

Caracterização de propriedades resilientes de três britas graduadas utilizadas em pavimentos no sul do Brasil

Characterization of the resilient properties of the three kinds of graduates in pavements in south of Brazil

Hariane Machado Marmitt

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS
e-mail: harimarmitt@hotmail.com*

Michéle Dal Toé Casagrande

*Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ
e-mail: michele_casagrande@puc-rio.br*

Jorge Augusto Pereira Ceratti

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS
e-mail: lapav1@genesis.cpgec.ufrgs.br*

RESUMO: A caracterização de três britas graduadas (granito e dois tipos de basalto), utilizados como base e sub-base nos pavimentos na região sul do país, foi obtida através da execução de ensaios triaxiais de carga repetida. O comportamento resiliente dos materiais foi analisado com a variação da umidade das amostras. A umidade de compactação foi variada 2% abaixo e acima da umidade ótima e relacionada com a energia modificada. Os resultados indicaram que o módulo resiliente obtido para o granito (ao contrário do basalto, que não pôde ser moldado na umidade acima da ótima), sofre influência da umidade, ou seja, o valor do módulo resiliente diminui com o aumento desta.

ABSTRACT: The characterization of three graduated granular soils (granite and two kinds of basalt), used as base and sub-base in the pavement's structure in the south region of Brazil, was gotten through the execution of triaxial repeated load test. The resilient behavior of the materials was analyzed against the water content variation of the samples. The water content was varied 2% below and above of optimum water content and related with the modified energy. The results indicate that the resilient module gotten for the granite (in contrast with the basalt, that could not be molded in the water content above of the optimum), suffers influence of the water content, where the value of the resilient module decrease with the increase of the water content.

1. INTRODUÇÃO

As camadas de base e sub-base são essenciais na composição estrutural de pavimentos resistentes ao tráfego. Elas são as responsáveis em distribuir as tensões verticais causadas pelas cargas repetidas nas rodovias, reduzindo a deformação elástica que sofrem quando sujeitas a tais carregamentos. Para isto, estas camadas devem ser bem graduadas, compostas por partículas resistentes à abrasão e

possuir uma elevada capacidade de suporte às cargas submetidas aos pavimentos.

A carga e descarga de sucessivas repetições do tráfego fazem com que o revestimento asfáltico ou a camada cimentada rompam por fadiga. O trincamento inicia na face inferior do revestimento, onde ocorrem as maiores tensões e deformações, e se propaga para a superfície. Portanto, o conhecimento da magnitude tensões que atuam em um pavimento é vital para o dimensionamento e avaliação estrutural de uma rodovia [5].

Dentro deste contexto, as características resilientes de três britas graduadas (basaltos e granito) foram determinadas através de ensaios de laboratório, a fim de estudar a deformabilidade elástica de materiais granulares, através de ensaios triaxiais de cargas repetidas, sob diferentes condições de umidade e grau de compactação. Os materiais escolhidos, além de apresentarem alta resistência mecânica, são encontrados em abundância na região sul do país, sendo muito utilizados como base e sub-base de pavimentos de rodovias na região [4].

1.1. Conceito de módulo de resiliência

O ensaio triaxial de cargas repetidas é um ensaio de laboratório que submete o material a condições de cargas similares àquelas a que os pavimentos são submetidos, reproduzindo os estados de tensões atuantes causados pelo movimento do tráfego.

Este movimento submete ao pavimento deformações elásticas que são conhecidas como deformações recuperáveis e podem ser determinadas através do Módulo de Resiliência (M_R) do material quando este é submetido a cargas repetidas.

O termo resiliência expressa a resposta dos materiais submetidos a carregamentos repetidos, na sua componente elástica. Ou seja, é a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; corresponde à energia potencial de deformação [5].

Define-se Módulo de Resiliência (M_R) de um solo como a relação entre a tensão desvio (σ_d) aplicada repetidamente em uma amostra de solo em ensaio triaxial e a correspondente deformação específica recuperável ou resiliente (ε_r). Conforme é mostrado na equação 1 [3], [1].

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

Onde:

M_R : módulo de resiliência [MPa];

σ_d : tensão desvio cíclica ($\sigma_1 - \sigma_3$), aplicada repetidamente.

ε_r : deformação resiliente (vertical), correspondente a um certo número de aplicações de σ_d .

O ensaio triaxial de cargas repetidas faz com que o corpo de prova seja submetido a uma tensão de compressão vertical (σ_1) e uma tensão de compressão horizontal de confinamento (σ_3). A amostra quando submetida a sucessivos carregamentos e descarregamentos, deforma-se, obtendo-se assim, as deformações totais (ε_t).

1.2. Comportamento resiliente

É importante lembrar que, em estudos já relatados, na caracterização resiliente obtida em laboratório alguns fatores influenciam na obtenção do M_R de materiais granulares como: tensões, grau de compactação, granulometria, umidade, tipo do agregado e forma da partícula, história das tensões e o número de ciclo de cargas, duração, frequência e seqüência da carga aplicada [7], [6].

O estado de tensões é um dos fatores que mais influem no comportamento resiliente dos materiais granulares. Modelos matemáticos que melhor representam a dependência do M_R ao estado de tensões atuante para materiais granulares são definidos principalmente em função das tensões confinantes (σ_3) ou da soma das tensões principais ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) [5].

1.2.1. Modelo $k - \sigma_3$

Este modelo relaciona o módulo de resiliência à tensão confinante, uma vez que o M_R aumenta com a pressão confinante e é pouco influenciado pela tensão desvio.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (2)$$

Onde:

σ_3 : pressão confinante

k_1 e k_2 : coeficientes de regressão; derivados de resultados de ensaios em laboratório e dependem do tipo de material e das propriedades físicas da amostra durante o ensaio.

1.2.2. Modelo $k - \theta$

Este modelo relaciona o módulo de resiliência de materiais granulares ao somatório das tensões principais. Propõe relacionar o módulo de resiliência com o primeiro invariante de tensões.

$$M_R = k_1' \cdot \theta^{k_2'} \quad (3)$$

Onde:

θ : primeiro invariante das tensões sob máxima tensão desvio, no caso de compressão triaxial, $\theta = (\sigma_1 + 2.\sigma_3)$.
 k_1' e k_2' : são coeficientes de regressão.

Na maioria dos procedimentos de dimensionamento, o modelo $k-\theta$ é o mais usado internacionalmente, por utilizar o somatório das tensões. Porém, no Brasil, o modelo $k-\sigma_3$ é o mais utilizado por apresentar um coeficiente de correlação (R^2) elevado, próximo de um. O coeficiente de correlação (R^2) é obtido através de regressão linear.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Materiais utilizados

Os materiais caracterizados são rochas ígneas encontradas em abundância na região sul do país. Foram caracterizadas três britas graduadas (um tipo de granito e dois tipos de basalto). As três britas graduadas foram submetidas a ensaios de granulometria e densidade (Tabela 1).

Tabela 1: Características dos materiais estudados

Tipo de Material	$\gamma_{d\max}^*$ (gf/cm^3)	W_{es} (%)	% EM PESO PASSANDO NAS PENEIRAS									
			50,8 (mm) 2"	38,1 (mm) 1 1/2"	25,4 (mm) 1"	19,1 (mm) 3/4"	9,5 (mm) 3/8"	4,8 (mm) nº 4	2,4 (mm) nº 10	0,42 (mm) nº 40	0,074 (mm) nº 200	
Granito	2,371	3,5	100	100	99,42	71,62	51,63	37,92	29,29	10,49	2,16	
Basalto 01	2,440	6,3	100	100	91,37	77,51	65,63	42,93	23,89	10,75	3,16	
Basalto 02	2,335	6,0	100	100	100	100	54,5	36,2	21,2	10,3	3,7	
Faixa A - DNER			100	95-100	75-100	60-90	35-65	25-65	20-40	10-30	1-8	

(*) Energia do Proctor Modificado – 5 camadas e 55 golpes por camadas

O Granito apresentou uma umidade ótima de 3,5%, enquanto o Basalto 01 e Basalto 02 apresentaram uma umidade ótima elevada, 6,3% e 6,0%. Com isso, a confecção dos moldes dos corpos de prova (CP) na umidade acima da ótima para os materiais Basalto 01 e Basalto 02 foi difícil, devido à combinação de elevada umidade e pouca quantidade de finos passantes na peneira 200, não sendo suficiente para unir os grãos do material. A Figura 1 representa as curvas granulométricas dos três materiais estudados. Os três materiais granulares se encontram dentro da especificação da norma do DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, extinto DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, conforme especificação intitulada como DNER-ES-P 10-71 para a faixa A [2].

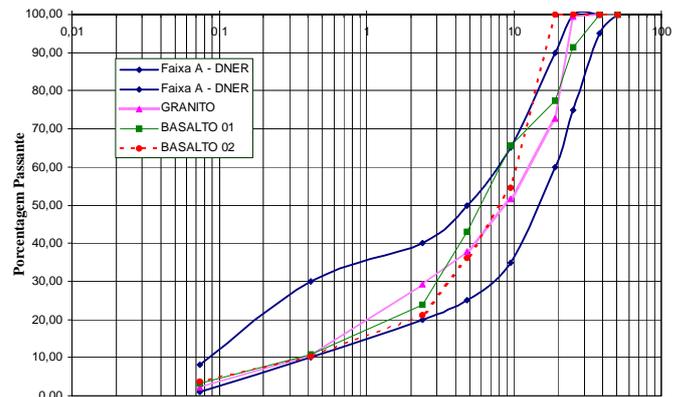


Figura 1: Curvas granulométrica dos materiais estudados

2.2. Ensaios mecânicos

No Brasil, os estados de tensões aplicados nos ensaios de laboratório são comumente definidos pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem) pelo método ME 131/94, que define os estados de tensões em função das características do material, e pela AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), pelo método TP46-94, que define os estados de tensões em função da posição que o material vai ser utilizado na estrutura do pavimento. Assim sendo, adotou-se para este ensaio o método TP46-94 definido pela AASHTO, por serem estudados para materiais utilizados em camadas de base e sub-base de pavimentos [1].

As Figuras 2 e 3 esquematizam o equipamento triaxial de cargas repetidas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Laboratório de Pavimentação – LAPAV.

No entanto, é importante comentar que a câmara triaxial desenvolvida para a realização de ensaios de carga repetida para materiais granulares graúdos é similar às câmaras para solos finos; a diferença está no tamanho, pois é capaz de ensaiar amostras de dimensões maiores (10 x 20cm). Cabe também salientar que o tempo de execução do ensaio é em torno de 45min, aplicando-se as tensões sugeridas pela AASHTO. Com a utilização de ar comprimido, um sistema de vácuo pode ser anexado à base da câmara triaxial, com a finalidade de permitir a moldagem de solos não coesivos e verificar a integridade da membrana de borracha que envolve os CPs.

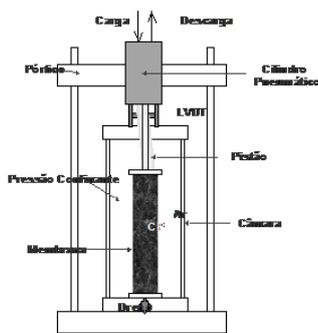


Figura 2: Esquema do equipamento triaxial de cargas descarga repetida

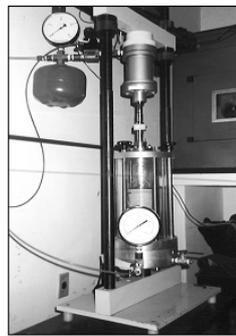


Figura 3: Equipamento triaxial de cargas repetidas LAPAV-UFRGS

2.3. Confeção das amostras e execução dos ensaios

Como se trata de materiais granulares, os moldes dos CPs devem ter um diâmetro superior ou igual a quatro vezes o diâmetro máximo das partículas do solo. O CP deve ter dimensões tais que a relação altura/diâmetro seja aproximadamente igual a dois (DNER-ME 131-94; AASHTO TP-46/94). Adiciona-se ao material a porcentagem calculada de água para umidade ótima (w_{ot}), umidade 2% acima da umidade ótima ($w_{2\% \text{ acima } w_{ot}}$) e umidade 2% abaixo da umidade ótima ($w_{2\% \text{ abaixo } w_{ot}}$), e deixa-se homogeneizando no mínimo 24 horas, a fim de que a umidade possa ser absorvida uniformemente pelos grãos do material. Deve-se ter cuidado de armazená-los em recipientes impermeáveis para que não haja perda nem acréscimo de umidade. Os CPs foram compactados na energia de compactação do Proctor Modificado, conforme especificação da norma do DNER-ME 131-94 e teores de umidade desejados (w_{ot} , $w_{2\% \text{ acima da } w_{ot}}$, e $w_{2\% \text{ a baixo da } w_{ot}}$).

Algumas dificuldades, no entanto, modificaram a execução do número de CPs ensaiados. Foram moldados 36 CPs de Granito conforme as combinações de umidade e densidade, mas seus CPs foram secados, umedecidos e reutilizados pela escassez de material, ao contrário dos dois basaltos que foram fornecidos em grande quantidade.

Para os Basaltos 01 e 02 foram moldados 24 CPs para cada material, ou seja, apenas as combinações de umidade ótima e umidade 2% abaixo da ótima forneceram condições de moldagem e possibilidade de ensaio. Os CPs moldados na combinação de 2% acima da ótima não forneceram amostras consistentes em seu

desmolde, fato percebido pela combinação de pouca quantidade de finos e grande umidade. Após a desmoldagem e a medição da amostra, ela é então preparada dentro da câmara triaxial a fim de ser ensaiada.

Inicialmente fizeram-se uma seqüência de carregamentos dinâmicos, com a finalidade de confinar o CP, eliminando as imperfeições na moldagem, as irregularidades iniciais de contato e as grandes deformações permanentes que ocorrem durante as primeiras aplicações da tensão desvio. As cargas sugeridas pela AASHTO para esta fase de confinamento foram de $\sigma_d=93,1\text{kPa}$ e $\sigma_3=103,4\text{kPa}$, num número médio de 5 aplicações. O tempo de aplicação é de aproximadamente 9 minutos.

Terminado o condicionamento, segue a seqüência de carregamento sugerida pelo método da AASHTO ao corpo de prova para a caracterização do comportamento resiliente. O M_R deve ser determinado pela aplicação de 100 ciclos de mesma intensidade, a partir da qual ele permanece constante.

Os ensaios foram realizados em condições drenadas, procedimento que melhor simula as condições de base e sub-base dos pavimentos. Posterior ao ensaio, o CP é desmanchado e secado em uma estufa a 110°C , a fim de se determinar a sua real umidade. Com os dados processados pelo programa computacional plotaram-se gráficos de M_R para cada material.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

Os valores de M_R para materiais granulares, plotados em gráficos logarítmicos, apresentam um coeficiente de correlação (R^2) próximo a um. Portanto, para uma análise mais coerente, adotou-se um critério para validade dos ensaios: somente os CPs que apresentaram valores de R^2 superiores a 0,7 serão considerados válidos para a análise, sendo excluídos assim 10 resultados.

3.1. Parâmetro de resiliência

Os dois modelos matemáticos utilizados apresentaram valores de R^2 muito semelhantes. Na comparação, os valores aceitáveis entre (0,7 a 1) de R^2 resultantes do modelo matemático $k-\sigma_3$ ocorreram mais vezes, motivo pelo qual este modelo foi usado nesta pesquisa e é mais aceito pelos pesquisadores brasileiros. A Tabela 2

relaciona o intervalo das constantes k_1 e k_2 , k_1' e k_2' dos três materiais analisados em laboratório para os dois modelos matemáticos estudados.

Tabela 2: Resumo dos valores de k_1 e k_2 , k_1' e k_2' obtidos pela regressão linear dos dois modelos estudados

material	umidade	n ^o	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$		$M_R = k_1' \cdot \theta^{k_2'}$	
			k_1 (MPa)	k_2 (MPa)	k_1' (MPa)	k_2' (MPa)
Granito	ótima	14	920 a 2.290	0,32 a 0,58	590 a 1.150	0,32 a 0,60
	acima ótima	6	930 a 1.710	0,41 a 0,59	550 a 880	0,43 a 0,62
	abaixo ótima	5	590 a 1.630	0,34 a 0,51	380 a 900	0,35 a 0,52
Basalto 01	ótima	10	530 a 1.280	0,29 a 0,58	370 a 680	0,30 a 0,60
	abaixo ótima	16	700 a 1.920	0,45 a 0,74	340 a 880	0,47 a 0,77
Basalto 02	ótima	9	780 a 1.860	0,41 a 0,69	400 a 870	0,42 a 0,87
	abaixo ótima	14	1.110 a 2.050	0,40 a 0,78	510 a 900	0,41 a 0,81

74 CPS confiáveis

Analisando-se os três materiais na w_{ot} , pode-se observar que o Granito apresentou maior valor de M_R que os demais, e o Basalto 01 e o Basalto 02 apresentaram valores semelhantes entre eles, como se observa na Figura 4. Na umidade 2% abaixo da ótima, os valores de M_R são semelhantes e, conforme a Figura 5, há pouca variabilidade de M_R para os três materiais.

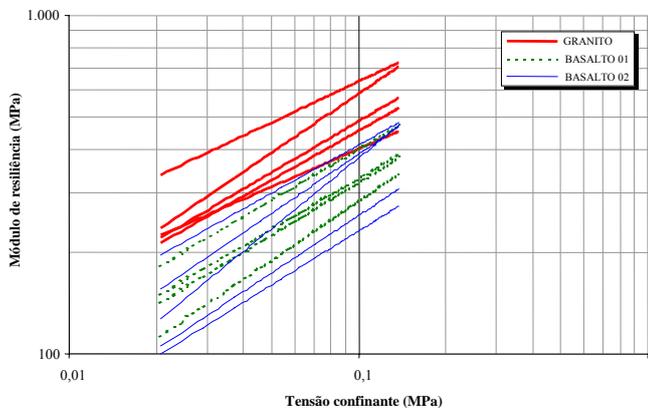


Figura 4: Valores de M_R para os três materiais estudados, na w_{ot}

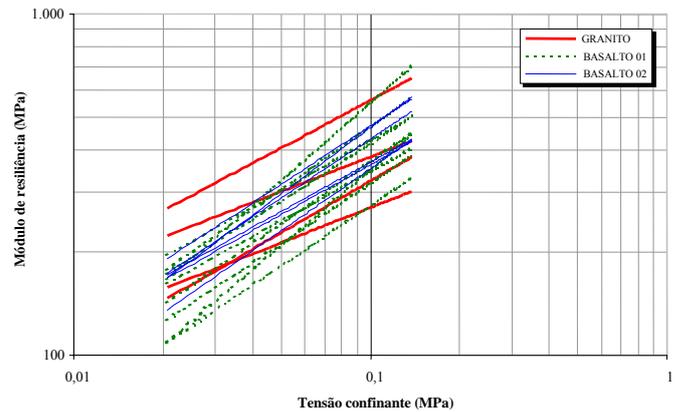


Figura 5: Valores de M_R para os três materiais estudados, na $w_{2\% \text{ abaixo } w_{ot}}$

3.2. Efeito da umidade

A influência da umidade no M_R das três britas graduadas pôde ser investigada apenas para o material Granito, que foi ensaiado nas três umidades desejadas. Os demais materiais foram ensaiados apenas na w_{ot} e na abaixo da ótima.

Ao analisar graficamente o M_R com os valores de k_1 , percebe-se que seus resultados estão ligados diretamente com a variação da umidade. O Granito apresentou um maior valor de k_1 para a w_{ot} . Confirmou-se, para este material, que o M_R é influenciado pela variação da umidade. Aumentando a umidade, o M_R diminui em relação à umidade ótima. Esta influência pode ser mais bem observada na Figura 6, que expressa graficamente os valores de M_R do Granito, nas três umidades desejadas, no modelo que utiliza a tensão confinante. Verifica-se também que este material apresenta melhor comportamento resiliente quando compactado na umidade ótima.

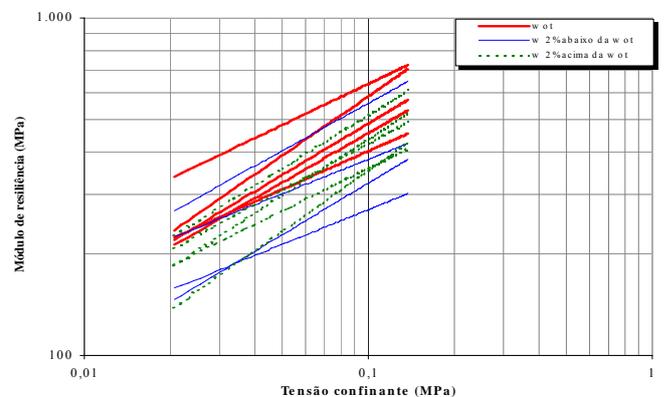


Figura 6: M_R do Granito nas três umidades estudadas

Para o Basalto 01, o valor de k_1 é um pouco maior para a umidade 2% abaixo da ótima, comparando com os valores de k_1 na w_{ot} , mas

analisando graficamente (Figura 7), tais valores possuem quase a mesma variação. Ou seja, para o material Basalto 01, o valor do M_R não varia com a diminuição da umidade.

Para o Basalto 02, a umidade 2% abaixo da ótima apresenta um valor maior de k_1 , mas analisado graficamente pela Figura 8, do modelo que relaciona a tensão confinante, os valores de k_1 estão mais concentrados na parte superior do gráfico, podendo-se interpretar que o M_R para a umidade abaixo da ótima deste material é maior que para a w_{ot} .

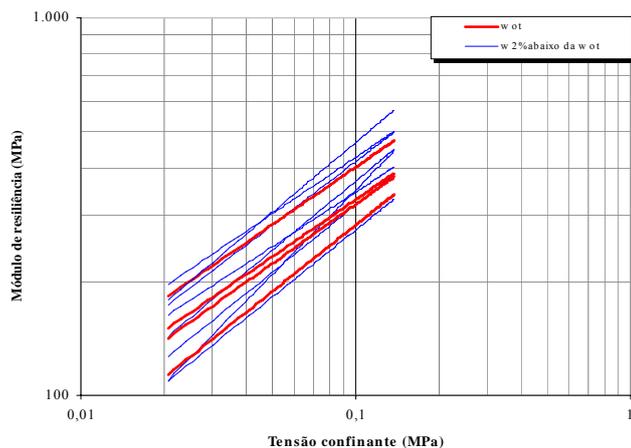


Figura 7: M_R do Basalto 01, nas duas umidades estudadas

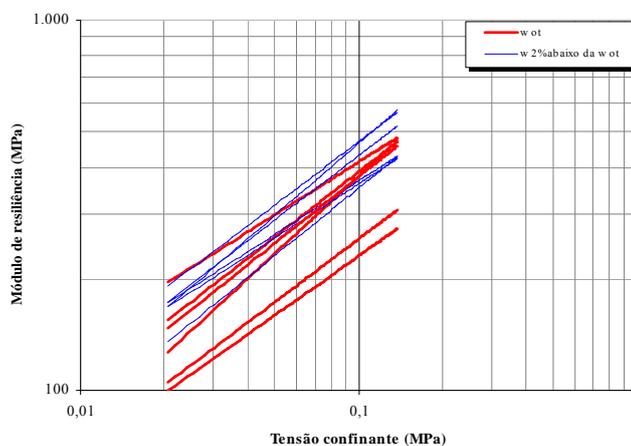


Figura 8: M_R do Basalto 02, nas duas umidades estudadas

6. CONCLUSÕES

Conhecendo-se os valores de M_R pode-se melhor empregar os materiais no pavimento. Quanto maior for o M_R do material usado como base, mais resistente será este material quanto à influência do movimento repetido das cargas impostas pelo tráfego, inibindo a formação das

trincas por fadiga. Os três materiais estudados apresentaram altos valores de M_R , mas o material Granito foi o que melhor apresentou um comportamento resiliente.

A presença de finos é extremamente importante nos ensaios de resiliência, pois os materiais Basalto 01 e Basalto 02 não puderam ser analisados na umidade acima da ótima, por possuir uma umidade ótima muito elevada e pouca porcentagem de finos na sua composição, dificultando a moldagem dos CPs para o ensaio triaxial.

Os dois modelos estudados apresentaram respostas semelhantes em relação aos valores de k_1 e de M_R de cada material. O Granito foi o material que melhor respondeu a esta relação, apresentando um valor de k_1 maior para a w_{ot} do que os demais materiais, o que mostra que este material é mais resistente a altas deformações do pavimento que os demais materiais analisados. O Basalto 01 e o Basalto 02 apresentaram valores de k_1 altos, mas menores do que os do Granito.

A influência da umidade no comportamento resiliente só pôde ser analisada para o material Granito, para o qual se conclui que o M_R é influenciado pela umidade, diminuindo quando do aumento desta.

REFERÊNCIAS

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. (AASHTO TP46-94). Washington, D.C.
2. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Base estabilizada granulometricamente – Especificação do Serviço*. (DNER-ES-P 10/71). Norma Rodoviária, Método de Ensaio. 1971. 6p.
3. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Solos – Determinação do Módulo de Resiliência*. (DNER-ME 131/94). Norma Rodoviária, Método de Ensaio. 1994. 8p.
4. Marmitt, H. *Caracterização de propriedades resilientes de três britas graduadas utilizadas em pavimentos no sul do Brasil*. Porto Alegre, 2002, Dissertação de Mestrado – UFRGS. 123 f. Geotecnia.
5. Medina, J. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 380 p.
6. Lekarp, F.; Isacsson, U.; Dawson, A. *Resilient Response of Unbound Aggregates*. *Journal of*

Transportation Engineering. January/February
2000. Disponível em
www.nottingham.ac.uk/~evzard/asce2000a.pdf.

Acessado em: agosto/2002.

7. Preussler, E. S. *Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço*. Rio de Janeiro, 1983. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ.