misturas tipo SBC com os solos II e III, foram previamente estudadas duas possibilidades de proporcionamento de solo e brita descontínua: 40% de solo e 60% de brita ou 60% de solo com 40% de brita. Os materiais foram avaliados do ponto de vista de sua resistência à compressão axial (NBR 14024 e NBR 12024, ABNT, 2004) para diferentes consumos de ligante (CP-III). Os resultados são apresentados na Figura 5, de onde pode ser extraído que os valores de f_{cd} para as misturas estudadas pouco variou, o que encaminhou para proporções finais de 50% de solo e 50% de brita descontínua para o prosseguimento dos estudos. Todos os ensaios se referem aos 28 dias de cura das misturas.

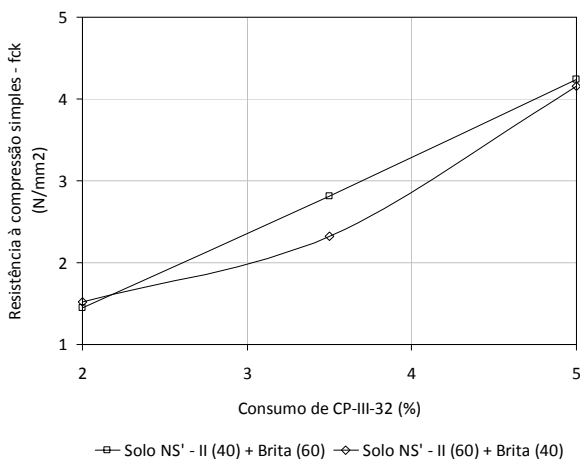


Figura 5. Resistência à compressão de misturas SBC

Observe-se também que, no caso das misturas SBC, antes dos testes, foi necessária a determinação da umidade ótima de compactação novamente, conforme resultados apresentados na Figura 6, que evidenciaram

o aumento do peso específico e a diminuição da umidade ótima dessas misturas em relação aos solos originais.

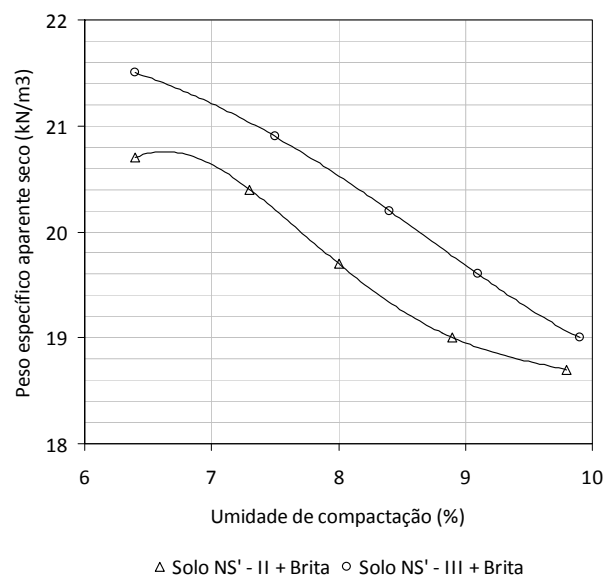


Figura 6. Curvas de compactação para misturas SBC

4.3. CBR e expansão das misturas

Na Figura 7 são apresentados resultados obtidos para valores de expansão (DNER-ME 254/97) ao longo de período de 72 horas para o solo NS' - I em seu estado natural e com os consumos de LEGM previstos. Observa-se que a mistura desse solo, que apresentava expansão em torno de 2%, com apenas 0,5% de ligante hidráulico teve sua expansão reduzida para nível próximo de 0,1%, ou seja, inferior ao 0,5% requerido como especificação de projetos para bases granulares (Souza, 1981). Na Figura 8 são apresentados os correspondentes valores de CBR (DNER ME 254/97) para o solo NS' - I que sem adição de ligante apresentava baixo CBR (ordem de 3%), razão pela qual tal solo como subleito resulta em camadas de bases anti-econômicas em projetos de pavimentos urbanos em São Paulo. Observa-se que, para nenhum dos consumos de LEGM empregados, ocorreu melhora que fizesse a mistura atingir valores além do patamar de 20%; na cidade de São Paulo, a norma oficial de projeto res-

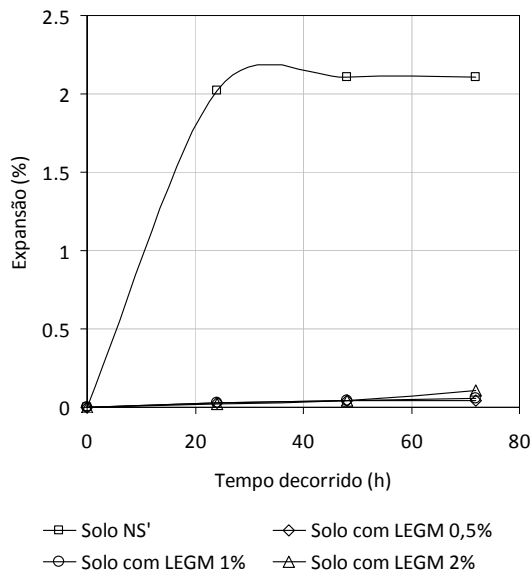


Figura 7. Variação da expansão em solo NS' - I em função do consumo de LEGM

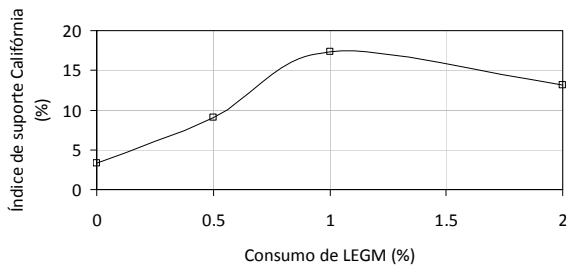


Figura 8. Variação do CBR em solo NS' - I em função do consumo de LEGM

tringe a aplicação como sub-bases solos que possuam, no mínimo, CBR de 30%. Todavia, a simples mistura do solo com 0,5% de LEGM aumentou o valor de CBR para 9%, que como valor para material de reforço de subleito, é bastante satisfatório na maioria dos casos de projeto. Para o caso do solo NG' - IV, conforme resultados apresentados na Figura 9, melhoria significativa na resistência ao cisalhamento é encontrada apenas para consumo de LEGM de 1% ou superior, sendo que para consumo de 1,5% a mistura atinge elevado valor de CBR (> 35%). A expansão do solo decresce também expressivamente para o caso de consumo de ligante de 0,5%, embora, nesse caso, a resistência não apresente melhorias. Dessa forma, é possível dizer que para baixos consumos de ligante hidráulico tipo LEGM, o solo NG' (argilo-siltoso) é bastante melhorado do ponto de vista de expansão apenas, o que atende um requisito de restrição desse parâmetro para solos de subleito, de tal maneira que seu emprego é mais condizente como camada final de terraplenagem (CFT).

Contrariamente aos exemplos anteriores, nos quais os solos apresentavam originalmente expansão próxima de 2%, os solos siltosos NS' - II e NS' - III possuem expansão da ordem de 10%, além de baixos valores de resistência ao cisalhamento (CBR \cong 2,8 e 5,3%, res-

pectivamente). Na Figura 10, com os resultados de expansão para diversos consumos de ligante tipo CP-III, observa-se que apenas para consumos da ordem de 3% em peso é que a expansão dos solos é reduzida a valores abaixo de 2%. Valores abaixo de 0,5% ocorreram para consumos de 5% de ligante hidráulico, o que mostra claramente que, para esses solos muito expansivos, a melhoria dessa particularidade só é obtida para mais elevados consumos de ligante em contraposição ao caso dos solos NS' - I e NG' - IV. Assim, fica evidente que tais solos, apresentando muita variabilidade em função de seus componentes mineralógicos, requerem cuidados específicos quanto à sua dosagem, devendo-se evitar generalizações sobre consumos de ligante para a estabilização nesses casos.

Os valores de CBR para os consumos de ligante es-

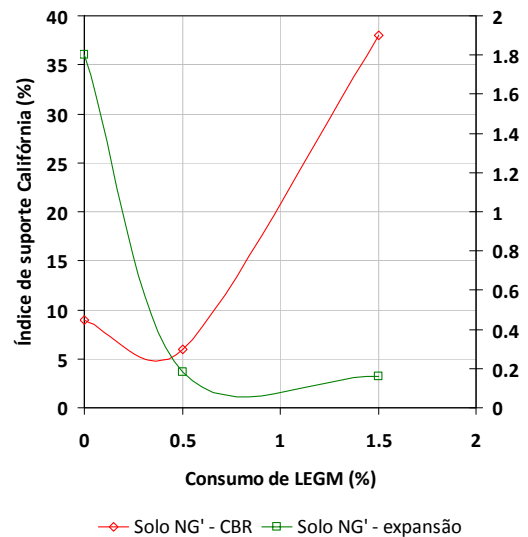


Figura 9. Variação do CBR e da expansão em solo NG' - IV em função do consumo de LEGM

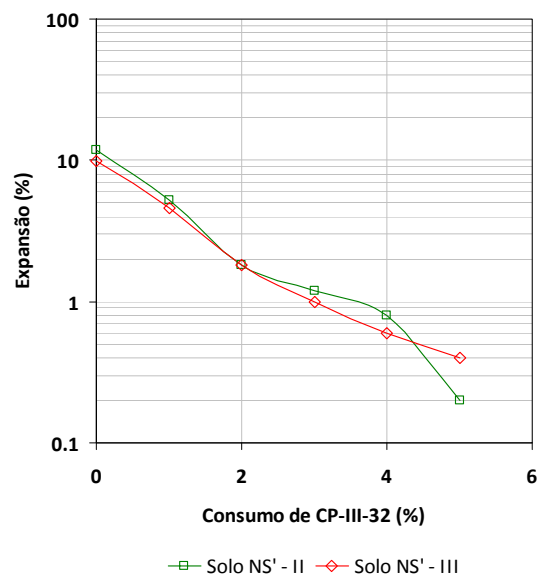


Figura 10. Variação da expansão para os solos NS' - II e NS' - III em função do consumo de CP-III

tudados, conforme apresentados na Figura 11, são muito elevados com as adições de ligante acima de 3%, o que denota nesse caso, uma grande capacidade de o ligante aumentar a resistência ao cisalhamento do solo (CBR) sem que sejam produzidos efeitos proporcionais na queda da expansão. Essas constatações devem ser atribuídas às peculiaridades dos solos e não às diferenças entre os ligantes estudados. Ou seja, do ponto de vista de estabilização uma similaridade granulométrica e de textura dos solos pouco permite afirmar quanto aos resultados. No item que se segue o comportamento resiliente dessas misturas é avaliado, sendo os parâmetros obtidos mais esclarecedores que simples valores de CBR que podem não ser satisfatórios para explicar o comportamento de solos tratados com ligantes hidráulicos.

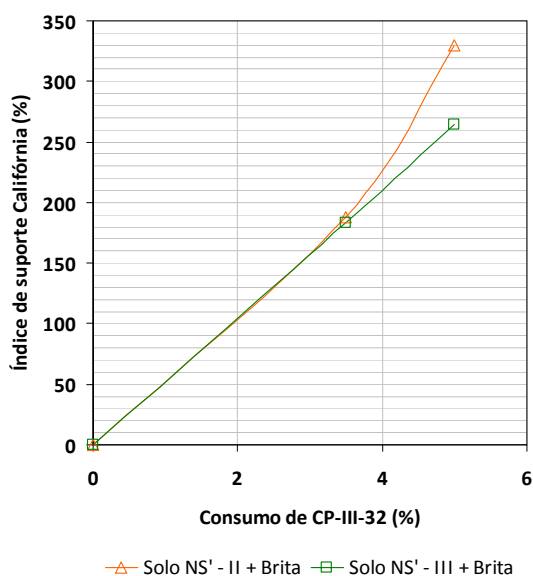


Figura 11. Variação do CBR para solos NS'-II e NS'-III em função do consumo de CP-III

4.4. Módulo de resiliência

A avaliação do módulo de resiliência em solos e misturas em geral não possui correlação direta com o parâmetro resistência ao cisalhamento, ou CBR, embora na literatura, por razões de simplificação na obtenção de dados para projetos, algumas correlações empíricas sejam recordadas. A medida de módulo de resiliência (DNER-ME 131/94), parâmetro relacionado à capacidade de deformação elástica do material sob carregamento cíclico, não é empregada para verificação de pressões sobre o subleito, mas especialmente para a verificação de estados tensionais em camadas superiores, de sub-base, base e revestimentos, quando se coteja um dimensionamento estrutural do pavimento com viés mecanicista. Ensaio de módulo de resiliência em câmara triaxial foram realizados para os três solos siltosos, sendo ainda um ensaio realizado para solo silto-estabilizado com 1% de LEGM visto que tal con-

sumo de ligante hidráulico foi suficiente para uma queda nos valores de expansão do solo para níveis normalmente tolerados até para sub-bases. Como foi visto, o incremento na resistência ao cisalhamento do solo (CBR) foi apreciável (de 3 para 9%), o que representa um ganho significativo para o material, pois torna-se aproveitável como reforço de subleito quanto à expansão mas também permite redução na espessura de pavimento pelo critério tradicional (Souza, 1981). Todavia, observa-se na Figura 12 que não ocorreram alterações importantes no comportamento resiliente do material, ou seja, o solo não se tornou menos deformável elasticamente com a introdução da pequena quantidade de ligante. Isto não refletiria uma melhoria para as camadas superiores de pavimento, em especial aquelas trabalhando em flexão. O comportamento do solo estabilizado com o LEGM para pequeno consumo mostrou-se típico de solos finos coesivos.

No que diz respeito aos solos estabilizados com brita e cimento, cujos resultados para módulo de resiliência são apresentados na Figura 13, recorda-se que devido à elevada expansão do solo natural (> 10%), para se evitar consumos exagerados de cimento para sua estabilização, considerou-se sua mistura com o agregado pétreo. Mesmo assim, valores consistentes de queda de expansão foram garantidos apenas para consumos de ligante tipo CP-III acima de 4%, conforme ensaios apresentados. Os resultados para as misturas SBC denotam claramente dois fatos marcantes. O primeiro deles é que, com o consumo estudado (5%)

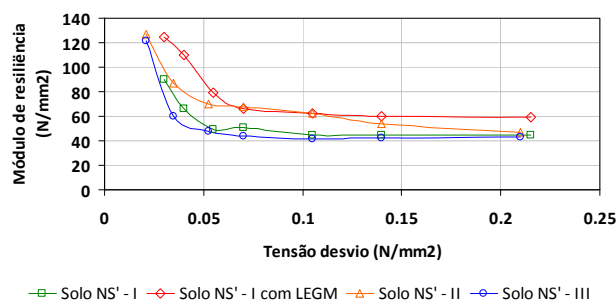


Figura 12. Módulo de resiliência para três os solos siltosos puros e um solo estabilizado com LEGM

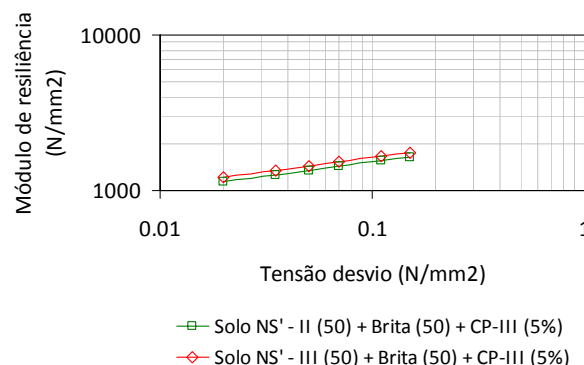


Figura 13. Módulo de resiliência para as misturas SBC

para controle da expansão, houve um aumento muito importante para o parâmetro ensaiado (CBR) em relação aos solos originais (cujos resultados encontram-se na Figura 11). Em seguida, deve ser observado que a resposta resiliente do material alterou completamente, sendo típica de um material granular, ou seja, crescente com o aumento da tensão-desvio, porém, com módulos de resiliência bem mais elevados, próximos de 1.500 MPa para uma tensão de referência de 0,1 MPa. Os valores para os solos originais não estabilizados, ou estabilizado com 1% de LEGM, para a mesma tensão de referência, eram de 40 a 60 MPa. Esse acréscimo é muito relevante, porém o material resultante ficaria ainda sujeito a dois questionamentos: como seria seu comportamento à fadiga em flexão e como se comportaria quanto à retração por secagem em pista (o consumo de ligante é de 5% e importante na constatação de tal fenômeno em misturas solo-cimento convencionais). Em ambos os casos os efeitos poderiam ser desfavoráveis para a estrutura de pavimento, com reflexão de fissuras para camadas asfálticas quando esse material fosse aplicado como base de pavimentos asfálticos. Em contrapartida, diante de tais incertezas, este tipo de mistura poderia ser cotejado como camada de sub-base, pois, atenderia aos critérios de expansão e de resistência ao cisalhamento, conforme diversos critérios normativos (Souza, 1981; PMSP, 2004). Do ponto de vista de critério mecanicista, uma camada de reforço do subleito dessa natureza permitiria distribuir pressões mais reduzidas sobre o subleito com o solo original e não misturado; além disso, reduzindo a deformabilidade da estrutura de pavimento, colaboraria para uma maior durabilidade de bases cimentadas e de revestimentos asfálticos.

4.5. Resistência à tração indireta e à compressão das misturas SBC

Uma vez observado o comportamento resiliente das misturas SBC, renunciando respostas em flexão de camadas com esse material, nada mais natural que uma avaliação de sua resistência à tração (DNER-ME 181/94) para melhor entender o comportamento possível dessa camada. Os resultados para amostras das misturas SBC para os solos NS²-II e NS²-III foram, respectivamente, 0,42 e 0,6 MPa. As resistências à compressão (NBR 12014) correspondentes foram de 1,6 e 3,1 MPa. Tais resultados devem ser encarados como normais quando comparados a misturas do tipo solo-cimento em estudos anteriores. A vantagem, no caso, seria a preservação de valores de resistência à tração típica de solos-cimento tradicionais enquanto houve queda nos valores de módulo de resiliência em relação ao que se esperaria para misturas solo-cimento. Esses resultados devem ser encarados como

resultantes da presença dos agregados pétreos na quantidade estudada (50%).

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme recordado na introdução deste artigo, dois estudos clássicos sobre solo-cimento, um no Estado de Minnesota (Larsen, 1967) e outro no Reino Unido (Kolias e Willians, 1978) apresentaram informações importantes sobre alguns parâmetros mecânicos desses materiais; junte-se a esses (embora existam mais estudos clássicos em especial no Reino Unido) o trabalho de Ceratti (1991), um clássico nacional para os engenheiros rodoviários. Nas Figuras 14 e 15 são confrontados valores de módulo de resiliência e de resistência encontrados naqueles estudos com aqueles presentemente avaliados sobre as misturas SMC e SBC. Os resultados obtidos com solos de natureza argilosa estudados tanto por Larsen (1967) quanto por Kolias e Willians (1978), não tropicais, apresentaram resultados em geral inferiores ou bastante inferiores aos solos arenosos finos estudados por Ceratti (1991), que mesmo com menores consumos de cimento lograram maior rigidez após cura das amostras. Tomando-se o modelo relacional de módulo de resiliência com consumo de cimento proposto por Larsen (1967), os resultados para solos siltosos não lateríticos apresentados nesse estudo aderem relativamente bem a tal modelo, sendo, contudo inferiores. Quanto aos valores de resistência, medidas em condições ideais de laboratório, pelos diversos autores, entende-se que os presentes resultados estão em coerência com estudos anteriores, tanto no que tange à resistência à compressão simples (f_{cd}) do material quanto sua resistência à tração (f_{ct}); os maiores valores de resistência à tração encontrados por Ceratti (1991) e aqui reproduzidos refletem duas tendências importantes. Primeiramente, deve ser enfatizado que as medidas de resistência à tração na flexão tendem a apresentar resultados superiores, conforme seção transversal da amostra prismática, em relação a medidas de tração por compressão diametral obtidas pelo ensaio brasileiro ou *split test* (Bazant e Novak, 2001). Por outro lado, os solos estudados por Ceratti (1991) eram em sua maioria solos muito arenosos em contraposição aos solos siltosos expansivos presentemente avaliados. Os valores de resistência à compressão obtidos, se analisados à luz da normativa nacional para projetos de pavimentos asfálticos (Souza, 1981), indicam resultados típicos para misturas de solos melhorados com cimento, que devem apresentar resistência aos 7 dias entre 2,1 e 2,8 MPa. Portanto, as misturas SBC estudadas, com solos finos siltosos, não se caracterizam como materiais típicos para bases de pavimentos, sendo compatíveis

para o emprego em sub-bases. Naquele método semi-empírico uma camada de pavimento dessa natureza possuiria coeficiente estrutural de 1,2, caracterizando assim solos melhorados com cimento.

Tendo em vista os resultados obtidos, de maneira a melhor delinear o emprego dos materiais estudados, foi realizada uma avaliação do estado tensional de bases e sub-bases de pavimentos asfálticos que porventura empregassem a mistura SBC descrita neste artigo. Para a simulação foi empregado o programa BISAR 3.0, fundamentado na Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas, conforme se relata. Foi considerado um par de rodas de eixo padrão de 80 kN e as tensões nas camadas avaliadas em linha vertical abaixo do centro de gravidade do par de rodas. A camada de revestimento foi simulada como duas camadas de 25 mm de espessura e módulos de resiliência de 5.000 e 6.000 MPa (apenas a título de se considerar a consequência de um diferencial térmico entre topo e fundo do revestimen-

to). A mistura SBC foi inicialmente simulada como camada de base e admitida posteriormente como sub-base. Como a camada de base ou a de sub-base não foi dividida em subcamadas, a verificação estrutural se realizou com módulo de resiliência do material invariante (1.500 MPa); essa camada foi tomada com espessura de 100 a 300 mm, tanto no caso como base quanto como sub-base. O subleito foi tomado como sendo o próprio solo original sem melhorias (50 MPa). Para a estrutura de pavimento com sub-base em SBC foi admitida uma base granular (150 mm) com módulo de resiliência invariante de 180 MPa. A partir dessas simulações cujos resultados são apresentados na Figura 16, foi possível entender que o emprego de misturas SBC com os materiais estudados, para finalidades de pavimentação em zonas com muita frequência de solos tipo NS², é cabível como sub-base e temerário como base, conforme esclarecimentos que se seguem:

- Quando empregadas as misturas SBC como base de pavimentos, as tensões às quais essas bases estariam normalmente sujeitas seriam acima do tolerável (>0,5 MPa) para espessuras convencionais de compactação, ou seja, até 200 mm;
- No caso anterior as tensões nos revestimentos asfálticos são praticamente em compressão (se acima de 100 mm de espessura de base), ainda que a base não apresente módulo de elasticidade muito elevado, como foi visto; há redução importante nas deflexões no topo do revestimento, indicativo de melhoria estrutural no que tange esforços no concreto asfáltico;
- Como camada de sub-base o SBC mostrou-se pouco dependente de sua própria espessura, sendo que as tensões nessa camada estariam em níveis toleráveis para o material (~0,2 MPa);
- Para o caso acima, haveria queda nas tensões (deformações) de tração na fibra inferior do re-

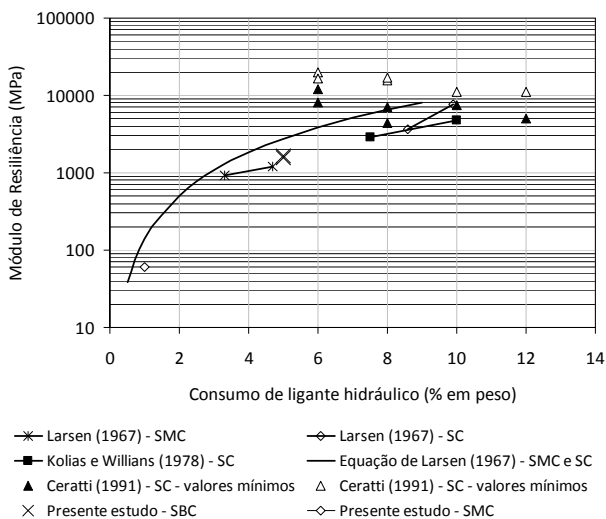


Figura 14. Módulo de resiliência para as misturas SC conforme diferentes estudos

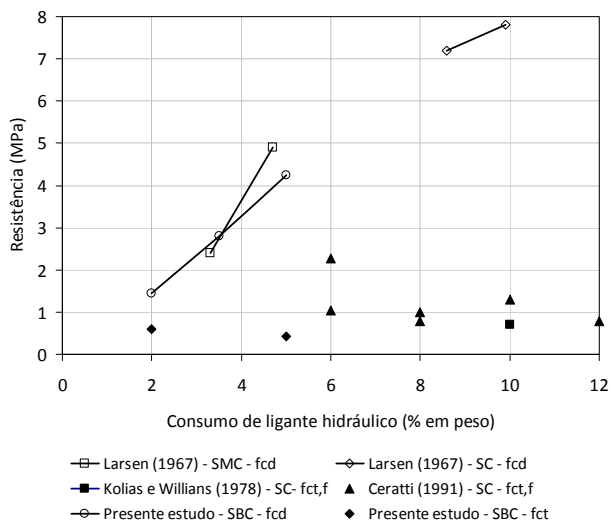


Figura 15. Valores de resistências para as misturas SC conforme diferentes estudos

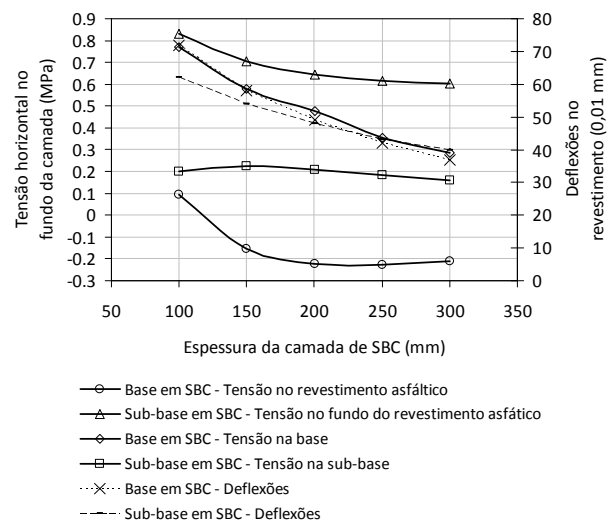


Figura 16. Efeitos da espessura e da posição da camada de SBC no pavimento

vestimento asfáltico, acompanhada de redução de deflexão, o que melhoraria o comportamento da estrutura como um todo.

6. CONCLUSÕES

O estudo realizado mostrou ser possível o tratamento dos solos finos siltosos residuais não lateríticos existentes na RMS, em geral de qualidade medíocre para pavimentação, com emprego de ligantes hidráulicos constituídos por 70 a 100% de escória granulada de alto forno moída. Os valores de resistência ao cisalhamento e de expansão dos solos originais melhoraram para as misturas tratadas com cimento. É possível, para solos siltosos não lateríticos de baixa expansão (~2%), o emprego de quantidades pequenas de ligantes hidráulicos de alto forno para a correção da expansão a limites toleráveis. No estudo de um solo silto tipo NS' na classificação MCT, a introdução de 1% em peso de ligante foi suficiente para alcançar esse objetivo, com acréscimo de resistência. Contudo, os resultados obtidos com esse padrão de estabilização mostraram que não há modificações importantes nas respostas resilientes dos materiais assim melhorados com o cimento frente aos solos originais. O resultado geral qualifica o solo melhorado com cimento a ser empregado como um subleito (ou reforço do subleito) de melhor qualidade e menos prejudicial ao comportamento da estrutura do ponto de vista de dimensionamento tradicional (proteção do subleito – critério do CBR).

Assim, o solo NS'-I modificado com LEGM, ao consumo de 1%, teve seu CBR aumentado para 9% e sua expansão reduzida para 0,1%, sendo, portanto, plenamente justificado seu emprego como material para reforço de subleito, empregando solo local, com muito baixo consumo de ligante hidráulico, o que leva a supor sua viabilidade técnico-econômica. Observe-se, contudo, que não seria de se supor melhorias do ponto de vista resiliente nas estruturas de pavimento dada a manutenção dos padrões de módulo de resiliência com esse baixo consumo de ligante. As misturas de solos NS'-II e NS'-III, muito expansivos, com 50% de agregados descontínuos, resultaram satisfatórias. Com cerca de 5% em peso de CP-III foi possível a redução da expansão do material para níveis toleráveis; contudo, deve ser entendido que o agregado pétreo introduzido teve papel importante nesse controle, pois, sem sua presença ocupando volume, talvez o dobro do peso de ligante fosse necessário para estabilizar essas misturas (há casos de 11% de consumo em peso para se obter redução da expansão com tais solos sem misturas com agregados). As misturas SBC estudadas resultaram em aumento expressivo no valor de módulo de resiliência (de mais de dez vezes em relação ao

solo NS' original), o que encaminhou para uma verificação tensional, apoiada na Teoria de Camadas Elásticas, para se concluir sobre a aplicabilidade desse material em camadas de base, sub-base ou reforço de pavimentos, posto que seu valor de CBR após estabilização atenderia a qualquer um desses casos, a princípio. O módulo de resiliência dessas misturas mostrou-se dependente das tensões de confinamento durante os ensaios, assemelhando-se a um material granular bem graduado muito confinado.

Das análises realizadas ficou bastante claro parecer inviável o emprego desse material como base de pavimentos (com as espessuras convencionais entre 100 e 200 mm) haja vista as tensões de tração na flexão às quais o fundo da camada de SBC estaria submetido, que superariam o valor de resistência à tração verificada ou estariam muito próximas desse valor, o que induziria fadiga no material de maneira precoce, quando não ruptura precoce, já que em pista os materiais resultam heterogêneos em comparação a amostras moldadas em condições ideais em laboratório. Esta conclusão é reforçada ainda mais para o caso de misturas preparadas em pista do que em usina de solos e agregados. Para o caso de sub-bases (considerando os valores de CBR atingidos pelas misturas SBC), o material mostrou-se viável, trabalhando a tensões compatíveis com os valores de resistência aferidos; além disso, essas tensões não se mostraram muito sensíveis à espessura dessa camada, não se exigindo, portanto, compactação de material espesso além do convencional (150 a 200 mm). A sub-base em SBC, nos padrões apresentados, pode ser benéfica para o desempenho dos revestimentos asfálticos uma vez que induzem menores deflexões nos topos dos revestimentos, acompanhadas de reduções significativas das tensões normais (ou deformações) de tração no fundo dessas camadas; isto de maneira alguma é uma aplicação de pavimento invertido convencional: mantém-se aqui o preceito original de estabilização do solo local a baixo custo.

Diante dos estudos realizados e seu cotejamento à luz de outros estudos anteriores, formando então uma gama de solos de naturezas bastante distintas, há indicação de que seja necessária prudência nas análises mecanicistas comparando-se tensões avaliadas e resistências medidas em camadas de solo-cimento. Os valores de módulo de elasticidade dos materiais apresentam ampla faixa de variação em função da constituição mineral dos solos e do consumo de cimento propriamente dito, o que em pista resultaria em estados tensionais variáveis também, para um mesmo carregamento. A análise de diversos estudos anteriores leva a crer em uma variabilidade significativa também em parâmetros medidos em laboratório relativos à resistência destes materiais. As análises conduzidas sugere-

rem cuidados com hipóteses de resistência à tração desses materiais, que poderia, por exemplo, ser aquela de não tomá-la como superior a 0,5 MPa em se considerando a variabilidade desses materiais em pista.

AGRADECIMENTOS

Os autores desenvolveram os trabalhos com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – que concedeu as bolsas de estudo para os três primeiros autores. Agradecem também a cooperação do tecnólogo Edson de Moura do LTP/EPUSP durante parte dos testes realizados em laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984). Solo - Análise granulométrica. *NBR 7181*, Rio de Janeiro.
- ____ (1986) Solo - ensaio de compactação. *NBR 7182*, Rio de Janeiro.
- ____ (2004). Solo-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. *NBR 14024*, Rio de Janeiro.
- ____ (2004). Solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. *NBR 12024*, Rio de Janeiro.
- Balbo, J.T. Pavimentos asfálticos híbridos semi-rígidos e rígidos: alternativas para médios a elevados volumes de tráfego. In: *Anais da 36a. Reunião Anual de Pavimentação* (Cd-rom), Associação Brasileira de Pavimentação, Curitiba, 2005.
- Bazant, Z. P.; Novak, D. Proposal of standard test of modulus of rupture of concrete with its size dependence. *American Concrete Institute Journal of Materials*, pp.79-87, January-February, 2001.
- Catton, M.D. Soil-cement technology – a résumé. Portland Cement Association, *Bulletin 136*, Skokie, 1962.
- Ceratti, J.A.P. *Estudo do comportamento à fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos*. Tese (Doutorado), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.
- DNER (1994) Solos - determinação do módulo de resiliência. *DNER-ME 131/94*, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro.
- ____ (1994). Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada - determinação da resistência à tração por compressão diametral. *DNER-ME 181/94*, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro.
- ____ (1996). Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. *DNER-CLA 259/96*, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro.
- ____ (1997). Solos compactados em equipamento miniatura - mini-CBR e expansão. *DNER-ME 254/97*, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro.
- Kezdi, Á. Stabilized earth roads. Elsevier Scientific Publishing Co., *Developments in Geotechnical Engineering 19*, Amsterdam, 1979.
- Kolias, S.; Williams, R. I. T. Uniaxial tension tests on cement-stabilized granular materials. *Geotechnical Testing Journal*, v.1, n.4, p.190-9, 1978.
- La Route en Béton. La pratique de la stabilisation de sol au ciment. *Bulletin n. 48*, Wildegg, 1961.
- Larsen, T.J. *Ensaio em bases de solo-cimento e de solo modificado por cimento em Minnesota*. Trad. da Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1967.
- Lilley, A.A. Cement-stabilized materials for road and airfield pavements. Cement and Concrete Association, *TR 42.458*, London, 1971.
- Macedo, M.M. *Solos modificados com cimento – efeito no módulo de Resiliência e no dimensionamento de pavimentos*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- Molenaar, A.A.A.; Pu, B. Prediction of fatigue cracking in cement treated base courses. In: *Pavement Cracking*, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-47575-4, London 2008.
- Prefeitura do Município de São Paulo. Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio. *Norma IP-04*, PMSP, São Paulo, 2004.
- Sebesta, S.; Scullion, T. Effectiveness of minimizing reflective cracking in cement-treated bases by microcracking. *FHWA Report n. TX-05/0-4502-1*, Washington, D.C., 2004.
- Souza, M.L. *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 1981.
- Vogt, K. La stabilisation au ciment ou à la chaux. *La Route en Béton*, Bulletin d'Information no. 70/71/72, Wildegg, 1967.