

COMPORTAMENTO RESILIENTE DE UM SOLO ARGILOSO DA REGIÃO DE VIÇOSA-MG NO ESTADO NATURAL E ESTABILIZADO COM CIMENTO E ALCATRÃO FRACIONADO¹

Giovanni Levi Sant'Anna², Carlos Cardoso Machado³, Carlos Alexandre Braz de Carvalho⁴, Dario Cardoso de Lima⁴ e Dalila Campos de Medeiros Fernandes⁶

RESUMO - A importância do estudo das características resilientes dos solos e das misturas estabilizadas quimicamente justifica-se pela necessidade de conhecer o seu comportamento mecânico, sob a ação de cargas repetidas e transientes, quando constituintes do pavimento de estradas florestais. O método tradicional de determinação do módulo de resiliência, em laboratório, requer o emprego de um equipamento triaxial de cargas repetidas, que é relativamente complexo e caro, o que leva à necessidade de se desenvolver métodos mais simples para determinação do módulo de resiliência. Assim, buscou-se com este trabalho determinar o módulo de resiliência de um solo argiloso comum na região de Viçosa-MG em seu estado natural e quando estabilizado com cimento e alcatrão, como também propor correlações empíricas entre este e outros parâmetros geotécnicos de fácil obtenção em laboratório.

Palavras-chave: Estradas florestais, ensaio triaxial de cargas repetidas, módulo de resiliência e aditivos químicos.

RESILIENT BEHAVIOR OF A CLAYEY SOIL FROM VIÇOSA-MG IN ITS NATURAL STATE AND AFTER STABILIZATION WITH CEMENT AND TAR

ABSTRACT - The study of the resilient response of soils and chemically stabilized mixtures is justified by the need to know the behavior of these soils under the action of repeated and transient loads. The traditional method for determining the resilient modulus of soils in laboratory requires complex and expensive repeated-loading triaxial equipment. Therefore, simpler methods should be developed. This work was carried out to identify the geotechnical and resilient properties of a clayey soil from Viçosa-MG in its natural state and after stabilization with cement and tar, and to propose empirical correlations between the resilient modulus of these materials and other geotechnical parameters, easily determined under laboratory conditions.

Key words: Forest roads, repeated-loading triaxial testing, resilient modulus and chemical additives.

1. INTRODUÇÃO

Apesar da existência de vários relatos na literatura internacional sobre o comportamento estático dos solos, das misturas solo-cal e das misturas solo-cimento, para fins rodoviários, observa-se que poucos estudos têm sido direcionados à análise da resposta dinâmica desses

materiais e, em especial, das misturas solos-resíduos industriais (Sant'Anna et al., 2000).

Levando-se em consideração que o tipo de solo é de grande significância na avaliação do parâmetro reatividade solo-estabilizante, cresce o interesse em se desenvolver estudos de caráter regional para análise das propriedades dinâmicas de misturas estabilizadas

¹ Recebido para publicação em 10.7.2002.

Aceito para publicação em 12.5.2003.

² Mestre em Ciência Florestal, Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa – UFV, 36571-000 Viçosa-MG, <ms25751@correio.ufv.br>; ³ Professor do Departamento de Engenharia Florestal da UFV; ⁴ Professor do Departamento de Engenharia Civil da UFV, <cabraz@mail.ufv.br>; ⁵ Professor do Departamento de Engenharia Civil da UFV, <DARIODELIMA@aol.com>; ⁶ Doutora em Ciências Florestais pela UFV.

quimicamente, particularmente em se considerando as aplicações no campo de estradas florestais. Os materiais que compõem o pavimento rodoviário estão submetidos a cargas dinâmicas e transientes, tornando indispensável que se proceda aos seus estudos em laboratório, também sob condições dinâmicas, tentando reproduzir, tanto quanto possível, as condições de campo (Sant'Anna et al., 2000).

No Brasil, a pouca experiência no que diz respeito à determinação das propriedades geotécnicas dinâmicas dos solos (Barros, 1997), principalmente quando se trata da obtenção em laboratório do módulo de resiliência de solos arenosos e argilosos, se deve, em grande parte, à escassez de equipamentos triaxiais dinâmicos nos centros técnicos de ensino e pesquisa em pavimentação, tanto aqui como no exterior.

Assim, Trindade et al. (2001), Carmo (1998), Lee et al. (1997) e Bernucci (1995), entre outros pesquisadores, propuseram, ao longo dos anos, correlações empíricas entre o módulo de resiliência e outros parâmetros geotécnicos de fácil obtenção.

Os objetivos deste trabalho foram determinar o módulo de resiliência de uma amostra de solo da microrregião de Viçosa-MG, em seu estado natural e estabilizada com alcatrão de madeira e cimento-alcatrão, para fins de pavimentação de estradas florestais, e propor correlações entre este e outros parâmetros geotécnicos de fácil obtenção em laboratório.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Identificação dos Materiais

Empregou-se um solo laterítico de grande ocorrência no relevo da cidade de Viçosa, localizada na Zona da Mata norte de Minas Gerais, Brasil. Este solo, aqui denominado ETA, é um Latossolo Vermelho-Amarelo, que se constitui no subleito de rodovias e terreno de fundação de construções civis; localiza-se nos topos de elevações com relevo plano; e apresenta um expressivo horizonte B profundo, poroso e bem drenado, com granulometria argilo-areno-siltosa, (60% de argila, 22% de areia e 18% de silte). Quanto à sua identificação, segundo o sistema de classificação de solos HRB, é um solo do grupo A-7-5(16). De acordo com a metodologia de classificação MCT, é um solo LG'. A amostra foi coletada no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no terço inferior de um talude de

aproximadamente 6 m de altura, que se situa na rodovia MG 280, que liga as cidades de Viçosa e Paula Cândido, nas proximidades da Usina de Pré-Misturado a Frio da cidade de Viçosa.

O cimento empregado como estabilizante, no teor de 2% em relação ao peso de solo seco, foi do tipo Portland comercial CP-II, E-32, marca Barroso. O alcatrão utilizado, nos teores de 0,00, 0,25, 0,50 e 1,00%, foi obtido da empresa V&M Florestal, e na Universidade Federal de Viçosa passou por um tratamento térmico (fracionamento) a 170 °C.

2.2. Ensaios de Laboratório

2.2.1. Ensaios de Compactação

Estes ensaios foram realizados com vistas à obtenção dos parâmetros peso específico seco máximo e teor ótimo de umidade do solo em seu estado natural e de suas misturas estabilizadas quimicamente, com base na NBR 7182/86 (Solo – Ensaio de Compactação), na energia do ensaio AASHTO Normal.

2.2.2. Resistência à Compressão Simples

Estes ensaios foram realizados em corpos-de-prova moldados da amostra do solo e nas misturas solo-cimento-alcatrão, em concordância com a metodologia preconizada por HEAD (1982), mas com aplicação da taxa de deformação de 1% sugerida por LEE et al. (1997).

2.2.3. Módulo de Resiliência

Os módulos de resiliência do solo e das misturas solo-cimento-alcatrão foram determinados segundo a norma DNER-ME 131/94 (DNER, 1994), a partir dos resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, com instrumentação interna à câmara triaxial.

Para realização dos ensaios de compressão simples foram moldados corpos-de-prova do solo ETA, no estado natural e estabilizado com alcatrão e, ou, cimento, compactados na energia do ensaio AASHTO Normal. Foram moldados por processo dinâmico em três camadas iguais, considerando-se os seguintes limites fixados na preparação das amostras: $10 \pm 0,05$ cm; diâmetro: 5 cm; teor ótimo de umidade $\pm 0,3\%$; grau de compactação: $100 \pm 0,3\%$. Os corpos-de-prova foram rompidos em uma prensa de compressão simples, com velocidade de subida

do prato de 1 mm/min, como sugerido por LEE et al. (1997). Os corpos-de-prova do solo no estado natural foram levados a ruptura logo após a moldagem, e os corpos-de-prova obtidos das misturas estabilizadas quimicamente foram submetidos à cura por 1, 7 e 28 dias. Para cada situação ensaiou-se um corpo-de-prova e determinou-se a curva tensão *versus* deformação do corpo-de-prova, obtendo-se os valores de tensão correspondente à deformação de 1% ($S_{u1\%}$) e o módulo tangente inicial (E_0).

2.3. Correlação para a Estimativa do Módulo de Resiliência dos Solos

A publicação Aashto (1986) indica o emprego de ensaios mais simples para determinação do módulo de resiliência dos solos a partir do desenvolvimento de correlações entre esse parâmetro e ensaios-padrão de engenharia rodoviária.

Entretanto, é necessário observar que algumas das possíveis correlações podem não levar em consideração parâmetros importantes, como a dependência do módulo de resiliência com os níveis de tensão aplicados, o que acaba por restringir seu campo de emprego em estradas.

Como solução, tem-se procurado desenvolver correlações entre o módulo de resiliência e as propriedades índices dos solos, merecendo destaque a resiliência não-confinada.

Neste trabalho, foram obtidos os valores das tensões correspondentes à deformação de 1% ($S_{u1\%}$) e do módulo tangente inicial (E_0) para o solo ETA em seu estado natural e estabilizado quimicamente com alcatrão e cimento e buscou-se estabelecer correlações estatísticas entre esses valores e os módulos de resiliência correspondentes e as variações nos níveis de tensão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Compactação

No presente trabalho pode-se observar que a inclusão do alcatrão e do cimento ao solo causou variações no seu peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e no teor ótimo de umidade ($W_{\acute{o}t}$). Verificou-se uma tendência de queda no teor ótimo de umidade e um ligeiro aumento no peso específico seco máximo das misturas solo-alcatrão e solo-cimento-alcatrão, o que pode ser constatado no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros de compactação das misturas solo-alcatrão e solo-cimento-alcatrão: teor ótimo de umidade ($W_{\acute{o}t}$) e peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$)

Table 1 – *Compaction parameters of soil-tar and soil-cement-tar mixtures: optimum water content ($W_{\acute{o}t}$) and maximum dry density ($\gamma_{dm\acute{a}x}$)*

Alcatrão (%)	Misturas Solo- Alcatrão		Misturas Solo- Cimento- Alcatrão	
	$W_{\acute{o}t}$ (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	$W_{\acute{o}t}$ (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)
0,00	31,8	13,8	30,8	14,26
0,25	31,5	14,11	29,3	14,26
0,50	30,6	14,15	29,4	14,30
1,00	30,5	14,15	30,2	14,40

Fonte: Fernandes (2000).

3.2. Resistência à Compressão Simples

Nos Quadros 2 e 3 estão os resultados dos ensaios de compressão simples, tensão correspondente à deformação de 1% ($S_{u1\%}$) e módulo tangente inicial (E_0) das misturas nos períodos de cura de 1, 7 e 28 dias. Nas Figuras 1 e 2 estão os resultados dos ensaios de compressão simples (RCS) e tensão correspondente à deformação de 1% ($S_{u1\%}$) e dos ensaios de compressão simples (RCS) e módulo tangente inicial (E_0), para misturas solo-alcatrão e solo-cimento-alcatrão, respectivamente.

De modo geral, constatou-se que a estabilização do solo com alcatrão ou com alcatrão acrescido de cimento, considerando um tempo de cura de 28 dias, apresenta influência significativa nos valores de resistência à compressão simples (RCS), tensão correspondente à deformação de 1% ($S_{u1\%}$) e módulo tangente inicial (E_0). Os resultados são influenciados pelo teor de alcatrão e período de cura, podendo-se associar valores máximos dos parâmetros no teor de alcatrão de 0,25%, aos 28 dias de cura.

3.3. Módulo de Resiliência

A condição de carregamento, o estado de tensão, a natureza do solo e a natureza das misturas estabilizadas quimicamente estão entre um grande número de fatores que podem causar variações no valor do módulo de resiliência (Parreira et al., 1998). A grande maioria dos modelos adotados em mecânica dos pavimentos foi desenvolvida com base na natureza do solo, com predomínio da tensão desvio ou da tensão confinante,

Quadro 2 – Resultados dos ensaios de compressão simples (RCS), tensão correspondente à deformação de 1% ($S_{u1\%}$) e módulo tangente inicial (E_0) para mistura solo-alcatrão

Table 2 – *Unconfined compression testing data determined at peak and at 1% strain ($S_{u1\%}$), and initial tangent modulus (E_0): soil-tar mixtures*

Alcatrão (%)	Período de Cura (Dia)								
	1			7			28		
	RCS (kPa)	$S_{u1\%}$ (kPa)	E_0 (kPa)	RCS (kPa)	$S_{u1\%}$ (kPa)	E_0 (kPa)	RCS (kPa)	$S_{u1\%}$ (kPa)	E_0 (kPa)
0,00	241	150	13.000	-	-	-	-	-	-
0,25	228	150	17.000	251	150	16.000	386	380	30.000
0,50	244	150	10.000	290	175	17.000	308	390	26.000
1,00	229	150	15.000	279	170	13.000	297	400	24.000

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de compressão simples (RCS), tensão correspondente à deformação de 1% ($S_{u1\%}$) e módulo tangente inicial (E_0) para mistura solo-cimento-alcatrão

Table 3 – *Unconfined compression testing data determined at peak and at 1% strain ($S_{u1\%}$), and initial tangent modulus (E_0): soil-cement-tar mixtures*

Cimento (2%)	Período de Cura (Dia)								
	1			7			28		
	RCS (kPa)	$S_{u1\%}$ (kPa)	E_0 (kPa)	RCS (kPa)	$S_{u1\%}$ (kPa)	E_0 (kPa)	RCS (kPa)	$S_{u1\%}$ (kPa)	E_0 (kPa)
Alcatrão (%)									
0,00	598	320	42.000	695	220	41.000	826	500	58.000
0,25	685	260	41.000	796	380	70.000	1096	380	80.000
0,50	564	360	42.000	736	400	68.000	865	390	61.000
1,00	512	360	36.000	483	440	52.000	693	400	65.000

dependendo se o solo é argiloso ou arenoso, respectivamente.

Com base nos resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, procurou-se avaliar o desempenho do modelo sugerido no método do ensaio DNER-ME 131/94 para representação da variação do módulo de resiliência com o estado de tensão. Optou-se pelo modelo descrito pela equação 1 como a de melhor desempenho, tanto para o solo em seu estado natural quanto para o solo estabilizado quimicamente.

$$M_R = k_2 + k_3 \{ (k_1 - (\sigma_1 - \sigma_3)); k_1 > (\sigma_1 - \sigma_3); \quad (1)$$

em que M_R = módulo de resiliência (MPa); σ_d = tensão desvio (kPa); e k_1 (kPa), k_2 (kPa), k_3 e k_4 = parâmetros que variam de acordo com o material utilizado.

Os valores dos parâmetros k_1 (kPa), k_2 (kPa), k_3 e k_4 , obtidos a partir dos resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, para cada um dos materiais estudados,

solo natural e misturas estabilizadas quimicamente, em diferentes teores de alcatrão e tempo de cura, estão apresentados nos Quadros 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

3.4. Correlações Obtidas entre o Módulo de Resiliência e Parâmetros Geotécnicos de Fácil Obtenção

Lee et al. (1997) determinaram a correlação entre o módulo de resiliência de três solos finos de subleito do estado de Indiana, Estados Unidos, e a resistência à compressão simples $S_{u1\%}$. Os autores determinaram uma correlação significativa ($R^2 = 0,97$) entre os parâmetros M_R e $S_{u1\%}$, apresentados na equação 2:

$$M_R \text{ (psi)} = 695,4 (S_{u1\%}) - 5,93 (S_{u1\%})^2 \quad (2)$$

Os autores concluíram que a tensão determinada a 1% de deformação no ensaio de compressão não-confinada é um bom indicador do módulo de resiliência.

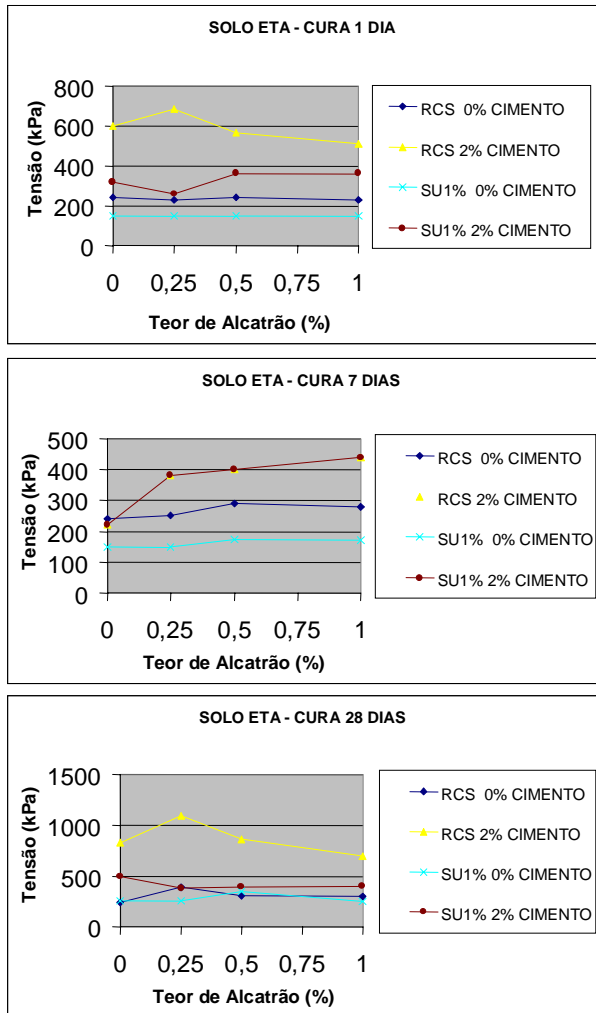


Figura 1 – Resultados dos ensaios de compressão simples (RCS) e tensão correspondente à deformação de 1% ($S_{u1\%}$) para mistura solo-alcatrão e solo-cimento-alcatrão.
Figure 1 – Unconfined compression testing data determined at peak and at 1% strain ($S_{u1\%}$): soil-tar and soil-cement-tar mixtures.

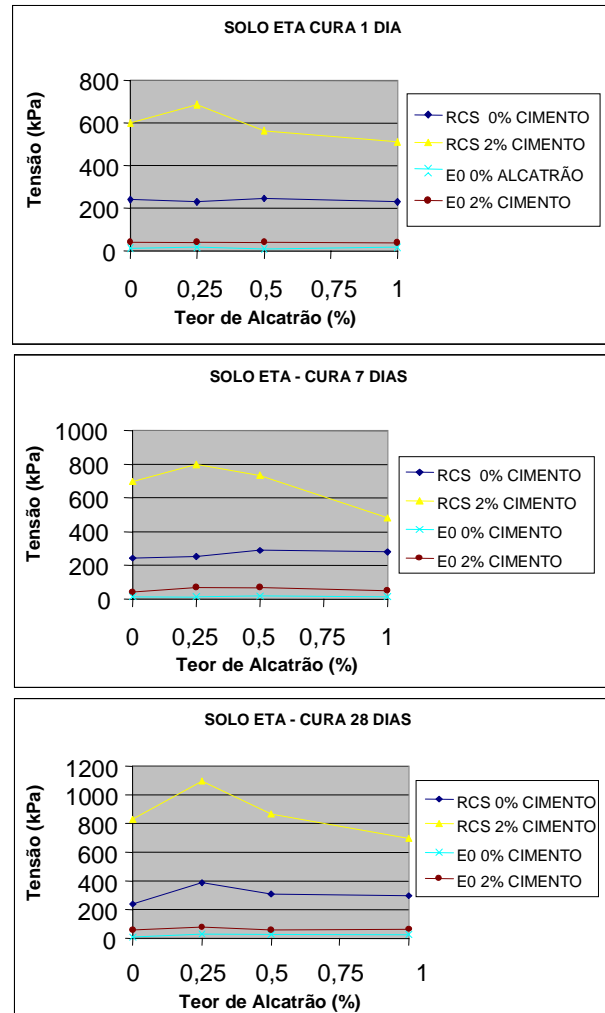


Figura 2 – Resultados dos ensaios de compressão simples (RCS) e módulo tangente inicial (E_0) para mistura solo-alcatrão e solo-cimento-alcatrão.
Figure 2 – Unconfined compression testing data and initial tangent modulus (E_0): soil-tar and soil-cement-tar mixtures.

Carmo (1998) propôs duas equações para determinação do módulo de resiliência a partir do módulo tangente inicial determinado em ensaios de compressão não-confinada (E_0 , em kPa), da tensão desvio (σ_d , em kPa) e do primeiro invariante de tensões (θ , em kPa). Para solos argilosos e arenosos têm-se, respectivamente, as relações apresentadas nas equações 3 e 4.

$$M_R \text{ (kPa)} = 4.523,088 (E_0)^{0,315821} (\sigma_d)^{-0,343628} (\theta)^{0,419295} \quad (3)$$

$$M_R \text{ (kPa)} = 458,8053 (E_0)^{0,491871} (\sigma_d)^{0,542580} (\theta)^{-2,33031} \quad (4)$$

Os parâmetros obtidos pelos resultados dos ensaios de compressão simples [tensão correspondente à deformação de 1% ($S_{u1\%}$) e módulo tangente inicial (E_0)] guardam estreita relação com o módulo de resiliência, uma vez que estas também são obtidas no ramo elástico da curva tensão *versus* deformação obtida no ensaio de compressão não-confinada, o que leva a crer serem promissoras as tentativas de correlações entre estes parâmetros e o módulo de resiliência.

Quadro 4 – Parâmetros obtidos através do ensaio triaxial de cargas repetidas para o solo ETA e as misturas solo-alcatrão, no período de cura de um dia

Table 4 – Parameters obtained from repeated-loading triaxial testing data: ETA soil and soil-tar mixtures, one day curing time

Modelo Bi-Linear Adotado			$M_R = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)$ $k_1 > \sigma_d$	$M_R = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)$ $k_1 < \sigma_d$
Teor de Alcatrão (%)	ϵ_r (%)	σ_d (kPa)	M_R (MPa)	Parâmetros k_1, k_2, k_3 e k_4
0,00	0,056	72	128,571	$k_1 = 130$ kPa $k_2 = 73000$ kPa $k_3 = 958$ $k_4 = -79$
	0,110	104	94,545	
	0,180	131	72,778	
	0,240	168	70,000	
0,25	0,058	76	131,034	$k_1 = 132,5$ kPa $k_2 = 70000$ kPa $k_3 = 1080$ $k_4 = -292$
	0,200	150	75,000	
	0,380	192	50,526	
	0,420	205	48,810	
0,50	0,060	75	125,000	$k_1 = 190$ kPa $k_2 = 50000$ kPa $k_3 = 652$ $k_4 = -490$
	0,120	115	95,833	
	0,180	145	80,556	
	0,340	220	64,706	
1,00	0,060	77	128,333	$K_1 = 135$ kPa $k_2 = 80000$ kPa $k_3 = 833$ $k_4 = -49$
	0,120	117	97,500	
	0,210	165	78,571	
	0,290	220	75,862	

Quadro 5 – Parâmetros obtidos através do ensaio triaxial de cargas repetidas para misturas solo-alcatrão, no período de cura de sete dias

Table 5 – Parameters obtained from repeated-loading triaxial testing data: soil-tar mixtures, seven day curing time

Modelo Bi-Linear Adotado			$M_R = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)$ $k_1 > \sigma_d$	$M_R = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)$ $k_1 < \sigma_d$
Teor de Alcatrão (%)	ϵ_r (%)	σ_d (kPa)	M_R (MPa)	Parâmetros k_1, k_2, k_3 e k_4
0,25	0,024	80	333,333	$k_1 = 130$ kPa $k_2 = 130000$ kPa $k_3 = 4067$ $k_4 = -688$
	0,070	120	171,429	
	0,150	160	106,667	
	0,280	210	75,000	
0,50	0,040	80	200,000	$k_1 = 120$ kPa $k_2 = 98000$ kPa $k_3 = 2550$ $k_4 = -383$
	0,090	110	122,222	
	0,150	140	87,500	
	0,240	180	75,000	
1,00	0,040	83	207,500	$k_1 = 120$ kPa $k_2 = 90000$ kPa $k_3 = 3176$ $k_4 = -253$
	0,120	120	100,000	
	0,200	160	80,000	
	0,340	220	64,706	

Quadro 6 – Parâmetros obtidos através do ensaio triaxial de cargas repetidas para as misturas solo-alcatrão, no período de cura de 28 dias

Table 6 – Parameters obtained from repeated-loading triaxial testing data: soil-tar mixtures, 28 day curing time

Modelo Bi-Linear Adotado			$M_R = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)$ $k_1 > \sigma_d$	$M_R = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)$ $k_1 < \sigma_d$
Teor de Alcatrão (%)	ϵ_r (%)	σ_d (kPa)	M_R (MPa)	Parâmetros k_1, k_2, k_3 e k_4
0,25	0,020	65	325,000	$k_1 = 95$ kPa $k_2 = 185000$ kPa $k_3 = 4667$ $k_4 = - 614$
	0,042	90	214,286	
	0,100	150	150,000	
	0,150	190	126,667	
0,50	0,039	80	205,128	$k_1 = 122,5$ kPa $k_2 = 175250$ kPa $k_3 = 703$ $k_4 = - 241$
	0,064	115	179,688	
	0,082	140	170,732	
	0,100	165	165,000	
1,00	0,04	80	200,000	$k_1 = 97$ kPa $k_2 = 160000$ kPa $k_3 = 2353$ $k_4 = - 255$
	0,064	100	156,250	
	0,090	135	150,000	
	0,105	153	145,714	

Quadro 7 – Parâmetros obtidos através do ensaio triaxial de cargas repetidas para as misturas solo-cimento e solo-cimento-alcatrão, no período de cura de um dia

Table 7 – Parameters obtained from repeated-loading triaxial testing data: soil-cement and soil-cement-tar mixtures, one day curing time

Modelo Bi-Linear Adotado			$M_R = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)$ $k_1 > \sigma_d$	$M_R = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)$ $k_1 < \sigma_d$
Teor de Alcatrão (%)	ϵ_r (%)	σ_d (kPa)	M_R (MPa)	Parâmetros k_1, k_2, k_3 e k_4
0,00	0,023	95	413,043	$k_1 = 170$ kPa $k_2 = 300300$ kPa $k_3 = 1503$ $k_4 = - 20$
	0,034	125	367,647	
	0,060	180	300,000	
	0,082	245	298,780	
0,25	0,008	90	1.125,000	$k_1 = 128$ kPa $k_2 = 625000$ kPa $k_3 = 13158$ $k_4 = - 290$
	0,017	120	705,882	
	0,027	165	611,111	
	0,039	232	594,872	
0,50	0,010	100	1.000,000	$k_1 = 124,5$ kPa $k_2 = 750000$ kPa $k_3 = 10204$ $k_4 = - 1454$
	0,015	120	800,000	
	0,025	170	680,000	
	0,036	220	611,111	
1,00	0,020	89	445,000	$k_1 = 160$ kPa $k_2 = 274900$ kPa $k_3 = 2396$ $k_4 = - 157$
	0,035	125	357,143	
	0,065	175	269,231	
	0,095	240	252,631	

Quadro 8 – Parâmetros obtidos através do ensaio triaxial de cargas repetidas para as misturas solo-cimento e solo-cimento-alcatrão, no período de cura de sete dias

Table 8 – Parameters obtained from repeated-loading triaxial testing data: soil-cement and soil-cement-tar mixtures, seven days curing time

Modelo Bi-Linear Adotado			$M_R = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)$ $k_1 > \sigma_d$	$M_R = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)$ $k_1 < \sigma_d$
Teor de Alcatrão (%)	ϵ_r (%)	σ_d (kPa)	M_R (MPa)	Parâmetros k_1, k_2, k_3 e k_4
0,00	0,012	80	666,667	$k_1 = 120$ kPa $k_2 = 255000$ kPa $k_3 = 10292$ $k_4 = -1178$
	0,022	100	454,545	
	0,058	135	232,759	
	0,092	175	190,217	
0,25	0,012	100	833,333	$k_1 = 145$ kPa $k_2 = 575000$ kPa $k_3 = 5741$ $k_4 = -2385$
	0,020	131	655,000	
	0,028	155	553,571	
	0,050	210	420,000	
0,50	0,010	100	1.000,000	$k_1 = 125$ kPa $k_2 = 750000$ kPa $k_3 = 10000$ $k_4 = -1462$
	0,015	130	866,666	
	0,025	175	700,000	
	0,032	220	687,500	
1,00	0,018	90	500,000	$k_1 = 125$ kPa $k_2 = 345000$ kPa $k_3 = 4429$ $k_4 = -852$
	0,033	120	363,636	
	0,040	134	335,000	
	0,090	230	255,556	

Quadro 9 – Parâmetros obtidos através do ensaio triaxial de cargas repetidas para as misturas solo-cimento e solo-cimento-alcatrão, no período de cura de 28 dias

Table 9 – Parameters obtained from repeated-loading triaxial testing data: soil-cement and soil-cement-tar mixtures, 28 day curing time

Modelo Bi-Linear Adotado			$M_R = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d)$ $k_1 > \sigma_d$	$M_R = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1)$ $k_1 < \sigma_d$
Teor de Alcatrão (%)	ϵ_r (%)	σ_d (kPa)	M_R (MPa)	Parâmetros k_1, k_2, k_3 e k_4
0,00	0,008	95	1.187,500	$k_1 = 140$ kPa $k_2 = 720000$ kPa $k_3 = 10389$ $k_4 = -343$
	0,013	120	923,077	
	0,022	155	704,545	
	0,035	240	685,714	
0,25	0,007	90	1.285,714	$k_1 = 160$ kPa $k_2 = 1025000$ kPa $k_3 = 3724$ $k_4 = -719$
	0,012	133	1.108,333	
	0,016	163	1.018,750	
	0,023	225	978,261	
0,50	0,010	100	1.000,000	$k_1 = 124$ kPa $k_2 = 745000$ kPa $k_3 = 10625$ $k_4 = -1395$
	0,015	135	900,000	
	0,025	180	720,000	
	0,030	220	666,666	
1,00	0,017	90	529,411	$k_1 = 140$ kPa $k_2 = 285000$ kPa $k_3 = 4300$ $k_4 = -327$
	0,033	130	393,939	
	0,050	165	330,000	
	0,077	230	298,701	

Obtidos os valores das tensões correspondentes à deformação de 1% ($S_{u1\%}$) e do módulo tangente inicial (E_0) para o solo ETA em seu estado natural e estabilizado quimicamente com alcatrão e cimento, buscou-se estabelecer correlações estatísticas entre esses valores e os módulos de resiliência correspondentes e as variações nos níveis de tensão. Um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,825 representou o resultado mais significativo obtido ao considerar o solo ETA em seu estado natural e estabilizado com cimento e alcatrão como um único conjunto de dados, quando se correlacionou o módulo de resiliência com o primeiro invariante de tensões, com o módulo tangente inicial e com a tensão desvio, conforme apresentado na equação 5 e na Figura 3.

$$M_R = \frac{5636 E_0^{1,328646} \sigma_d^{1,697031}}{\theta^{3,07205}} \quad (5)$$

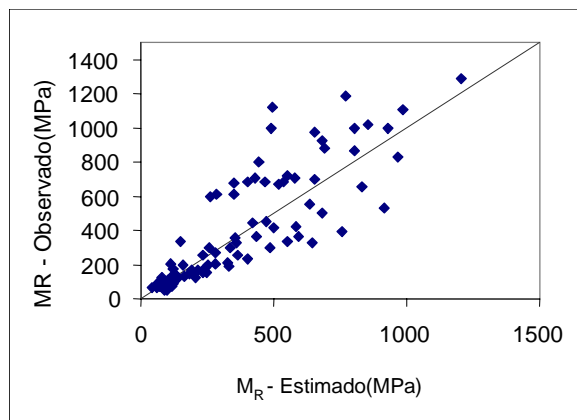


Figura 3 – M_R - observado versus M_R - estimado, considerando dados do solo ETA em seu estado natural e estabilizado quimicamente.

Figure 3 – Observed - M_R versus estimated - M_R , based on ETA soil in its natural state and chemically stabilized mixtures.

Os parâmetros analisados mostraram-se indicadores significativos do módulo de resiliência, o que reforça a importância de proceder ao desenvolvimento de outras correlações com vistas a facilitar a determinação do módulo de resiliência dos materiais que compõem o pavimento e o subleito de estradas florestais.

4. CONCLUSÕES

Com base nos valores dos coeficientes de determinação (R^2), encontrados para algumas correlações do

módulo de resiliência com os parâmetros de tensão correspondente à deformação de 1% e módulo tangente inicial, dos solos e, ou, misturas estabilizadas quimicamente, observou-se a ocorrência de variação significativa na resistência à compressão não-confinada e nos parâmetros elásticos do solo ETA após a adição de alcatrão e cimento. O teor de alcatrão e o período de cura mostraram-se fatores de importância nessas variações medidas.

Portanto, concluiu-se também que:

- a partir da análise dos dados apresentados nos Quadros 2 e 3 e nas Figuras 1 e 2, constatou-se que a adição de alcatrão às misturas solo-cimento mostrou-se benéfica para alguns tratamentos e encontram-se na faixa dos dados citados nas referências bibliográficas;
- há uma grande possibilidade de se determinar o módulo de resiliência através do emprego de alguns parâmetros geotécnicos de fácil obtenção, merecendo destaque a utilização da tensão correspondente à deformação de 1% e do módulo tangente inicial. Ambos os parâmetros ocorrem no ramo elástico das curvas tensão versus deformação e é justamente no regime elástico que o módulo de resiliência atua, avaliando a rigidez do material; e
- a correlação de mais de um parâmetro geotécnico com o módulo de resiliência também é bastante promissora, como ficou evidenciado neste trabalho, levando a crer na possibilidade de correlação de outros parâmetros geotécnicos com o módulo de resiliência.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, J. M. C. Módulo de cisalhamento máximo de solos tropicais brasileiros. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 6., 1997, Lisboa. *Anais...* Lisboa: v. 1, p. 117-126.
- BERNUCCI, L. L. B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego.** 1995. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- CARMO, C. A. T. **A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros.** 1998. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Solos - Determinação do Módulo de Resiliência**. São Paulo: 1994. 8 p. (Norma Rodoviária DNER-ME 131/94)

FERNANDES, D. C. M. **Viabilidade do uso de alcatrão de madeira de eucalipto na estabilização de solos residuais para fins rodoviários**. 2000. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing – Permeability, shear strength and compressibility tests**. New York: John Wiley & Sons, 1982. v. 2. 412 p.

LEE, W. et al. Resilient Modulus of Cohesive Soils. ASCE. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 2, p. 131-136, 1997.

SANT'ANNA, G. L. et al. Módulo de resiliência de solos e misturas estabilizadas quimicamente. Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro: FOREST 2000. p. 411-413, 2000.

TRINDADE, T. P.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C. Comportamento resiliente de um solo arenoso da região de Viçosa-MG no estado natural e estabilizado com cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: 2001. p. 369-382.