

# **COMPORTAMENTO RESILIENTE DE SOLOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO ESTABILIZADOS COM EMULSÃO ASFÁLTICA**

**Giuseppe Miceli Junior**

11º Batalhão de Engenharia de Construção

**José Renato Moreira da Silva de Oliveira**

**Álvaro Vieira**

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes  
Instituto Militar de Engenharia

**Laura Maria Goretti da Motta**

Programa de Engenharia Civil - COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de solos do Estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica, não se restringindo aos ensaios usuais de determinação de resistência, mas utilizando-se também de ensaios mais modernos e recentes, como o módulo de resiliência. O estudo em laboratório é complementado ainda com análises feitas em microscópio eletrônico de varredura (MEV). Foi verificado que o acréscimo de emulsão age diferente para solos granulares e finos, modificando significativamente o comportamento mecânico das duas categorias de solos, especialmente melhorando o solo granular analisado, tornando viável a utilização deste tipo de solo melhorado à luz da Mecânica dos Pavimentos.

## **ABSTRACT**

The aim of this study is to analyze the behavior of three Rio de Janeiro soils when stabilized with asphalt emulsion using not only the usual tests, but also some recent and modern ones, like the resilient modulus test. This study is also complemented with electronic microscope photos. Emulsion addition modifies the structure and the mechanical behavior of granular and fine soils in different ways, the granular soils tend to have a better improvement in mechanical issues than the fine soils, considering the Pavement Mechanics point of view.

## **1. INTRODUÇÃO**

Dá-se o nome de estabilização betuminosa aos métodos de construção onde um material betuminoso (no caso, a emulsão asfáltica de petróleo) é adicionado a um solo, ou mistura de solos, visando a melhoria das características desse solo, e a melhoria das características rodoviárias, quer para a construção de base, quer para a construção de revestimento.

No Brasil, segundo Santana (1978), a primeira menção ao uso de estabilização betuminosa ocorreu no ano de 1959, na construção de um segmento de 8 quilômetros da BR-135/MA, com o nome de “tratamento contra pó”. Em 1966, foi feita uma inspeção da rodovia e este trecho se apresentou “em ótimo estado”.

Experiências continuaram a ser realizadas no Brasil inteiro isoladamente. Thuller (2005) que na RJ-176, foi utilizada, por volta de 1979, uma base com solo-betume em um trecho de 9 km. Essa base inicialmente ficou sem revestimento por cerca de 6 meses por motivos não técnicos e se comportou bem, e a seguir foi revestida com tratamento superficial.

A partir daí, tentou-se pesquisar uma metodologia para revestimento de rodovias com baixo volume de tráfego. A idéia de se estudar a estabilização com emulsão asfáltica surgiu da necessidade de investigar materiais e técnicas de construção alternativas que permitam a aplicação de solos locais em obras de engenharia, como a utilização de solos lateríticos na construção de rodovias, e a reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD) em

camadas que não necessitam uma maior capacidade de suporte.

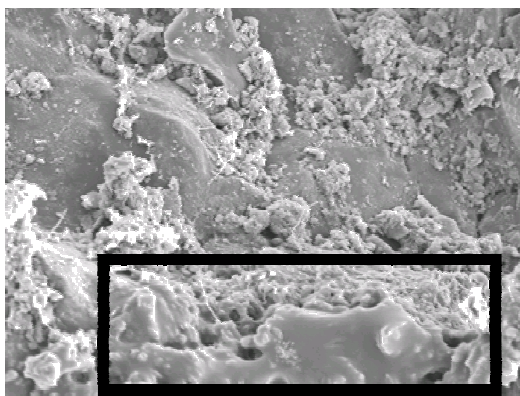
Entretanto, a quantidade de pesquisas sobre o tema no país é pequena e o volume de obras executadas com essa técnica é quase nulo em relação a outras técnicas. Dentro desta linha de pensamento, não se pode ficar restrito a fazer o que já se conhece, mas é preciso pesquisar novos materiais de construção e novas soluções, aprender novas e algumas vezes ousar se isto significar economia, conscientes de que é possível obter sucessos, mesmo com eventuais insucessos durante o aprendizado.

## **2. ESTABILIZAÇÃO BETUMINOSA**

A estabilização com solo-betume ocorre quando a um solo qualquer é acrescentado um ligante asfáltico, conferindo à mistura resultante uma melhora em seu comportamento mecânico e um efeito impermeabilizante, tornando-a mais resistente tanto a esforços de tráfego quanto a efeitos de variação de umidade.

O solo-emulsão, ou seja, quando o ligante é uma emulsão asfáltica, pode ser considerado como um sistema termodinâmico solo-emulsão-água, que é fechado, heterogêneo, constituído por três fases, sendo duas descontínuas (o CAP e o solo) e uma contínua (Mattos et al. 1991).

Ao se misturar completamente esse sistema, certas reações físico-químicas têm início. O objetivo da estabilização é envolver os grãos de solo com um filme betuminoso, não tão fino a ponto de vencer o atrito intergranular existente, mas espesso o suficiente para promover o efeito adesivo entre os grãos (Kézdi, 1979; Mattos et al. 1991). Miceli Junior (2006) mostra, no destaque da Figura 1, a presença de um filme betuminoso comprovada através de concentrações altas do elemento carbono em análises de difratografia por raios-X.



**Figura 1:** Fotografia em MEV, com ampliação de 500X, com destaque em preto de filme betuminoso encontrado (Miceli Junior, 2006).

Forma-se assim, através de interações físico-químicas, o sistema solo-emulsão-água, através de mecanismos de adsorção superficial. O resultado é a formação de uma estrutura de grãos de solo com grumos formados por ligante espalhados pela massa de solo, funcionando como rótulas e eliminando os contatos grão-grão, o que irá diminuir a resistência do conjunto aos esforços cisalhantes. (Kézdi, 1979).

Kézdi (1979) afirma que deve existir um ponto ótimo entre as fases ar-água-solo-betume onde a mistura é feita com uma quantidade ótima que proporcione um máximo de resistência ao

cisalhamento. Confirmou-se a presença de um teor de emulsão onde esta resistência é máxima, variando de solo para solo. Acima deste teor, o filme de emulsão que envolve os grãos se torna espesso demais, diminuindo o atrito intergranular.

Diversos solos brasileiros estabilizados com emulsão asfáltica já foram ensaiados em laboratório, utilizando-se como comparação ensaios de dosagem como o CBR e a resistência à compressão simples, como em Lucena *et al.*(1982) e em Jacintho (2005). Em geral, confirmou-se que solos arenosos são estabilizáveis com baixos teores, e solos argilosos necessitam de teores mais altos para serem estabilizados satisfatoriamente.

A principal função do ligante asfáltico é conferir coesão e impermeabilidade aos solos. Em solos granulares, há um aumento da coesão, enquanto nos solos plásticos é visto um aumento da impermeabilização, graças ao efeito do asfalto na proteção das partículas de argila. Teores mais baixos de emulsão levam a um aumento substancial da resistência do solo. Em geral, existe uma resistência máxima obtida com um teor ótimo de emulsão, sendo que maiores valores tendem a prejudicá-la. Para solos arenosos, esse teor é baixo, enquanto para solos coesivos, esse teor é maior, o que serve para justificar em parte a teoria de que a estabilização de solos argilosos e silto-argilosos é antieconômica (Lucena *et al.* 1982).

A bibliografia diverge quanto à percentagem máxima passante na #200 que o solo deve ter para se obter uma estabilização satisfatória: 25%, 35% ou até 50%. Há casos em que existe até uma quantidade mínima de finos que o solo deva possuir: 5% ou até 10%. A razão pela qual este mínimo é recomendado é porque o filler tem a função de aumentar a viscosidade das películas de ligante e dar uma coesão residual mínima à matriz de solo. Em relação à plasticidade do solo, ele deve ser pouco plástico, com IP máximo sugerido de 12% ou de 18% (Vogt, 1971; Kezdi, 1979).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Emulsões utilizadas neste trabalho**

Optou-se por trabalhar com dois tipos de emulsões fornecidas pelo CENPES/PETROBRAS: uma emulsão de ruptura lenta (RL-1C) e uma emulsão de ruptura média (RM-1C). Buscou-se assim testar a diferença entre a ação de dois tipos de emulsões disponíveis no mercado.

#### **3.2. Solos utilizados neste trabalho**

Buscou-se escolher solos do interior do Estado do Rio de Janeiro, em função da proximidade das jazidas com a cidade onde se localiza o IME, e pela importância do uso das estradas vicinais do Estado para o escoamento da produção agrícola. Os solos apresentaram a caracterização granulométrica apresentada na Tabela 1. Apenas o Solo A obedece aos requisitos dos solos estabilizáveis com emulsão asfáltica, enquanto os solos B e C obedecem poucos destes requisitos, pela suas plasticidades e granulometrias.

O Solo A é classificado como A-2-4 na classificação TRB, sendo sua classificação MCT, NA'. O Solo B é classificado como A-7-5 e o Solo C, como A-7-6. Pela classificação TRB, seu desempenho é ruim em pavimentação; todavia, são solos de comportamento laterítico: são LG' na classificação MCT e por isso são aproveitados em pavimentação, dentro de metodologia descrita em Nogami e Villibor (1995). Os solos descritos são classificados como SM segundo o sistema unificado de classificação de solos (SUCS), embora sejam solos diferentes entre si.

**Tabela 1:** Caracterização granulométrica dos solos deste estudo

Solo	Percentagem passante				Classificação			Índices		
	#4	#10	#40	#200	TRB	SUCS	MCT	LL	IP	IG
A	98	95	81	30	A-2-4	SM	NA'	NP	NP	0
B	100	97	64	41	A-7-5	SM	LG'	52	15	3
C	97	91	62	41	A-7-6	SM	LG'	43	19	4

### 3.3. Ensaio de caracterização química dos solos deste trabalho

Em geral, os solos são classificados como ácidos, pois os pH foram em todos os casos menores que 7. Também nos solos A e B foi encontrada uma quantidade de matéria orgânica menor que 0,4, enquanto no solo C esse valor foi bem próximo de 1, valores que podem ser considerados baixos, como pode ser visto na Tabela 2.

O solo A sofreu menos o ataque sulfúrico que os outros solos, de acordo com a Tabela 3, apresentando um resíduo de 76,4%. Este caso também é visto nas percentagens de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{K}_2\text{O}$  encontradas: os Solos B e C apresentaram uma percentagem desses compostos maior que o Solo A.

O coeficiente  $K_i$  do Solo A apresentou valor de 2,12 e do Solo B apresentou 1,35, o que indica que este sofreu mais intemperismo que aquele. Por sua vez, o coeficiente  $K_r$ , também foi maior para o Solo A que para o Solo B, mas seu valor encontrado foi menor que 2. O Solo C, pelos seus valores de  $K_i$  e  $K_r$ , foi o menos intemperizado.  $K_i$  e  $K_r$  são coeficientes importantes que mostram a evolução do solo. Quando esses coeficientes são menores que 2, indicam um grau alto de intemperização.

**Tabela 2:** Caracterização química dos solos

AMOSTRA	pH		M.O.
	H <sub>2</sub> O	KCl	
SOLO A	4,87	4,06	0,17
SOLO B	5,41	4,48	0,37
SOLO C	5,15	4,45	0,94

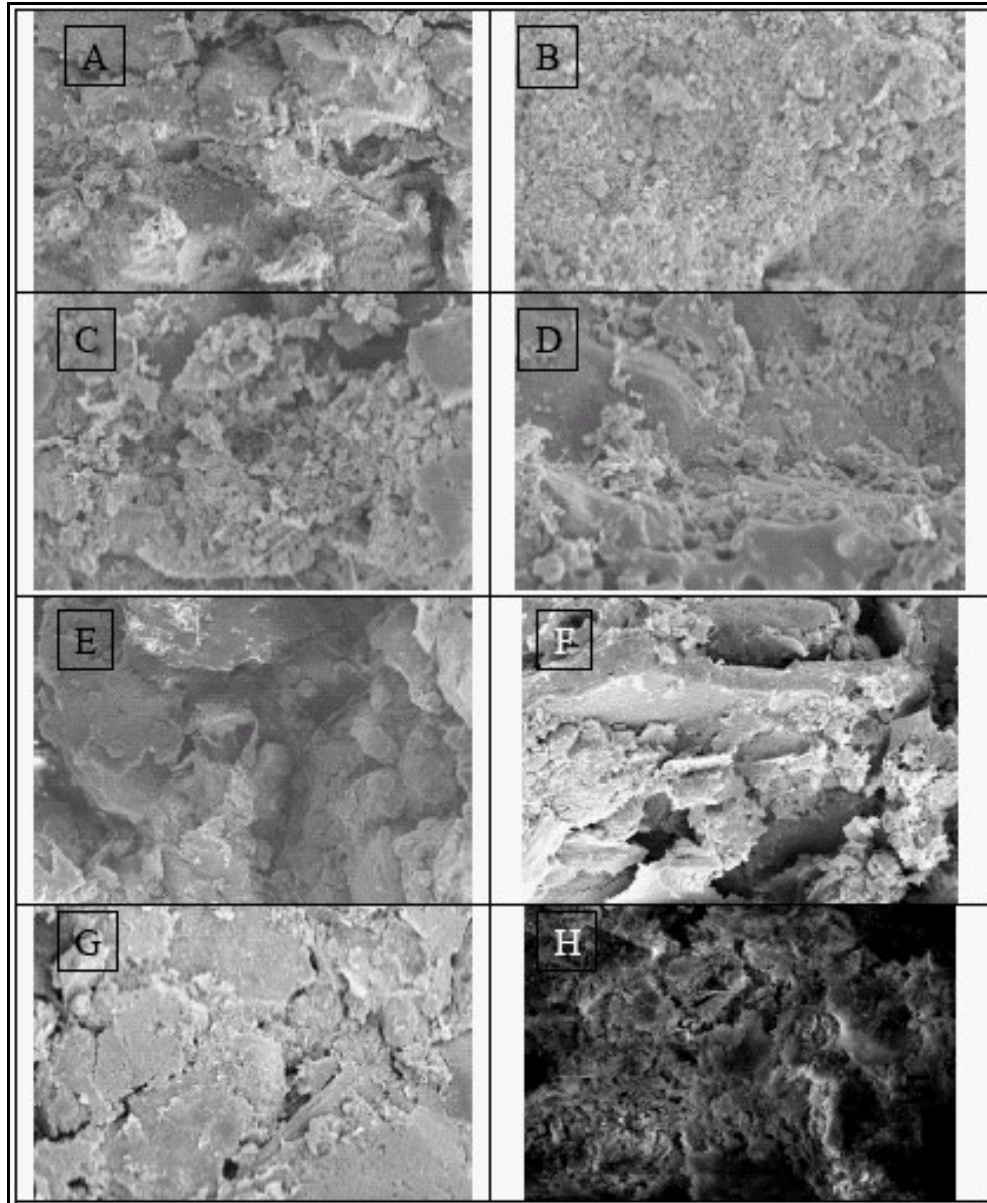
**Tabela 3:** Caracterização química dos solos – Ataque sulfúrico

AMOSTRA	ATAQUE SULFÚRICO							
	$\text{SiO}_2$ %	$\text{Al}_2\text{O}_3$ %	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ %	$\text{K}_2\text{O}$ %	$\text{TiO}_2$ %	Resíduo %	$K_i$	$K_r$
SOLO A	8,26	6,62	3,02	0,25	0,1	76,4	2,12	1,64
SOLO B	15,69	19,7	5,78	0,22	0,54	45,3	1,35	1,14
SOLO C	16,04	12,1	5,41	0,55	0,64	54,3	2,25	1,75

### 3.4. Ensaio de caracterização microestrutural dos solos deste trabalho

A caracterização microestrutural foi realizada utilizando a análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As análises microestruturais foram realizadas sobre amostras extraídas de corpos-de-prova, puras e com 2, 4 e 8 % de emulsão, com ampliações de 500X.

Fotografias de microscopia eletrônica de varredura mostram uma mudança na microestrutura interna do solo, com ênfase principalmente em uma “floculação” das partículas finas do solo observada nos corpos-de-prova estabilizados com emulsão. Esta maior agregação da microestrutura em parte justifica a melhoria das características do solo em geral.



**Figura 2:**(a) Solo A puro; (b) Solo A + 2% RL; (c) Solo A + 4 % RL; (d) Solo A + 8% RL; (e) Solo B puro; (f) Solo B + 2 % RL; (g) Solo B + 4 % RL; (h) Solo B +8% RL.

A análise auxiliar das amostras através do detector EDX (difratografia por raio-X) pôde identificar alguns minerais presentes nos Solos A e B. A Tabela 4 mostra a intensidade da presença destes minerais no solo, onde o solo A apresentou uma maior presença de quartzo, o que comprova sua natureza granular, enquanto o Solo B apresenta uma presença maior do argilomineral gipsita.

**Tabela 4:** Minerais presentes nos solos – Levantamento por meio do detector EDX

AMOSTRA	MINERAIS PRESENTES			
	Gipsita	Goetita	Quartzo	Ilita
	%	%	%	%
SOLO A	+	+	++	-
SOLO B	++	+	+	-

OBS: + - O mineral está presente no solo; ++ - O mineral tem uma presença maior no solo;  
- - O mineral não está presente no solo.

#### 4. ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

##### 4.1. Ensaio triaxial de solos

Os procedimentos para a realização do ensaio triaxial de carregamento repetido na determinação do módulo de resiliência em amostras de solos são descritos pelo método DNER ME 131/94 e buscam reproduzir em laboratório as condições de carregamento impostas aos materiais pelas cargas de tráfego. A sequência de ensaio é descrita em Medina e Motta (2005).

Para cada solo o módulo de resiliência poderá ser expresso como uma função do estado de tensão aplicado durante o ensaio por modelos matemáticos com constantes experimentais. Os principais modelos deste tipo de função são os apresentados em (1) e (2), respectivamente chamados de modelos granular e areno-argiloso.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (1)$$

$$MR = k_1 \sigma_d^{k_3} \quad (2)$$

Onde: MR = Módulo de resiliência [MPa];

$\sigma_3$  = Tensão confinante [MPa];

$\sigma_d$  = Tensão desvio [MPa];

$k_1, k_2, k_3$  = Coeficientes e expoentes obtidos através de regressão.

Macêdo (1996) utilizou o modelo definido por Pezo em 1991 e mostrado em (3) conseguindo coeficientes de determinação bem maiores, sendo o chamado modelo composto, em função tanto da tensão confinante como da tensão desvio:

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (3)$$

Onde: MR = Módulo de resiliência [MPa];

$\sigma_3$  = Tensão confinante [MPa];

$\sigma_d$  = Tensão desvio [MPa];

$k_1, k_2, k_3$  = Coeficientes e expoentes obtidos através de regressão.

Os ensaios foram realizados com cura ao ar livre por 7 dias, para se verificar sua influência no ganho de módulo do solo-emulsão. Os parâmetros para o modelo composto dos ensaios de módulo realizados, bem como os modelos granular, apresentado em (1) e areno-argiloso apresentado em (2) estão na Tabela 5.

De modo geral, o modelo composto apresentou uma melhor representatividade dos resultados do ensaio, principalmente dos solos estabilizados, com um  $R^2$  mínimo encontrado de 0,95. Com respeito aos outros modelos, o solo A foi mais bem representado pelo modelo em função da tensão confinante, enquanto os solos plásticos, pelo modelo em função da tensão desvio.

**Tabela 5** : Módulo de resiliência dos solos A,B e C, puros e estabilizados.

Solo	Hmold (%)	Hrup (%)	Teor	Tipo	Modelo Composto (3)			Modelo granular (1)			Modelo areno-argiloso (2)		
					k1	k2	k3	k1	k2	R2	k1	k3	R2
A	11,5	3,8	SOLO PURO		354	0,35	-0,23	312	0,12	0,26	222	0,01	0,01
B	19				112	0,12	-0,65	107	-0,39	0,27	95	-0,57	0,70
C	15,0				85	0,11	-0,61	60	-0,50	0,52	75	-0,53	0,91
A	11,5	5,3	SOLO PURO		387	0,17	-0,27	412	-0,01	0,01	307	-0,16	0,29
B	19,0				371	0,05	-0,14	199	-0,24	0,92	284	-0,15	0,44
C	15,0				1007	0,29	0,00	754	0,19	0,36	510	0,06	0,06
A	11,0	4,7	2%	RL	628	0,20	-0,23	553	-0,02	0,01	477	-0,09	0,31
B	20,1	15,6			880	0,25	-0,14	748	0,08	0,23	609	0,01	0,01
C	15,9	8,3			765	0,35	-0,36	621	-0,01	0,01	477	-0,12	0,17
A	10,7	4,3	4%	RL	668	0,20	-0,17	613	0,04	0,06	512	-0,03	0,06
B	19,9	16,1			624	0,05	-0,04	616	0,01	0,01	589	0,01	0,01
C	15,1	8,6			821	0,51	-0,12	776	0,40	0,76	415	0,22	0,36
A	11,0	4,1	6%	RL	583	0,05	-0,07	566	0,05	0,01	546	-0,03	0,10
B	19,3	17,7			700	0,16	-0,13	652	0,03	0,6	561	-0,02	0,05
C	15,3	8,7			727	0,17	-0,24	670	-0,05	0,04	565	-0,14	0,53
A	11,6	4,3	8%	RL	717	0,20	-0,18	648	0,02	0,01	549	-0,05	0,13
B	19,5	16,7			503	0,03	-0,17	461	0,13	0,39	484	-0,01	0,71
C	15,5	10,9			519	0,13	-0,31	495	-0,12	0,12	443	-0,21	0,44
A	11,0	4,7	2%	RM	827	0,39	-0,24	723	0,15	0,30	490	0,02	0,01
B	20,1	15,6			476	0,08	-0,22	424	0,13	0,31	430	-0,16	0,69
A	10,7	4,3	4%	RM	788	0,20	-0,03	565	0,05	0,03	497	0,01	0,01
B	19,9	16,1			580	0,06	-0,13	540	0,08	0,25	541	-0,10	0,58
A	11,0	4,1	6%	RM	692	0,09	-0,08	672	0,03	0,02	614	-0,01	0,01
B	19,3	17,7			889	0,20	-0,1	853	0,10	0,39	686	0,04	0,07
A	11,6	4,3	8%	RM	704	0,15	-0,13	662	0,02	0,02	584	-0,03	0,08
B	19,5	16,7			1293	0,16	0,02	1332	0,13	0,39	1045	0,13	0,59

Onde: H<sub>mold</sub> - umidade de moldagem; H<sub>rup</sub> - umidade de ruptura após a cura; k<sub>1</sub>,k<sub>2</sub>,k<sub>3</sub> – coeficientes dos modelos conforme (1), (2) e (3); R<sup>2</sup> – coeficiente de determinação.

As umidades residuais com 7 dias de cura foram diretamente proporcionais à quantidade de emulsão acrescentada à mistura, graças à adição do CAP à matriz de solo. Com isto, solos estabilizados com emulsão tendem a ser mais resistentes ao ataque da água que as amostras não estabilizadas (Vogt, 1971; Kezdi, 1979).

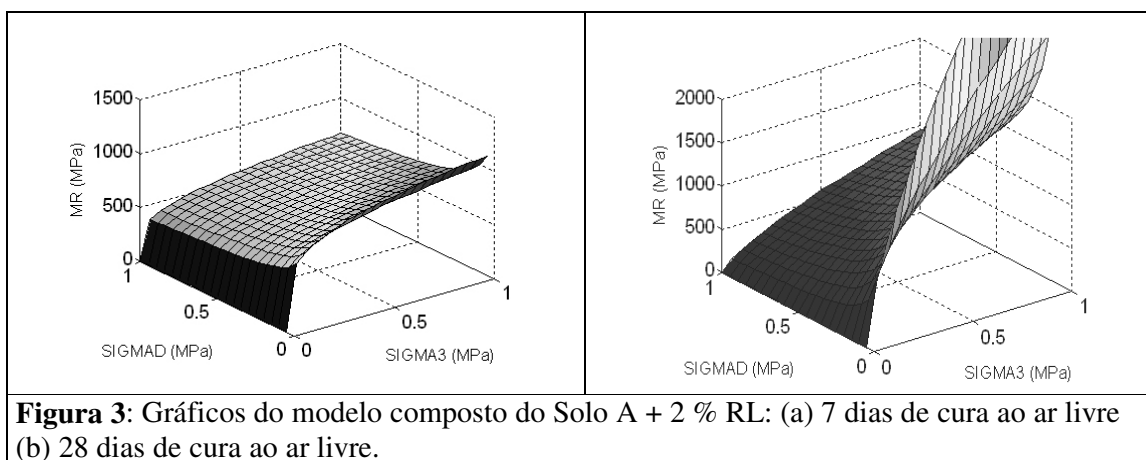
Uma das vantagens observadas é que o módulo tornou-se menos dependente do estado de tensões do solo, o que é visto com a diminuição do valor modular de k<sub>2</sub> e k<sub>3</sub>. O valor do módulo também aumentou com o acréscimo de emulsão ao solo, parcialmente percebido pelo aumento do valor de k<sub>1</sub>, o que se deve principalmente à ação aglutinadora do estabilizante.

Todavia, deve-se atentar que a perda da umidade tem alguma influência no ganho de módulo de resiliência das amostras, dentro de 7 dias de cura. Miceli Junior (2006), em ensaios de resistência à compressão simples, mostrou que houve um prejuízo no ganho da resistência com o acréscimo de emulsão, em comparação com amostras não estabilizadas sendo percebido com mais atenção nos solos plásticos analisados.

Foi visto que as misturas com emulsão RM-1C apresentaram um ganho maior inicial

de resistência que as misturas com RL-1C, o que é devido a maior velocidade de ruptura da RM em comparação com a RL.

Foram realizados também ensaios com 28 dias de cura ao ar livre para todos os corpos-de-prova, para simular a exposição do solo estabilizado a tempos maiores de cura. Entretanto, a maioria dos valores encontrados nos ensaios de  $k_2$  e  $k_3$  mostra-se maior que os valores de solo puro. O efeito pode ser visto na Figura 3, onde pelo gráfico do modelo composto do Solo A 2% RL é visto o efeito dos expoentes no modelo composto, o que faz que o módulo dependa completamente do estado de tensões. Acredita-se que a perda de umidade tenha chegado a um nível crítico, de tal modo que ela venha a prejudicar o MR do corpo-de-prova. Assim, 7 dias parece ser o tempo ideal de cura para misturas solo-emulsão.



Miceli Junior (2006) também realizou ensaios com cura em câmara úmida, com os corpos-de-prova sendo envolvidos em filme de PVC. Foi observado que a cura prejudica o comportamento resiliente da mistura. Além dos resultados terem sido piores que para o solo puro, foi observada uma deformação permanente maior na fase de condicionamento do ensaio que no ensaio com o solo puro ou o solo estabilizado com cura seca. Houve pontos isolados do ensaio do solo B onde o módulo medido foi de menos de 50 MPa.

A deformação permanente foi vista de forma clara, principalmente na fase de condicionamento do corpo-de-prova, chegando até a 5 mm com o Solo B. A deformação permanente em pavimentação tem relação direta com os afundamentos plásticos e de trilha de roda, e constitui um dos principais defeitos que podem aparecer (Medina e Motta, 2005).

#### 4.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

O módulo de resiliência de misturas asfálticas medido sob carga repetida é realizado em compressão diametral com frisos de carga, com o mesmo tipo de pulso usado nos módulos de solos compactados e normatizado pela norma DNER ME 133/94.

A importância desse ensaio é que ele pode ser utilizado no cálculo de tensões e deformações nos pavimentos, e em consequência, em seu dimensionamento mecânico. No caso específico de solos estabilizados com emulsão, ele é aplicado nos trechos onde existe apenas um revestimento primário de solo-emulsão, tal como melhoramentos de revestimento primário em vias de baixo volume de tráfego.

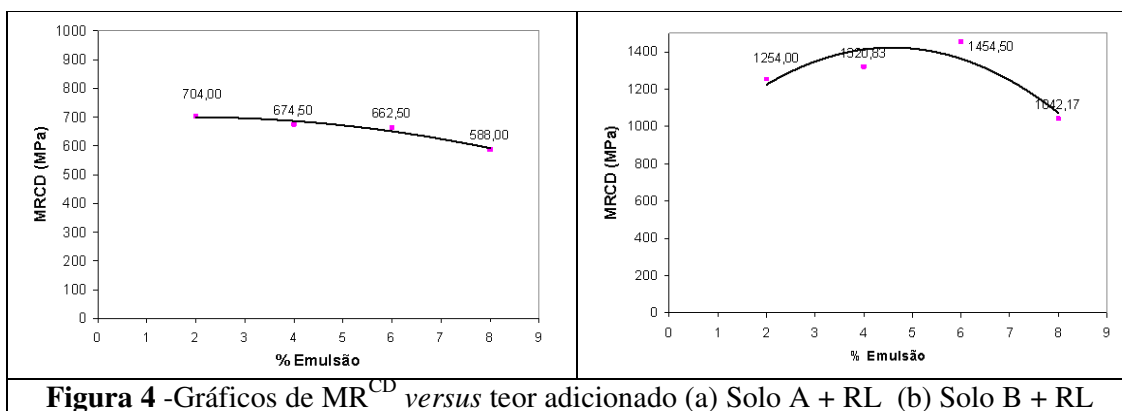
Com relação ao modo de execução, no módulo de resiliência na compressão diametral



( $MR_{CD}$ ) das amostras estabilizadas foram executadas seis medições, com três medições em uma direção, e outras três em outra direção perpendicular à primeira, com o objetivo de se verificar a uniformidade do módulo por toda a amostra.

Como apresentado na Figura 4(a), verifica-se que o Solo A apresentou um  $MR_{CD}$  de 704 MPa com 2% RL-1C, da mesma ordem de grandeza que o módulo obtido anteriormente na compressão triaxial.. O resultado da seqüência de ensaios  $MR_{CD}$  para o Solo B com 2, 4, 6 e 8% RL-1C, com 7 dias de cura seca, é apresentado na Figura 4 (b). O Solo B apresentou um  $MR_{CD}$  de 1320 MPa com 4 % RL-1C, maior que o módulo obtido com o mesmo teor.

Entretanto, não foi encontrada diferença estatística entre os teores para os dois solos, com  $\alpha=0,05$ , o que não justifica que um aumento da adição de emulsão provoque um aumento do desempenho da mistura estabilizada.

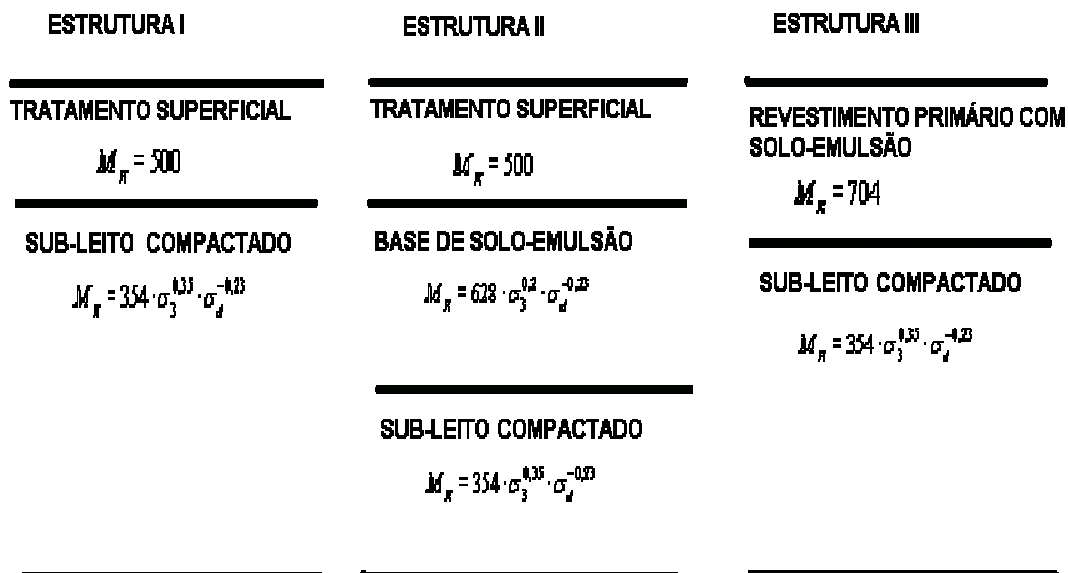


## 5. EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO

A título ilustrativo de um possível dimensionamento mecânico com os dados de módulo obtidos neste estudo para baixo volume de tráfego, são apresentadas a seguir três estruturas típicas com camadas estabilizadas de solo-emulsão como parte do pavimento, como mostrado na Figura 5.

A estrutura chamada aqui de Estrutura I mostra apenas o subleito com um tratamento superficial, e representa a alternativa do local onde o Solo A deste estudo fosse escarificado e recompactado formando então uma base para a aplicação do tratamento superficial. A Estrutura II tem o solo-emulsão agindo como uma camada de base, com um tratamento superficial, típico de rodovias de baixo volume de tráfego, enquanto na Estrutura III o solo-emulsão age como revestimento primário, sem qualquer outro revestimento asfáltico.

Para efeito de alternativa de dimensionamento, são adotadas três espessuras diferentes de camada de solo-emulsão para as estruturas II e III: 5, 10 e 15 centímetros, e para cada uma das três espessuras serão calculados a deflexão sob a roda e a tensão vertical no subleito com a ajuda do programa FEPAVE2.



**Figura 5:** Esquema dos tipos de estrutura a serem analisados

Em todos os casos, os dados de entrada dos módulos de resiliência foram os modelos compostos do solo A com cura seca de 7 dias, e também no caso em que o solo-emulsão tiver uma função de base de pavimentos como na Estrutura II; e o módulo de resiliência na compressão diametral, para a situação do solo-emulsão ser usado como um revestimento primário e para o caso do tratamento superficial, como na Estrutura III.

O subleito considerado nos exemplos é o Solo A, e para a camada estabilizada foi utilizada a mistura deste solo com 2% RL-1C. Para o tratamento superficial, foi adotado o valor de 500 MPa para o módulo de resiliência na compressão diametral ( $MR_{CD}$ ), como usado por Marangon (2004), com uma espessura de 2 centímetros.

Os resultados das sete variações de tipos de estrutura estão apresentados na Tabela 6. Ressalte-se que nestas planilhas as deflexões listadas são sob a roda como é de praxe nas análises de pavimentos com revestimentos espessos.

**Tabela 6:** Resultados de cálculo de parâmetros as alternativas de estruturas pelo FEPAVE2

Estrutura \ Parâmetro	I	II – espessura da base			III – espessura do revestimento primário		
		5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
Deflexão sob a roda (mm)	0,60	0,44	0,35	0,31	0,45	0,30	0,28
Tensão vertical no subleito (MPa)	0,57	0,39	0,24	0,16	0,44	0,26	0,17

Comparando-se os casos das estruturas II e III, verifica-se que quando a camada estabilizada possui a mesma espessura, as deflexões sob a roda e a tensão vertical no subleito foram da mesma ordem de grandeza, o que confirma que os módulos de resiliência

encontrados, na compressão triaxial e na compressão diametral tiveram valores próximos que produziram efeitos semelhantes e de mesma ordem.

Entre a estrutura I e as estruturas II e III, observa-se que a estabilização do subleito de 5 centímetros com emulsão asfáltica gera uma tensão 46% menor e uma deflexão 35 % menor sob a roda. No caso de 15 centímetros de estabilização, a deflexão se reduz a cerca da metade. Portanto, comprova-se que no caso do solo granular deste estudo, o uso de somente 2% de emulsão RL melhora bastante a condição estrutural para um pavimento próprio para baixo volume de tráfego.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Para solos granulares, a interação solo-emulsão pode ser considerada benéfica. Aumenta a coesão do sistema, promovendo uma melhoria em quase todos os parâmetros utilizados neste estudo. Confere impermeabilidade ao sistema, fazendo com que a umidade residual ao final de um período de tempo seja maior que para os solos puros não estabilizados, além de fazer com que os comportamentos fiquem menos dependentes do estado de tensões. Restaria fazer estes de ganhos de umidade com eventual entrada de água, para que a impermeabilidade seja mais bem avaliada.

Para solos finos, o solo-emulsão tem limitações. O aumento no valor de algum parâmetro de resistência deve ser cuidadosamente avaliado, pois em geral foi encontrado um ganho no valor deste parâmetro sem qualquer acréscimo de emulsão, apenas com a perda de umidade do solo puro por tempos determinados (7 e 28 dias). Entretanto, a impermeabilidade de corpos-de-prova de solos finos estabilizados é mais bem observada que em solos mais granulares.

As emulsões RL agem de modo diferente das emulsões RM no sistema solo-emulsão: as primeiras proporcionam um ganho mais uniformemente distribuído ao longo do período de cura, enquanto na RM esse ganho é mais concentrado nos 7 primeiros dias. Assim como no solo-cimento, 7 dias parece ser o tempo máximo necessário de cura para o solo-emulsão, haja visto que os corpos-de-prova com 28 dias apresentaram uma grande influência da perda excessiva de umidade.

Finalmente, a tecnologia de estabilização solo-emulsão mostrou-se promissora para solos granulares. Para solos plásticos, deve-se ter cuidado ao se adotar como solução, tanto para base de pavimentos como para revestimento primário, pois incorre no risco de adicionar um produto químico para se obter uma estabilização que não atenda aos requisitos da boa técnica.

No plano prático, a seqüência de execução em campo precisa ser bem resgatada, com o auxílio de novas pesquisas em laboratório para que se conheça melhor essa possibilidade de uso da emulsão como estabilizante.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- DNER, *DNER-ME 131/94 Solos – módulo de resiliência de amostras compactadas*. Rio de Janeiro, 1994.
- Jacintho, E. C. (2005) *Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UnB, Brasília, DF.
- Kezdi, A (1979). *Stabilized Earth Roads – Developments in Geotechnical Engineering*. Elsevier Company.
- Lucena, F.B, Ferreira, H.C e Araújo, R.N.A (1982) *Uso de emulsão catiônica na estabilização de solos lateríticos* In: *Anais da 17ª Reunião Anual De Pavimentação*, ABPv, Curitiba, PR.

- Macêdo, J. A. G (1996) *Interpretação de ensaios defletométricos para a avaliação estrutural de pavimentos flexíveis*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Marangon, M (2004) *Proposição de estruturas típicas de pavimentos para a região de Minas Gerais utilizando solos lateríticos locais a partir da pedologia, classificação MCT e resiliência*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Mattos, A. B. G et al. (1991) *Estabilização de solo com betume*. In: *Anais da 25 º Reunião Anual De Pavimentação*, ABPv, São Paulo, SP.
- Medina, J., Motta, L. M. G. (2005) *Mecânica dos Pavimentos- 2º edição*. Editora COPPE, Rio de Janeiro, RJ.
- Miceli Junior, G.(2006) *Comportamento de solos do Estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica* Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), IME, Rio de Janeiro, RJ.
- Moreira, E.D (2006) *Estabilização betuminosa de uma base ou revestimento primário como alternativa para pavimentação de vias urbanas de baixo volume de tráfego* In: *Anais da 13ª Reunião De Pavimentação Urbana*, ABPv, Maceió, AL.[CD-ROM]
- Nogami, J.S; Villibor, D.F (1995); *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos* Editora Villibor, São Paulo.
- Santana, H.(1978) *Estabilização betuminosa de revestimentos primários* *Anais da 1º Reunião de Técnicos em Manutenção de Estradas de Rodagem – 1º REMETER* . Fortaleza,CE.
- Thuller, R.B (2005) *Estudo de solos do Estado do Rio de Janeiro para aplicação em baixo volume de tráfego* Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ.
- Yoder, E.J e Witczak , M.W (1975) *Principles of Pavement Design* 2º edição, John Wiley & Sons, Inc , New York, Estados Unidos.
- Vogt, J. C. (1971), *Estabilização Betuminosa*. 7º Simpósio sobre Pesquisas Rodoviárias. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, DNER, Rio de Janeiro.

---

Giuseppe Miceli Junior ([gmiceljr@uol.com.br](mailto:gmiceljr@uol.com.br))  
José Renato Moreira da Silva de Oliveira ([jrmso@terra.com.br](mailto:jrmso@terra.com.br))  
Laura Maria Goretti da Motta ([laura@coc.ufrj.br](mailto:laura@coc.ufrj.br))  
Álvaro Vieira ([alvaro@ime.eb.br](mailto:alvaro@ime.eb.br))