

DOSAGEM DE MISTURA BETUMINOSA A FRIO E SEU ESTUDO SOB EFEITOS DE CARGAS ESTÁTICAS E REPETIDAS¹

Tamyres Karla da Silva^{2*}, Carlos Alexandre Braz de Carvalho³, Geraldo Luciano de Oliveira Marques⁴,
Giovani Levi Sant'Anna⁵, Taciano Oliveira da Silva⁶ e Carlos Cardoso Machado⁷

¹ Recebido em 04.08.2014 aceito para publicação em 01.12.2015.

² Universidade Federal de Viçosa, Graduando em Engenharia Civil, Viçosa, MG - Brasil. E-mail: <tamyreskarla@gmail.com>.

³ Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa, MG - Brasil. E-mail: <cabraz@ufv.br>.

⁴ Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes e Geotecnia, Juiz de Fora, MG - Brasil. E-mail: <geraldo.marques@ufjf.edu.br>.

⁵ Fundação Arthur Bernardes, FUNARBE, Viçosa - Brasil. E-mail: <santannagiovani@yahoo.com.br>.

⁶ Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa, MG - Brasil. E-mail: <taciano.silva@ufv.br>.

⁷ Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Floresta, Viçosa, MG - Brasil. E-mail: <machado@ufv.br>.

*Autor para correspondência.

RESUMO – Este trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa experimental que objetivou estudar o comportamento mecânico de uma mistura betuminosa a frio sob efeitos de cargas estáticas e repetidas. Após a caracterização dos agregados e do ligante empregados na pesquisa, efetuou-se a mistura, a partir da dosagem Marshall, obtendo o teor de projeto equivalente a 8,5% de emulsão. Nesse teor de emulsão, moldaram-se várias amostras, que foram submetidas aos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral e fadiga. A caracterização dos agregados e do ligante mostrou-se concordante com vários estudos, exceto o resíduo da peneiração, que não atendeu à exigência do IBP (1999). Para os ensaios com as misturas asfálticas, empregaram-se três corpos de prova, pesando cada um deles cerca de 1.200 g, compactados com 75 golpes em cada uma de suas faces. Observou-se que a estabilidade e a fluência Marshall de 620 kgf e de 4,20 mm, respectivamente, superaram o limite mínimo recomendado na especificação de serviço do DNIT (2010a). Com relação aos ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração por compressão diametral, obtiveram-se os valores de 1.616 MPa e 0,44 MPa, respectivamente, quando se verificou que os resultados foram bem inferiores aos encontrados em misturas a quente. Esse mesmo comportamento foi observado no ensaio de fadiga que, na maioria dos níveis de tensão aplicados, foi inferior a 1.000 aplicações do carregamento.

Palavras-chave: Pavimentação asfáltica; Dosagem Marshall; Resistência à tração por compressão diametral.

DOSAGE OF COLD BITUMINOUS MIXTURE AND ITS STUDY ON THE EFFECTS OF STATIC AND REPEATED LOADS

ABSTRACT – This paper presents the results of an experimental study that aimed to study the mechanical behavior of a cold bituminous mixture under effects of static and repeated loads. After the characterization of the aggregates and the binder employed in the study, it was performed the mixture from the dosage Marshall, obtaining the equivalent project content of 8.5% emulsion. In this emulsion content, several samples were shaped and subjected to the tests of resilient modulus, tensile strength by diametrical compression and fatigue. The characterization of aggregates and binder proved to be consistent with several studies, except the residue of the sifting that did not meet the requirement of IBP (1999). For tests with the asphalt mixtures, three specimens were employed, each weighing about 1,200 g, compacted with 75 blows on each of their faces. It was observed that the Marshall stability and creep of 620 kgf and 4.20



mm, respectively, exceeded the minimum threshold recommended by the service specification DNIT (2010a). With regard to tests of resilience modulus and tensile strength by diametral compression, values of 1,616 MPa and 0.44 MPa were obtained, respectively, verifying that the results were much lower than those found for hot mixtures. The same behavior was observed for the fatigue test that, for most levels of stress applied, was inferior to 1000 applications of loading.

Keywords: Asphalt paving; Dosage Marshall; Mechanical behavior.

1. INTRODUÇÃO

Da extensa malha rodoviária brasileira, que soma cerca de 1,7 milhão de quilômetros, cerca de 212.738 km são vias pavimentadas (CNT, 2011; MACHADO et al., 2009; SILVA et al., 2011a). Do total pavimentado, aproximadamente 95% apresentam revestimentos asfálticos (BERNUCCI et al., 2008). Essas vias são responsáveis por 96,2% da locomoção de passageiros e por 61,8% da movimentação de cargas no Brasil, segundo o Boletim Estatístico CNT (2011).

A falta de solos com características geotécnicas apropriadas, exigidas pelos órgãos rodoviários para a construção de estradas, torna-se um dos grandes entraves para o setor de transportes no Brasil. Isso porque volumes cada vez maiores de cargas são transportados, com maiores frequências, a distâncias cada vez mais longas, exigindo que as estradas sejam transitáveis em qualquer época do ano (MACHADO et al., 2003 *apud* SILVA et al., 2011b). O revestimento asfáltico não é um procedimento economicamente viável para melhoria funcional e estrutural de grandes extensões viárias de estradas vicinais; entretanto, em alguns casos a sua utilização se faz necessária, principalmente, em trechos de estradas florestais com excesso de poeira e buracos e próximos às comunidades limítrofes aos plantios florestais. Isso porque as empresas florestais vêm arcando com esse custo, muitas vezes acionadas judicialmente.

O revestimento asfáltico é composto de uma mistura de agregados minerais com ligante asfáltico em proporções adequadas, formando uma camada impermeável, flexível, resistente às solicitações do tráfego e às influências climáticas.

Um revestimento bem projetado, além de proporcionar conforto e segurança aos usuários, garante maior vida útil ao pavimento, principalmente por proteger suas camadas subjacentes. Para cumprir esse papel, é importante analisar o material empregado nos revestimentos asfálticos, as suas características

tecnológicas e o comportamento mecânico das misturas.

Os agregados minerais contribuem com mais de 90% em peso da mistura asfáltica seca. O restante se deve à presença do ligante. Assim, é fundamental conhecer as propriedades tecnológicas do agregado para obter um bom desempenho da mistura asfáltica. O agregado, geralmente inerte, é definido como material sem forma ou volume definido e deve possuir dimensões e propriedades adequadas para fabricação de argamassas e concreto (BERNUCCI et al., 2008).

A escolha desses agregados para utilização nos revestimentos asfálticos irá depender da disponibilidade, custo e qualidade, assim como o tipo de aplicação. Os agregados, para fins de projeto, devem oferecer propriedades físico-mecânicas satisfatórias (DNIT, 2006).

Os ligantes asfálticos são materiais termossensíveis e, ao serem empregados numa mistura com agregados, afetam a resposta mecânica do conjunto pela variação não somente da amplitude, frequência e duração do carregamento, mas, sobretudo, pela variação da temperatura. O ligante asfáltico do tipo emulsão asfáltica, utilizado nesta pesquisa, é uma dispersão de asfalto em água.

As misturas asfálticas necessitam de um controle rigoroso na dosagem, na mistura usinada e durante a execução na pista, devendo atender a exigências quanto à resistência, à flexibilidade e à durabilidade para resistirem às ações do tráfego e do clima.

Entre os tipos de revestimentos asfálticos por mistura a frio, destacam-se o pré-misturado a frio (PMF), a lama asfáltica, o microrrevestimento asfáltico e a mistura asfáltica reciclada (SENÇO, 1997; MEDINA; MOTTA, 2005; BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008).

O DNER (1994a) contém os procedimentos para dosagem de misturas betuminosas a frio desde o preparo dos agregados, a mistura desses com o ligante, a confecção dos corpos de prova e os critérios empregados

para obtenção dos indicadores de desempenho da mistura.

A determinação da resistência à tração por compressão diametral refere-se à aplicação de uma carga de ruptura verticalmente em dois frisos metálicos dispostos na direção longitudinal do corpo de prova. Esse esforço de compressão diametral faz que o corpo de prova rompa por tração (DNIT, 2010b).

O módulo de resiliência corresponde à relação entre a tensão de tração σ_t , aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de uma mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ϵ_r) correspondente à tensão aplicada a dada temperatura (T).

A fadiga é um fenômeno de trincamento induzido por cargas repetidas, em que os níveis de tensão ou deformação delas decorrentes se encontram abaixo da resistência do material (YODER; WITCKZ, 1975).

No ensaio de fadiga por compressão diametral, recomenda-se que as cargas verticais devem induzir tensões normais no plano vertical diametral no intervalo de 10% a 50% da tensão de ruptura à tração estática. O ensaio à tensão controlada é feito aplicando-se a tensão normal no plano vertical, repetidamente, até ocorrer a ruptura do corpo de prova à tração (MENDES, 2011).

Neste trabalho, fez-se a dosagem de uma mistura asfáltica do tipo pré-misturado a frio a partir do estudo dos agregados, do ligante e da mistura asfáltica propriamente dita, em conformidade com as recomendações técnicas do DNER (1994a) e do DNIT (2010a), e estudou-se o seu comportamento sob os efeitos de cargas estáticas e repetidas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Empregaram-se os agregados (brita 0, brita 1 e pó de pedra), todos de formação gnáissica e oriundos da pedra de Ervália, da cidade de Ervália, MG. O ligante utilizado foi a emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta do tipo RL-1C, composto por 61% de cimento asfáltico de petróleo (CAP) e 39% de fase aquosa. O método utilizado abrange quatro etapas, cujas peculiaridades se encontram descritas a seguir.

Etapa 1 – Identificação das propriedades físicas dos agregados e do ligante: determinação da abrasão “Los Angeles” (DNER, 1998a), análise granulométrica (ABNT, 2003a); agregado graúdo: massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT,

2003b) agregado miúdo: massa específica Chapman (DNER, 1998b), agregado graúdo: adesividade ao ligante betuminoso (DNER, 2004a); viscosidade Saybolt-Furol (ABNT, 2007a), resíduo por evaporação, % em peso (ABNT, 2007b), peneiração (resíduo da peneira 0,84 mm) (ABNT, 1999) e carga de partícula (DNIT, 2011).

Etapa 2 – Escolha da faixa de trabalho (DNIT, 2010a). Optou-se pela faixa C, que está situada entre misturas abertas e densas. Através das granulometrias dos agregados, foi possível obter a porcentagem em peso de cada um deles na mistura para atender à faixa de trabalho selecionada.

Etapa 3 – Realização da dosagem Marshall para misturas betuminosas a frio (DNER, 1994a). A Tabela 1 contém as equações empregadas na determinação da dosagem Marshall. Foram estudados quatro traços de emulsão asfáltica em peso (6,5%; 7,5%; 8,5%; e 9,5%), prevendo-se que nos intervalos desses traços se alcance o teor de projeto para a mistura. Para cada traço, empregaram-se três corpos de prova, pesando cada um deles cerca de 1.200 g. Os corpos de prova foram compactados com 75 golpes em cada uma de suas faces.

Visando à obtenção de corpos de prova bem próximos de 1.200 g por traço, foram utilizadas as equações 1 e 2.

$$X - aY = 1.200,00 \quad (1)$$

$$\frac{Y}{X} = b \quad (2)$$

Em que X massa da mistura de agregado mais emulsão; Y, massa da emulsão; a, participação da fase aquosa na emulsão; e b, teor de emulsão para o traço escolhido. Seguindo as instruções contidas no DNIT (2010a), foi possível definir o teor de emulsão de projeto (Temulsão_{projeto}) para a mistura.

Assim, para a determinação do teor de projeto da mistura, levaram-se em consideração a estabilidade máxima, a massa específica aparente máxima e o índice de vazios da mistura.

Etapa 4 – Nesse teor de projeto, moldaram-se nove corpos de prova, que foram destinados ao ensaio de módulo de resiliência, empregando a equação 3.

$$M_k = \frac{F}{\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (3)$$

Tabela 1 – Equações empregadas na dosagem Marshall e nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulos de resiliência e fadiga.

Table 1 – Equations used in the dosage Marshall and tests of tensile strength by diametrical compression, resilient modulus and fatigue.

| Parâmetros de dosagem Marshall | |
|--|--|
| Densidade máxima teórica (D) teórica (D) | $D = \frac{100}{\left(\frac{\%_{ag}}{d_{ag}} + \frac{\%_{af}}{d_{af}} + \frac{\%_f}{d_f} + \frac{\%_{CAP}}{d_{CAP}} \right)}$ |
| Porcentagem de vazios na mistura (%V _v) | $\%V_v = \left(\frac{D - d}{D} \right) \times 100$ |
| % de vazios no agregado mineral (%VAM) | $\%VAM = \left(\frac{D - d}{D} \right) \times 100 - \frac{d \times \%CAP}{d_{CAP}}$ |
| Relação betume vazios (RBV) | $RBV = \frac{\%V_b}{\%VAM}$ |
| Estabilidade Marshall (E) | $E = k \cdot Leit \cdot Fc$ |

***d**: massa específica aparente da mistura; **%_{ag}**, **%_{af}**, **%_f** e **%_{CAP}**: porcentagens de agregado graúdo, miúdo, filer e de cimento asfáltico de petróleo, respectivamente; **d_{ag}**, **d_{af}**, **d_f** e **d_{CAP}**: massa específica real dos grãos de agregado graúdo, agregado miúdo, filer e cimento asfáltico de petróleo, respectivamente; **V_b**: volume de betume na mistura; **k**: constante do anel dinamométrico; **Leit**: leitura no extensômetro; e **Fc**: fator de correção em função da altura média do corpo de prova.

Em que MR módulo de resiliência (kgf/cm²); F, carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova (kgf); D, deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo, para 300, 400 e 500 aplicações da carga (F); e m, coeficiente de Poisson.

Dessa amostragem, retiraram-se três corpos de prova para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, empregando as equações 9, 10 e 11.

$$RT = \frac{2F_{rup}}{\pi DH} \quad (9)$$

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad (10)$$

$$\sigma_c = -\frac{6F}{\pi DH} \quad (11)$$

Em que RT resistência à tração por compressão diametral (kgf/cm²); F_{rup}, carga de ruptura (kgf); D, diâmetro do corpo de prova (cm); e H, altura do corpo de prova (cm).

As seis amostras restantes foram destinadas ao ensaio de fadiga, empregando-se a equação 12.

$$N = k \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (12)$$

Em que N vida de fadiga (número de repetições de tensão que leva à ruptura da amostra); k, constante do anel dinamométrico; e Δσ, diferença entre a tensão de compressão e a de tração: (equação 11 – equação 10) = 4 σ_t.

O ensaio de fadiga foi realizado sob as condições de 25 °C de temperatura, módulo de resiliência médio de 1.616 MPa e resistência à tração por compressão diametral média de 0,44 MPa. Os ensaios dinâmicos de módulo de resiliência e de fadiga e o de resistência à tração por compressão diametral foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em Juiz de Fora, MG.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados dos ensaios de caracterização do material

Etapa 1 – Com relação aos agregados, o peso específico, em kN/m³, encontrado para a brita 0 foi 29,1;

para a brita 1, 28,5; e para o pó de pedra, 28,0, sendo a adesividade ao ligante para a brita 1 satisfatória. O desgaste Los Angeles encontrado foi de 27% para a brita 0 e de 22% para a brita 1. A análise granulométrica é ilustrada na Figura 1.

Com relação ao ligante emulsão asfáltica RL-1C, encontrou-se uma viscosidade Saybolt Furol, a 25 °C, 25; um resíduo por evaporação, % em peso, de 61,02; 0,34, no ensaio de peneiração (resíduo na peneira de 0,84 mm); % em peso de CAP; e carga de partícula positiva.

3.2. Resultados das porcentagens do material via emprego do método Rotchfuchs

Etapa 2 – As porcentagens dos agregados obtidas para atender à faixa C foram de 36% para a brita 1, 39% para a brita 0 e 25% para o pó de pedra. A granulometria encontrada enquadrou-se dentro dos limites superior e inferior da faixa C (Figura 1).

3.3. Resultados dos ensaios de dosagem Marshall

Etapa 3 – Os parâmetros de dosagem obtidos do ensaio Marshall estão ilustrados na Figura 2. Após

a realização deste ensaio, encontrou-se um teor de emulsão de projeto para a mistura (Temulsão_{projeto}) igual a 8,5%. Verificou-se também, nessa figura, que, com relação à influência da massa específica aparente sobre alguns indicadores de dosagem Marshall, praticamente não houve variação, salvo a porcentagem de vazios do agregado mineral. A massa específica aparente para o teor de 9,5% foi o maior valor encontrado. A fluência, à exceção de 8,5%, ficou acima da especificação. Para a estabilidade, o valor máximo foi igual a 7,5%. Os demais indicadores apresentaram tendência esperada.

3.3. Resultados dos ensaios de cargas estáticas e repetidas

Etapa 4 – As informações referentes à realização dos ensaios de módulo de resiliência, de resistência à tração por compressão diametral e de fadiga, para o teor ótimo de 8,5% de emulsão asfáltica, encontram-se na Tabela 2.

A Figura 3 ilustra os resultados do ensaio de fadiga à tensão controlada, destacando-se a relação entre a diferença de tensões aplicadas com a vida de fadiga e a relação entre as deformações específicas resilientes.

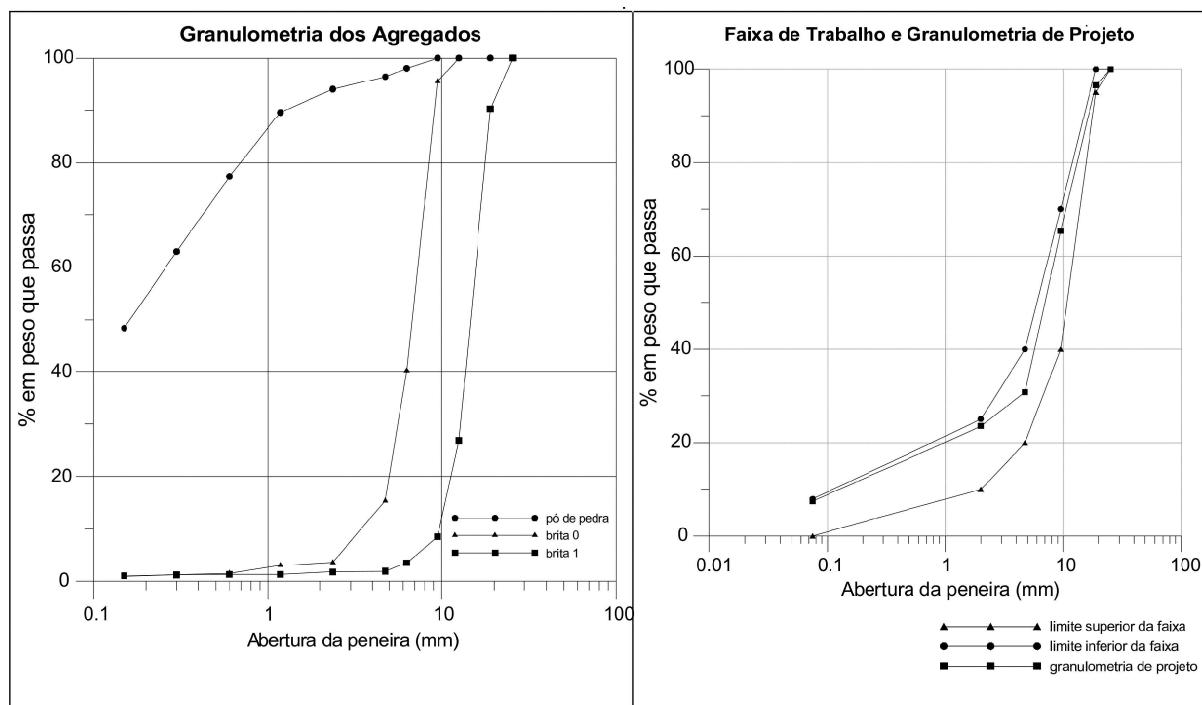


Figura 1 – Resultados dos indicadores de dosagem – ensaio de Marshall.
Figure 1 – Results of the dose indicators – Marshall test.

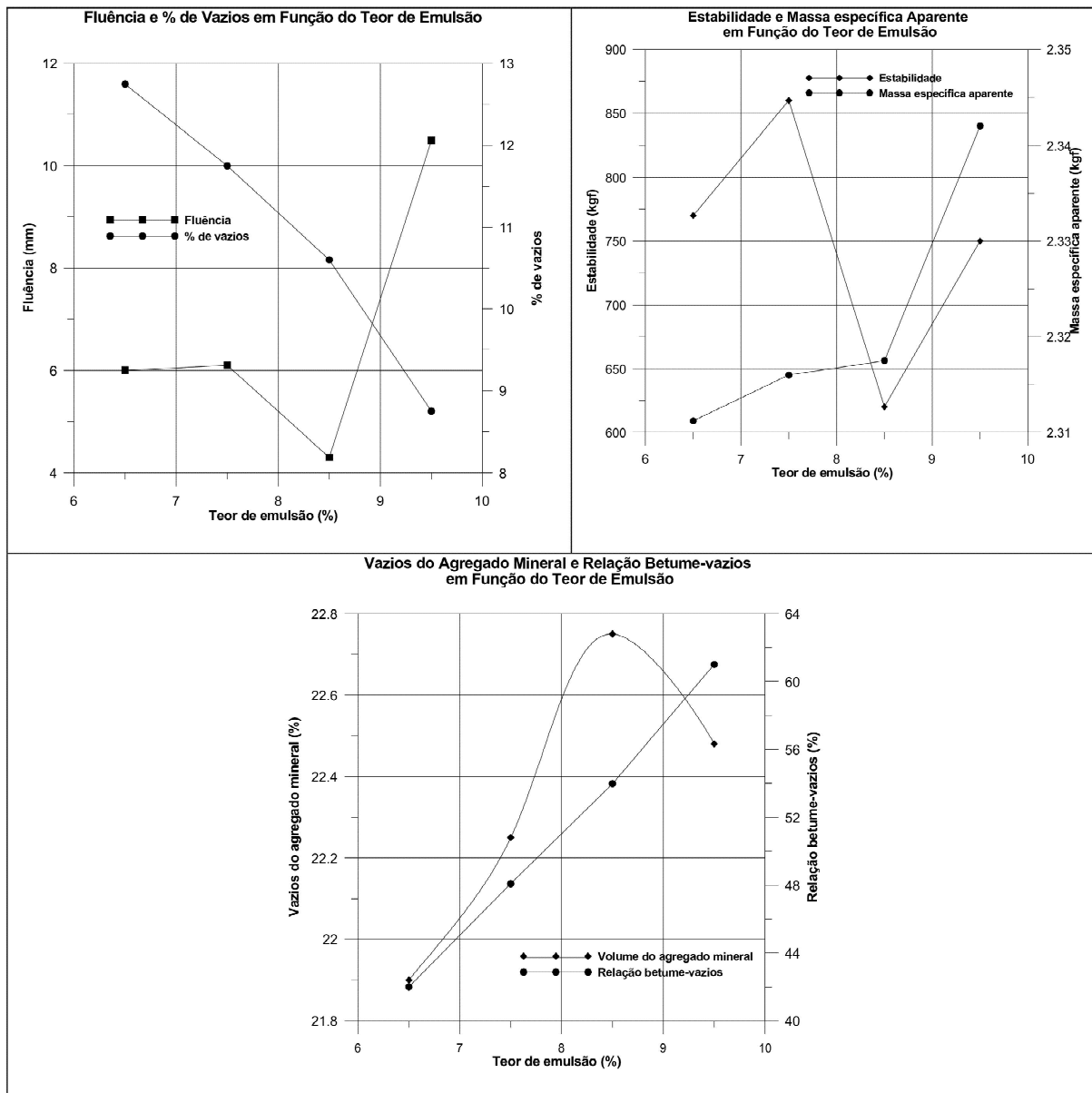


Figura 2 – Vida de fadiga em função da deformação específica resiliente e da diferença entre tensões.
Figure 2 – Fatigue life as a function of specific resilient deformation and the difference between stresses.

4. DISCUSSÃO

Com relação aos agregados, a análise granulométrica das britas indica que esse material é do tipo uniforme, enquanto o pó de pedra apresentou granulometria contínua, com distribuição granulométrica do tipo material arenoso, atendendo à faixa de serviço. Os pesos específicos encontrados estão em conformidade com

as faixas citadas nas normas utilizadas, e a adesividade atende às recomendações, bem como o desgaste encontrado, o qual está abaixo da faixa-limite de 55%.

Quanto ao ligante emulsão asfáltica RL-1C, a viscosidade Saybolt Furol recomendada pelo IBP é 20-100; o resíduo por evaporação, % em peso, é 60; a carga de partícula ficou em concordância com o IBP

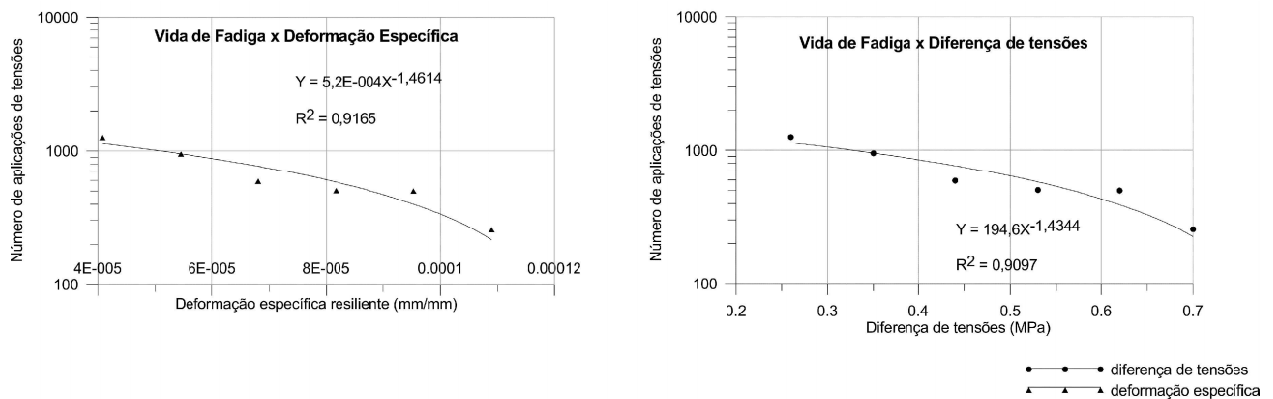


Figura 3 – Vida de fadiga em função da deformação específica resiliente e da diferença entre tensões.
Figure 3 – Fatigue life as a function of specific resilient deformation and the difference between stresses.

Tabela 2 – Módulo de resiliência (MR) de uma mistura betuminosa a frio com 8,5% de emulsão asfáltica do tipo RL-1C, resistência à tração (RT) por compressão diametral e resultados obtidos no ensaio de fadiga à tensão controlada.

Table 2 – Resilient modulus (MR) of a cold bituminous mixture with 8.5% asphalt emulsion type RL-1C, tensile strength (RT) by diametrical compression and results obtained in the test of fatigue to controlled stress.

| Módulo de resiliência (MR) | | | | | |
|----------------------------|-------------|---------------|---------------------|----------------------|------------------------------|
| CP N° | Altura (cm) | Diâmetro (cm) | Teor de Emulsão (%) | M _R (MPa) | M _R (Médio) (MPa) |
| 10 | 6,63 | 10,00 | | 1.771 | |
| 11 | 6,55 | 10,16 | | 1.672 | |
| 12 | 6,64 | 10,08 | | 1.534 | |
| 13 | 6,58 | 10,18 | | 1.815 | |
| 14 | 6,65 | 10,12 | 8,5 | 1.838 | 1.616 |
| 15 | 6,57 | 10,15 | | 1.677 | |
| 16 | 6,66 | 10,16 | | 1.619 | |
| 17 | 6,67 | 10,16 | | 1.434 | |
| 18 | 6,70 | 10,31 | | 1.180 | |

| Resistência à tração (RT) por compressão diametral | | | | | |
|--|-------------|---------------|---------------------|----------------------|------------------------------|
| CP N° | Altura (cm) | Diâmetro (cm) | Teor de Emulsão (%) | R _T (MPa) | R _T (Médio) (MPa) |
| 10 | 6,63 | 10,00 | | 0,44 | |
| 11 | 6,55 | 10,16 | 8,5 | 0,44 | 0,44 |
| 12 | 6,64 | 10,08 | | 0,44 | |

| Fadiga à tensão controlada | | | | | | | |
|----------------------------|----------------|---------------|------------------------|--------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| CP N° | Espessura (cm) | Diâmetro (cm) | % R _T médio | Força* (kgf) | Def. esp. resiliente(ε _r) | Difer. Tensões** (MPa) | Número de aplicações da tensão |
| 13 | 6,58 | 10,18 | 40 | 188,83 | 0,0001089 | 0,700 | 255 |
| 14 | 6,65 | 10,12 | 35 | 166,00 | 0,0000953 | 0,620 | 499 |
| 15 | 6,57 | 10,15 | 30 | 140,99 | 0,0000817 | 0,530 | 504 |
| 16 | 6,66 | 10,16 | 25 | 119,22 | 0,0000681 | 0,440 | 591 |
| 17 | 6,67 | 10,16 | 20 | 95,52 | 0,0000545 | 0,350 | 949 |
| 18 | 6,70 | 10,31 | 15 | 73,03 | 0,0000408 | 0,260 | 1258 |

* Valor obtido aplicando-se a Eq. 9.

** 4 (RT_{médio})(%RT_{médio}).

e o valor encontrado no ensaio de peneiração (resíduo na peneira de 0,84 mm), % em peso de CAP, é e 0,1. Pela análise desses resultados, o mais crítico foi o de resíduo da peneiração, que ficou bem acima das exigências, o que, acredita-se, possa ser sanado com a realização mais criteriosa do ensaio.

Com relação à dosagem Marshall, observou-se que, quanto à estabilidade Marshall, independentemente do traço utilizado, todos os corpos de prova atenderam à exigência de apresentarem estabilidade mínima de 250 kgf para 75 golpes. Analisando a influência da massa específica aparente sobre a dosagem Marshall, observou-se que o valor obtido para o teor de 9,5% foi maior, inclusive superando o valor encontrado ao se trabalhar com o teor de 8,5%. Quanto à altura das amostras, empregadas na realização do ensaio Marshall, todos os corpos de prova ultrapassaram o limite de 63,5 mm \pm 1,3 mm, mesmo sendo submetidos à energia de compactação com 75 golpes.

Quanto à fluência, nenhum corpo de prova atendeu ao intervalo indicado na especificação. Fato esse que se deve à utilização de uma prensa Marshall do tipo não automatizada, o que dificultou o registro da fluência no momento da ruptura da amostra. No cálculo do teor de projeto, empregaram-se 10% de vazios, atendendo-se, assim, à recomendação de Santana (1993). Para pré-misturado a frio do tipo denso, deve-se trabalhar com uma porcentagem de vazios entre 9 e 15%.

Com relação aos ensaios de módulo de resiliência, observados os valores contidos na Tabela 2, verificou-se que eles variaram no intervalo de 1.180 a 1.838 MPa. Esses valores foram bem inferiores aos apresentados por Medina e Motta (2005), que empregaram dois tipos de CAP em camadas de *binder* e capa para misturas a quente.

Com relação ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, observando-se os valores contidos na Tabela 2 e comparando-os com os valores da referida resistência citados por Medina e Motta (2005), para misturas a quente, observou-se que para a função de capa a resistência à tração do PMF foi baixa e para a função de *binder*, os valores foram mais adequados.

Verifica-se, na Figura 3, que os valores encontrados para a vida de fadiga também se mostraram baixos. Para a maioria das diferenças de tensão aplicadas, foi inferior a 1.000 aplicações. A vida de fadiga x deformação permanente apresentou coeficiente de determinação

de 0,9165% e vida de fadiga x diferença de tensões, um coeficiente de determinação de 0,9097%. Estatisticamente, vale ressaltar que os modelos de regressão linear empregados para o ajuste de tais equações se mostraram adequados, em ambos os casos, uma vez que apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2) superiores a 90%, ou seja, aproximadamente 90% das variáveis dependentes são explicadas pelos regressores presentes nos modelos.

5. CONCLUSÕES

O material empregado nesta pesquisa, agregados e ligante, mostrou-se adequado à realização do trabalho.

Com relação à dosagem da mistura betuminosa a frio mediante o emprego do ensaio Marshall, com respeito à altura das amostras, recomenda-se rever a faixa granulométrica nas peneiras de 19,05 mm e 12,7 mm. Uma possibilidade é deixar 100% do material passar na peneira de 19 mm e definir uma faixa na peneira de 12,7 mm, para um expoente n da equação de Fuller-Talbot na faixa de 0,4 a 0,6 e manter a tolerância de \pm 7%. Quanto à estabilidade mínima, recomenda-se rever o limite citado na referida especificação e a utilização de uma prensa automatizada para realização do ensaio Marshall, para que o registro da fluência ocorra no exato momento da ruptura da amostra. Entretanto, vale ressaltar que esse parâmetro já está em desuso.

A precisão da estufa é outro fator importante a ser considerado na dosagem das misturas asfálticas, uma vez que pequenas variações de temperatura afetam, consideravelmente, os resultados. Esse efeito foi observado nos resultados do ensaio de estabilidade Marshall.

Com relação ao comportamento do material submetido aos ensaios de cargas estáticas e repetidas (resistência à tração, módulo de resiliência e fadiga), concluiu-se que os resultados foram consideravelmente inferiores aos das misturas a quente apresentados por Medina e Motta (2005). Os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, do pré-misturado a frio, indicaram que esse material é mais indicado para ser utilizado na função de *binder* (camada de ligação posicionada imediatamente abaixo da capa). Quanto à vida de fadiga, observou-se que as diferenças de tensão aplicadas foram, em sua maioria, inferiores a 1.000 aplicações.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de uma bolsa de Iniciação Científica; e à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, pela realização dos ensaios de resistência à tração e ensaios dinâmicos.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 248** - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: 2003a. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 53** - Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: 2003. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14491** - Emulsões Asfálticas – determinação da viscosidade Saybolt-Furol. Rio de Janeiro: 2007a. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14376** - Emulsões asfálticas - Determinação do resíduo asfáltico por evaporação. Rio de Janeiro: 2007b. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14393** - Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração. Rio de Janeiro: 1999. 3p.

BALBO, J.T. **Pavimentação Asfáltica – Materiais, Projeto e Restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BERNUCCI, L. B.; SOARES, J.B.; CERATTI, J.A.P.; MOTTA, L.M.G. **Pavimentação asfáltica básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS- ABEDA, 2008. 501p.

CNT Boletim Estatístico. 2011. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT%20PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%20C3%ADstico/BoletimEstatistico.Jan.2011.pdf>. Acesso em: 28-05-2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM- DNER. **Agregado graúdo -**

Adesividade ao ligante betuminoso. MT- Método de Ensaio, 078/94. Rio de Janeiro:1994a. 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM- DNER. **Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”**. Método de Ensaio, 035/98. Rio de Janeiro: 1998a. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM- DNER. **Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Método de Ensaio, 194/98. Rio de Janeiro: 1998b. 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM- DNER. **Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica - ensaio Marshall**. Método de Ensaio, 107/94. Rio de Janeiro: 1994a. 9p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. **Pavimentação asfáltica - misturas asfálticas - determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Método de Ensaio, 136/2010. Rio de Janeiro: 2010b. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. **Pavimentação Asfáltica - Prémisturado a frio com emulsão asfáltica catiônica convencional**. Especificação de Serviço, 153/2010, Rio de Janeiro: 2010a. 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico**. Especificação de Serviço, 031/2006. Rio de Janeiro: 2006. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. **Emulsão asfáltica -determinação da carga da partícula**. Método de Ensaio, 156/2011. Rio de Janeiro: 2011. 7p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO - IBP. **Informações básicas sobre materiais asfálticos**. 6.ed. Rio de Janeiro: 1999. 76p.

Revista *Árvore*, Viçosa-MG, v.40, n.1, p.97-106, 2016

MACHADO, C. C.; SANTANNA, G. L.; LIMA, C. D.; CARVALHO, C. A.; PEREIRA, R. S.; FERNANDES, D. C. M. Comportamento geotécnico de misturas granulométricas de solo-grits. **Revista Árvore**, v.33, n.3, p.555-562, 2009.

MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; PIRES, J. M. M. Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial (grits) na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, p. 543-550, 2003.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 2ª.ed. Rio de Janeiro: 2005. 570 p.

MENDES, L. O. **Utilização do método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas**. 2011.130f. Tese (Mestrado em Ambiente Construído)- Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

SANTANA, H. **Manual de prémistura a frio**. Rio de Janeiro: IBP/Comissão de Asfalto, 1993. 298 p.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997. 746 p.

SILVA, T. O.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; CALIJURI, M. L.; MACHADO, C. C. Influência do tráfego de veículos comerciais em rodovias vicinais não pavimentadas: estudo de caso aplicado à VCS 346, Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v.35, n.3, p.539-545, 2011a.

SILVA, T. O.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; CALIJURI, M. L.; MACHADO, C. C.; OLIVEIRA, T. M. Avaliação do subleito de rodovias vicinais de baixo volume de tráfego por meio de ensaios geotécnicos. **Revista Árvore**, v.35, n.4, p.825-833, 2011b.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. New York: John Wiley & Sons, 1975. 711p.