

IAG355-01-2013

ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM EMULSÃO ASFÁLTICA PARA EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO

Lysiane Menezes Pacheco
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, Brasil
lysiane@terra.com.br

Wander Paulo da Silva Omena
Greca Distribuidora de Asfaltos Ltda
Araucária, Brasil
wander@grecaasfaltos.com.br

Luciana Rohde
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Brasil
lurohde@yahoo.com.br

Jorge Augusto Pereira Ceratti
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, Brasil
jorge.ceratti@ufrgs.br

Resumen

La investigación propuesta tiene por objetivo evaluar la viabilidad técnica del empleo de un suelo fino estabilizado con emulsión asfáltica como capas de sub-base y base de carreteras y como revestimiento de vías de bajo volumen de tráfico. El uso de agregado pétreo y de suelo de buena capacidad estructural para conformar capas de pavimentos resulta en un proceso de alto impacto y costoso, ya que son necesarias las actividades de extracción y de transporte del material virgen, así como, en muchos casos, el descarte del material local. Una alternativa económica y que preserva el medio ambiente es la sustitución de esta metodología convencional por el empleo de suelo local estabilizado, apuntando a garantizar las características de resistencia y durabilidad. Por lo tanto, para evaluar las propiedades mecánicas del suelo-emulsión después de 7 días de cura, se realizaron ensayos con y sin inmersión de resistencia a la tracción por compresión diametral y de resistencia a la compresión inconfiada, así como ensayo de módulo de resiliencia triaxial. Para verificar la resistencia al desgaste, se realizó el ensayo *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) modificado. Se analizaron nueve combinaciones, variando tres porcentajes de fluido y tres porcentajes de emulsión. Para el tenor de proyecto, se observó que con la adición de emulsión hubo un incremento de las resistencias a la tracción, a la compresión y al desgaste. Finalmente, se realizaron análisis computacionales con la intención de verificar las tensiones y deformaciones resultantes en estructuras compuestas por suelo-emulsión. En las situaciones

evaluadas, los resultados obtenidos indican la viabilidad técnica del empleo del material como revestimiento y base, sin embargo no sería adecuado para su uso como sub-base.

Resumo

A pesquisa proposta tem por objetivo avaliar a viabilidade técnica do emprego de um solo fino estabilizado com emulsão asfáltica como camadas de sub-base e base de rodovias e como revestimento primário de vias de baixo volume de tráfego. O uso de agregado pétreo e de solo de boa capacidade estrutural para compor camadas de pavimentos resulta em um processo impactante e oneroso, uma vez que são necessárias as atividades de extração e de transporte do material virgem, além de, em muitos casos, descarte do material local. Uma alternativa econômica e que preserva o meio ambiente é a substituição desta metodologia convencional pelo emprego de solo local estabilizado, sendo garantidas as características de resistência e durabilidade. Desta forma, para avaliar as propriedades mecânicas do solo-emulsão após 7 dias de cura, foram executados ensaios com e sem imersão de resistência à tração por compressão diametral e de resistência à compressão simples, além de ensaio de módulo de resiliência triaxial. Para verificar a resistência ao desgaste, foi realizado o ensaio *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) modificado. Foram analisadas nove combinações, variando três percentuais de fluido e três percentuais de emulsão. Para o teor de projeto, observou-se que ao se adicionar emulsão houve incremento das resistências à tração, à compressão e ao desgaste. Por fim, foram feitas análises computacionais com intuito de verificar as tensões e deformações resultantes em estruturas compostas por solo-emulsão. Nas situações avaliadas, os resultados gerados indicam a viabilidade técnica do emprego do material como revestimento e base, porém não seria adequado para uso como sub-base.

INTRODUÇÃO

Na região sul do Brasil, os pavimentos flexíveis geralmente são compostos por revestimento asfáltico sobre uma estrutura de brita graduada. O uso de agregado pétreo como camadas de base e de sub-base requer, além de extração de recursos não renováveis e seu transporte, uma estrutura para britagem e separação das frações, o que gera alto custo e pode inviabilizar a execução de uma via. Neste intuito, eliminar a utilização de agregado, adequando os parâmetros do material existente no entorno da obra é de extrema importância econômica e ambiental.

Outro fato mencionável é que as camadas granulares nem sempre possuem comportamento estrutural adequado. Devido à elevada deformabilidade, há aumento das tensões de tração na fibra inferior da camada de revestimento. A fim de evitar tal problema, os projetistas têm dimensionado revestimentos asfálticos mais espessos, o que encarece a obra e pode resultar em outros defeitos, como trincamento *top-down*.

Diante disto, tem-se investido em tecnologias que visam o emprego de materiais alternativos à pavimentação convencional. Buscam-se opções resistentes e duráveis que possuam melhor relação custo/benefício e que contribuam para melhorar a qualidade do meio ambiente.

Os solos locais podem ter suas características mecânicas melhoradas a partir de estabilização. Quando se emprega emulsão asfáltica de petróleo (EAP), devido as suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, há aumento da resistência. Desta forma, o solo-emulsão pode

ser utilizado como camada de base ou sub-base de rodovias, minimizando deflexões. Devido às propriedades impermeabilizantes e ao menor custo, se comparado com outras metodologias, ainda destaca-se seu uso como revestimento de vias de baixo volume de tráfego. Esta alternativa garante o escoamento de matéria prima e de bens e o deslocamento de pessoas tanto em períodos secos quanto chuvosos.

SOLO-EMULSÃO

O solo-emulsão é a denominação da mistura de solos, geralmente locais, com EAP, sendo espalhada e compactada a frio. Considera-se ainda a água como material constituinte da mistura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS, 2001). Como outros tipos de estabilização, este método visa aproveitar o solo disponível no local da obra, melhorando sua capacidade estrutural e reduzindo a sua permeabilidade.

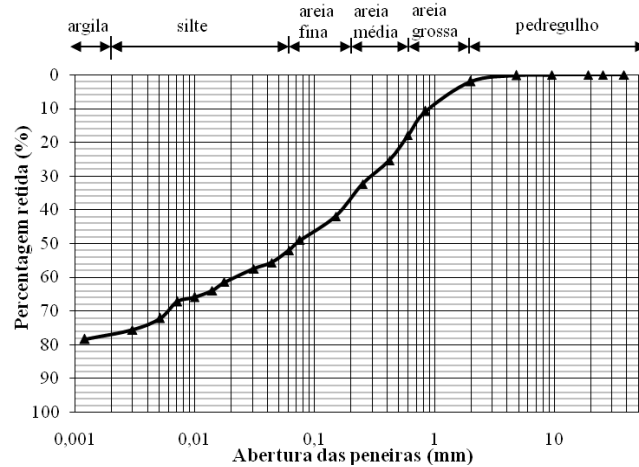
Após a mistura e a compactação, as partículas de ligante betuminoso que se formam devido à ruptura da emulsão preenchem os vazios existentes no solo, impedindo a penetração de água no sistema, reduzindo a perda de resistência que ocorreria com o aumento do teor de umidade. As partículas também recobrem os grãos de solo, aumentando a coesão. Entretanto, este filme minimiza o contato entre os grãos, diminuindo a resistência cisalhante (MATTOS, 1991). Portanto, há um teor ótimo de EAP que resulta em um filme com espessura ideal.

Além de aumentar a coesão e reduzir a absorção de água, a estabilização com EAP aumenta a resistência à tração e à compressão do solo. Desta forma, cria-se uma estrutura mais resistente aos esforços de tráfego e às variações de umidade (ASPHALT ACADEMY, 2009; BERNUCCI et al., 2008).

MATERIAIS

O solo estudado é proveniente de uma escavação realizada no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Brasil. A curva granulométrica, obtida através de peneiramento e sedimentação, é apresentada na Figura 1.

Figura 1: Curva granulométrica do solo



Buscando maior resistência, optou-se por aplicar energia modificada para compactação do solo-emulsão. Uma vez que os valores de algumas propriedades do solo natural são utilizados na dosagem, empregou-se energia modificada também para os ensaios de caracterização do solo. Os resultados são expostos na Tabela 1. A partir dos valores obtidos, segundo a classificação da AASHTO o solo é siltoso (A-4).

Tabela 1: Caracterização do solo

Determinações	Resultados
Massa específica dos grãos que passam na peneira n. 4 (g/cm^3)	2,604
Limite de Liquidez (%)	27,0
Limite de plasticidade (%)	17,0
Umidade ótima (%)	10,0
$\gamma_{\text{máxima}}$ (g/cm^3)	1,91
Índice de Suporte Califórnia – ISC – (%)	22,0
Expansão ISC (%)	0,14
Módulo de resiliência (MPa) θ – somatório das tensões principais (MPa) patm – pressão atmosférica (MPa)	$\text{MR}=211,37.(\theta/\text{patm})^{0,076}$

A EAP empregada foi fornecida por uma empresa que produz e comercializa materiais asfálticos. Foi desenvolvida para pesquisas de solo-emulsão, não existindo, portanto, especificação para este tipo de material. A carga era neutra e o resíduo em peso era 56%.

MÉTODOS

Dosagem

Segundo Sant’Ana (2009), o teor de EAP necessário para estabilizar o solo é proporcional à superfície específica das partículas. Neste intuito, para determinar este valor, o autor apresenta a equação 1, denominada equação de Vogt, adotando massa específica dos grãos de $2,65 \text{ g/cm}^3$:

$$100\Sigma = 0,07P_4 + 0,14P_3 + 0,33P_2 + 0,81P_1 + 2,7S_3 + 9,15S_2 + 21,9S_1 + 135F \quad (1)$$

Onde:

Σ – superfície específica (m²/kg);
P₄ – fração entre as peneiras 50 e 25 mm (%);
P₃ – fração entre as peneiras 25 e 12,5 mm (%);
P₂ – fração entre as peneiras 12,5 e 4,76 mm (%);
P₁ – fração entre as peneiras 4,76 e 2,00 mm (%);
S₃ – fração entre as peneiras 2,00 e 0,42 mm (%);
S₂ – fração entre as peneiras 0,42 e 0,177 mm (%);
S₁ – fração entre as peneiras 0,177 e 0,075 mm (%);
F – fração passante na peneira 0,075 mm (%).

Para encontrar o teor de asfalto residual, o qual é convertido em quantidade de EAP, o autor indica a equação 2, denominada fórmula de Duriez:

$$p = k.(\Sigma)^{0,2} \quad (2)$$

Onde:

p – teor de asfalto residual em relação a massa de solo (%);
k – coeficiente de módulo de riqueza (dependente do agregado e do asfalto);
 Σ – superfície específica (m²/kg).

Adotando módulo de riqueza de 1,5 – visando teor de emulsão baixo para que o projeto seja econômico – obteve-se teor de asfalto residual de 3,53%, resultando em 6,3% de emulsão.

O teor de emulsão calculado foi o ponto central, sendo ensaiados também ± 1 ponto percentual. Evitando que houvesse ruptura precoce da emulsão, adicionou-se água destilada no solo, dando-se o nome de água de dispersão. Considerou-se que fluido era a soma da água de dispersão e da parte fluida da emulsão. Do mesmo modo, o teor de fluido central de moldagem foi a umidade ótima, ensaiando-se também ± 3 pontos percentuais de fluido.

Execução dos ensaios e análise dos resultados

Como não há metodologia normalizada para dosagem do solo-emulsão, para encontrar o teor de projeto adotaram-se os ensaios de resistência à tração (RT) e resistência à compressão simples (RCS). Além destes, executou-se ensaios de módulo de resiliência triaxial (MR). Por fim, visando a aplicação como revestimento, ensaiou-se amostras ao desgaste.

Para execução da mistura, foi adicionada ao solo seco água destilada referente ao teor de água de dispersão. Para melhor homogeneização, o solo úmido foi armazenado durante quinze horas em sacos fechados. Após esse período, foi adicionada emulsão a 30°C, sendo misturada ao solo com espátula. Antes de executar a moldagem, a mistura foi mantida durante duas horas em estufa à 25°C, simulando o tempo transcorrido entre aplicação e compactação no campo. Os ensaios foram realizados após sete dias de cura ao ar. Sant’Ana (2009) relata que este período é suficiente para que as propriedades ligantes da EAP sejam ativadas.

Para o ensaio de RT foram moldados corpos-de-prova (CP) aplicando 50 golpes em cada face com o soquete Marshall automático. O ensaio seguiu os procedimentos da norma DNIT-ME 136/2010. Foram moldados seis CP (três ensaiados secos e três ensaiados saturados) para cada

mistura. Com a imersão busca-se comprovar que a emulsão impermeabilizou o solo. Os CP ensaiados sem imersão permaneceram por uma hora à 25°C antes do rompimento, já os ensaiados com imersão permaneceram por uma hora imersos em água à 25°C. Na Figura 2 é apresentada, para cada combinação, a média da RT dos três CP, comparativamente é apresentada a média da RT do solo puro. A Figura 3 apresenta a média da resistência retida à tração (RRT), a qual é a relação entre RT com e sem imersão.

O comportamento da RT é uma parábola com pico no teor de fluido de 10%. O maior resultado para todos os teores de fluido foi obtido com 7,3% de emulsão, o que possivelmente é atribuído a maior espessura do filme de betume ou maior uniformidade, que confere maior coesão. A média da RT do solo puro foi inferior a todos os resultados com adição de emulsão. Considerando, conforme cita Sant'Ana (2009), que a RT mínima deve ser 0,30 MPa, todos os teores de emulsão para 10% de fluido e os dois maiores teores de emulsão para 13% de fluido se adequam a esta limitação.

Figura 2: Resultados RT

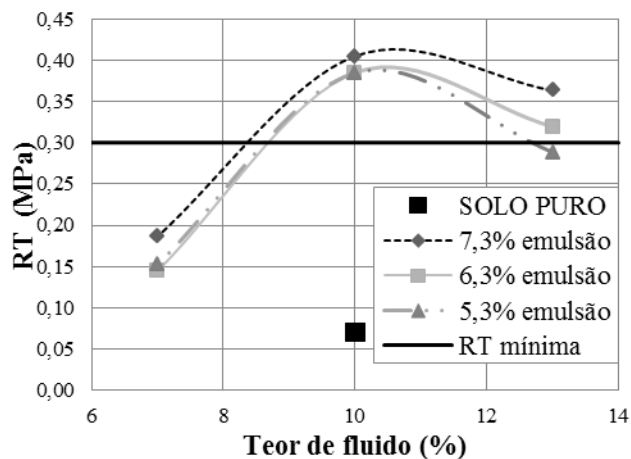
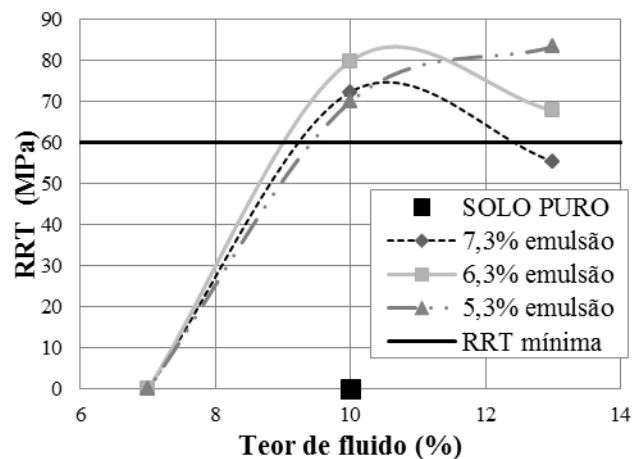


Figura 3: Resultados RRT

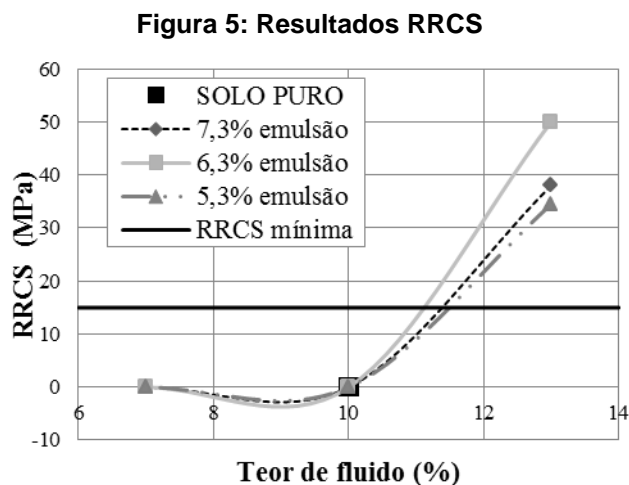
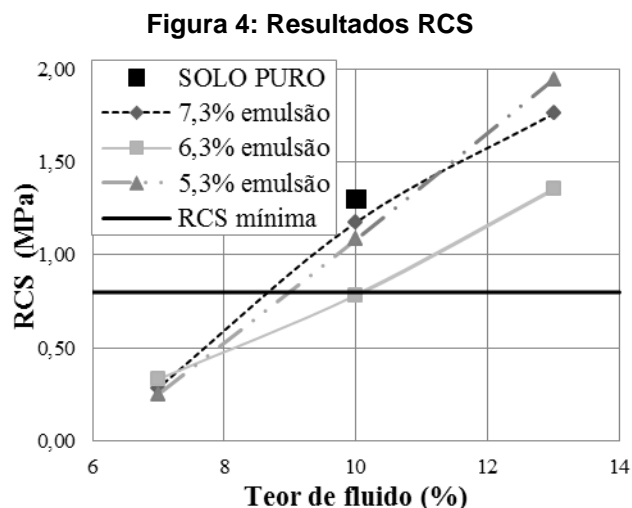


Analisando a Figura 3, é visto que sempre há uma perda após a imersão. Com 7% de fluido, nenhum CP suportou a imersão, assim como os CP de solo puro. Para teores de emulsão de 7,3 e 6,3%, novamente o comportamento é uma parábola com pico no teor de fluido de 10%, já para o teor de emulsão de 5,3%, o maior valor é obtido com 13% de fluido. A alta RRT refere-se a valores muito próximos de RT com e sem imersão, não necessariamente a valores elevados.

Sant'Ana (2009) arbitra valor mínimo de RRT de 60%. Conforme já havia ocorrido nos resultados de RT, para 7% de fluido o limite não é atendido e é atendido plenamente para 10%. No teor de 13% de fluido, o único teor de emulsão que não ultrapassa o mínimo é o de 7,3%. Este teor, contrariando o que era esperado, foi o mais sensível à saturação.

Para o ensaio de RCS, os CP possuíam 10,0 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura. Para a compactação, buscou-se a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação do solo puro com energia modificada. Visto que o CP possuía maiores dimensões, o período de imersão passou a ser de duas horas. O ensaio foi adaptado da norma DNER-ME 201/94. A Figura 4 apresenta a RCS média para cada teor. Na Figura 5 são expostas as resistências retidas à compressão simples (RRCS).

Ensaio com o solo puro resultaram em RCS superior ao encontrado com solo-emulsão com 10% de fluido. Este comportamento pode ser decorrente do filme de betume que se forma sobre os grãos, diminuindo o atrito entre eles e reduzindo a resistência ao cisalhamento do material. Aumentando o teor de fluido melhora-se a mistura, distribuindo-se melhor o filme de betume sobre os grãos. Neste contexto, nota-se que para todos os teores de emulsão, à medida que se aumenta o teor de fluido a RCS cresce. Admitindo, como propôs Sant'Ana (2009), RCS mínima de 0,80 MPa, para 7% de fluido nenhum CP atinge este patamar e para 10 e 13% os valores são iguais ou superiores a este.

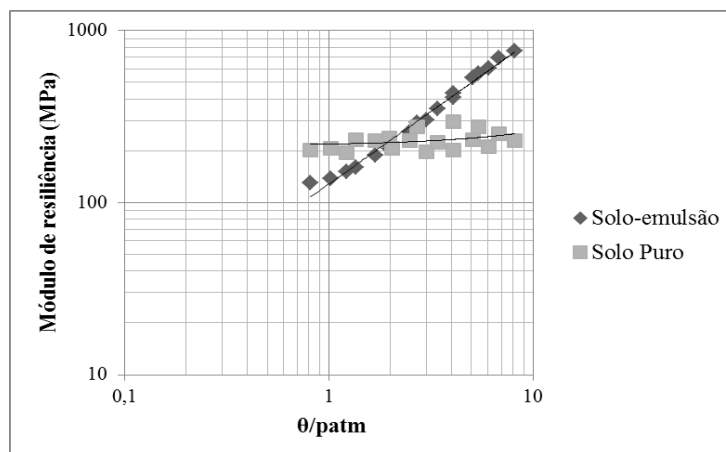


Observa-se neste ensaio que a perda de resistência pela imersão é mais severa. Assim como os CP de solo puro, todos CP com 7 e 10% de fluido desintegraram-se durante a imersão. Para 13%, todos suportaram esta condição e o valor mínimo de RRCS 15%, citado por Sant'Ana (2009), é ultrapassado. Assim como no ensaio de RT, o teor de emulsão que gerou a maior resistência no ensaio seco é o mesmo que obtém a menor resistência retida.

Para a escolha dos teores de projeto, primeiramente deve-se satisfazer a resistência retida mínima para ambos os ensaios e posteriormente os valores mínimos nos ensaios secos. Sendo assim, o teor de projeto foi 6,3% de emulsão e 13% de fluido (10,2% de água de dispersão).

No ensaio de MR o CP possuía 10,0 cm de diâmetro e 20,0 cm de altura e foi moldado com energia modificada. O ensaio seguiu a norma DNIT-ME 134/2010. Para descrever o comportamento do MR foi utilizado o modelo $k-\theta$, resultando em $MR=128,26.(\theta/patm)^{0,843}$. Através da Figura 6, nota-se que ao adicionar a emulsão o MR do solo passa a ser mais dependente do estado de tensões. Além disso, o solo-emulsão é mais rígido que o solo puro a partir de tensões confinantes e desvio superiores a 50 kPa.

Figura 6: Comparativo dos MR



Para o ensaio de WTAT, moldou-se uma amostra de 30,0 cm de diâmetro em duas camadas de 2,0 cm de espessura, sendo aplicados 88 golpes por camada com o soquete Marshall, como proposto na literatura consultada. A amostra foi submetida ao desgaste pela superfície emborrachada do equipamento durante 5 minutos com uma velocidade de 110 rpm.

O resultado consiste na perda de massa por abrasão. Após o ensaio na condição seca, o mesmo CP foi ensaiado com uma lâmina d'água de 1 cm. Neste caso, a massa final foi verificada após 15 dias de cura ao ar, para evaporação da água. A Tabela 2 apresenta a perda de massa por abrasão (PM) para ambas as condições de ensaio. Também são apresentados os resultados do ensaio de solo puro compactado na umidade ótima.

Tabela 2: Caracterização do solo

	Sem lâmina d'água	Com lâmina d'água
	PM (%)	PM (%)
Solo-emulsão	0,05	1,06
Solo puro	0,27	4,28

Observando os resultados de solo puro para ambas as condições, a perda de massa foi superior àquela obtida com o solo estabilizado. Portanto, estes resultados indicam que a estabilização de solo por emulsão garante maior resistência ao desgaste, possibilitando o emprego desta mistura como camada final de pavimento de vias de baixo volume de tráfego.

Verificação computacional

Além dos ensaios laboratoriais, para verificar a viabilidade técnica do uso do solo-emulsão foram realizadas análises mecânicas, a fim de avaliar as tensões de tração e deformações de extensão geradas na base do revestimento e as tensões de compressão geradas no topo do subleito. Tais solicitações são críticas, tendo em vista o desempenho do pavimento em relação à ruptura brusca do revestimento, ao trincamento por fadiga e à ruptura por cisalhamento do subleito. Três estruturas distintas foram estudadas, as quais são apresentadas na Tabela 3. Empregou-se o solo-emulsão como camada de revestimento, base ou sub-base.

A tensão vertical máxima admissível no topo do subleito foi verificada utilizando a equação 3 (MEDINA; MOTTA, 2005):

$$\sigma_{v \text{ adm}} = \frac{0,006 \text{ MR}}{1+0,7 \log N} \quad (3)$$

Onde:

$\sigma_{v \text{ adm}}$ – tensão vertical de compressão admissível no topo do subleito (MPa);

MR – módulo de resiliência (MPa);

N – número de passagens de eixo padrão de projeto.

Tabela 3: Estruturas

	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3
	N = 1.10 ⁵	N = 1.10 ⁶	N = 1.10 ⁷
Revestimento	Solo-emulsão	Concreto asfáltico	Concreto asfáltico
Espessura	12,5 cm	4,0 cm / 4,0 cm	4,0 cm / 4,0 cm
MR	128,26.(θ /patm) ^{0,843}	3.000 MPa / 2.500 MPa	3.000 MPa / 2.500 MPa
Coef. Poisson (v)	0,45	0,30	0,30
Base		Solo-emulsão	Brita graduada- basalto
Espessura		15,0 cm	15,0 cm
MR		128,26.(θ /patm) ^{0,843}	159,82.(θ /patm) ^{0,54}
Coef. Poisson (v)		0,45	0,35
Sub-base			Solo-emulsão
Espessura			15,0 cm
MR			128,26.(θ /patm) ^{0,843}
Coef. Poisson (v)			0,45
Subleito	Solo		
MR	211,37.(θ /patm) ^{0,076}		
Coef. Poisson (v)	0,45		

A deformação de tração máxima na base do revestimento foi avaliada adotando a equação 4, proposta por Pinto (1991). Tal modelo foi obtido para misturas betuminosas a 25°C com diferentes cimentos asfálticos:

$$N_L = 1,21 \cdot 10^{-8} \left(\frac{1}{\varepsilon_{h \text{ adm}}} \right)^{2,66} \quad (4)$$

Onde:

N_L – número de passagens do eixo padrão de laboratório – empregou-se fator laboratório-campo de 10⁵;

$\varepsilon_{h \text{ adm}}$ – deformação horizontal de tração admissível na base do revestimento (MPa).

Na Tabela 4 são apresentados os resultantes obtidos pelo programa juntamente com as tensões e deformações máximas admitidas. Como o modelo de fadiga é para concreto asfáltico, não se avaliou deformação admissível na estrutura 1. Também não foram apresentadas tensões de tração

admissíveis na base do revestimento, uma vez que esta propriedade é referente ao material, que neste caso não foi especificado.

Tabela 4: Tensões e deformações

	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3
ε_h na base do revestimento (μstrain)	531,87	301,10	334,92
$\varepsilon_{h \text{ adm}}$ na base do revestimento (μstrain)	-	444,29	186,94
σ_h na base do revestimento (MPa)	0,066	1,073	1,228
σ_v no topo do subleito (MPa)	0,305	0,125	0,000
$\sigma_{v \text{ adm}}$ no topo do subleito (MPa)	0,319	0,255	0,190

Uma vez que a tensão vertical admissível na estrutura 1 é superior à existente, não haveria ruptura por cisalhamento e, possivelmente, as deformações permanentes não seriam significativas. O mesmo ocorre para a estrutura 2, a qual também não romperia por fadiga, já que a deformação é inferior à admissível. Para um adequado desempenho, é necessário avaliar se a mistura asfáltica empregada possui tensão de tração superior à encontrada.

Apesar da estrutura 3 não romper por cisalhamento, romperia por fadiga. Caso o número de passagens do eixo padrão fosse reduzido para 1.10^6 tal fato não ocorreria. Como já havia sido citado, para baixas tensões o MR do solo puro é superior ao MR do solo-emulsão. Isto acontece na estrutura 3, como o solo-emulsão está mais afastado da superfície, as tensões são reduzidas e o MR é inferior ao do solo natural. Por estes motivos, não haveria benefícios em se empregar o solo-emulsão como sub-base.

CONCLUSÕES

Pelos ensaios de laboratório, é evidenciado que a estabilização asfáltica proporciona aumento de resistência ao solo e propriedade de impermeabilidade. Adicionalmente, obtém-se maior resistência ao desgaste tanto em condição seca quanto com lâmina d'água. Entretanto, é necessário avaliação mecânica da estrutura, uma vez que, dependendo da posição da camada executada com este material na estrutura do pavimento, pode ser verificado comportamento resiliente incompatível com os demais materiais.

AGRADECIMENTOS

À Capes, Petrobrás, Greca Asfaltos, PPGEC/UFRGS, LAPAV e ao Engenheiro Daniel Martell.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras De Asfaltos. (2001) Manual Básico de emulsões asfálticas: soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro.
- Asphalt Academy. (2009) Technical Guideline: bitumen stabilised materials. 2nd ed. Pretoria.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2008) Pavimentação asfáltica:

formação básica para engenheiros. 1. ed. (3. reimp.). Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda.

Mattos, A. B. G. (1991) Estabilização de solo com betume. In: REUNIÃO ABERTA ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo. Anais... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação.

Medina, J.; Motta, L. M. G. (2005) Mecânica dos Pavimentos. 2. ed. Rio de Janeiro:[s. n.].

Pinto, S. (1991) Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutura de pavimentos. 489 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Sant'Ana, W. C. (2009) Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão. 342 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo.