

ESTUDO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS E HORIZONTAIS EM CORPOS-DE-PROVA MARSHALL EM ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Edson de Moura
Liedi Légi Bariani Bernucci

Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento dos deslocamentos horizontais e verticais medidos em corpos de prova de mistura asfáltica tipo Marshall durante a aplicação de carga nos ensaios de resistência à tração e de módulo de resiliência. As misturas asfálticas estudadas foram usinadas na faixa IV-b do Instituto do Asfalto com três diferentes ligantes: CAP-20, modificado com 4% SBS e modificado com borracha de pneu moído. Nos dois ensaios realizados observa-se uma relação não linear entre os deslocamentos; os deslocamentos horizontais iniciam-se quando boa parcela dos deslocamentos verticais já ocorreu. Os resultados indicam a necessidade de adaptar os procedimentos adotados na realização desses ensaios, visando melhor representar as condições a que as misturas asfálticas são submetidas quando em serviço.

ABSTRACT

The objective of the paper is to analyze the behavior of the vertical and horizontal displacements measured in Marshall specimens of asphalt mixes when submitted to the indirect tensile test and the resilient modulus test. The asphalt mixes studied are classified as IVb-IA according to Asphalt Institute specifications, using three different binders: AC 20, asphalt modified by 4% SBS, and asphalt-rubber. In both tests, a non linear relation is observed between the displacements; horizontal displacements start after the major part of vertical displacements have occurred. The results indicate the need to adapt current test procedures, aiming to better represent conditions of asphalt mixes in the field.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais utilizados, nos mais diversos ramos da engenharia, normalmente são previamente submetidos a ensaios que avaliam as propriedades mecânicas fundamentais: rigidez, dureza, elasticidade, plasticidade, entre outras.

Em pavimentação quando o objetivo é a verificação de como esses materiais se comportam dentro de uma estrutura de pavimento, os parâmetros: dureza, elasticidade, plasticidade e energia armazenada são relevantes, embora, contribuam em menor escala para a caracterização dos materiais. Já o parâmetro rigidez e a capacidade de distribuição das tensões fornecem características importantes do comportamento desses materiais.

A rigidez de um material é a capacidade do material de resistir à deformação sob a ação de uma carga. É determinada pela relação entre a tensão (σ) e o deslocamento (ϵ); no regime linear é denominada de módulo de elasticidade E , também chamada de módulo de *Young*.

Outro parâmetro que caracteriza os materiais é o coeficiente de Poisson. Quando um material é submetido a uma tensão (σ) de tração ou compressão, a deformação que ocorre na direção da força aplicada é denominada de deformação axial (ϵ). Ocorrem também, devido a tensões de tração ou compressão, deformações perpendiculares à direção da força aplicada denominada de deformação lateral ($\Delta r/r$). O coeficiente de Poisson é dado pela expressão:

$$\mu = \frac{\Delta r / r}{\varepsilon} \quad (1)$$

Os pavimentos são estruturas assentes sobre o subleito que têm a função de suportar as cargas dos veículos e oferecer segurança e conforto ao usuário. Essas estruturas vencem grandes distâncias estando submetidas a grandes variações climáticas, de relevo, por vezes de materiais de sua estrutura e de tráfego. Assim, a estrutura do pavimento está sujeita a solicitações bastante complexas. Para efetuar os ensaios em materiais, as condições de ensaio em laboratórios brasileiros são ainda relativamente simples. Pesquisas que envolvam equipamentos e condições de ensaio que forneçam resultados mais representativos da realidade de campo tornam os estudos mais dispendiosos. No Brasil, os ensaios em misturas asfálticas são realizados geralmente, por simplicidade e tradição, com corpos-de-prova moldados no equipamento Marshall. Os ensaios destinados a medirem as propriedades mecânicas fundamentais nesses corpos-de-prova são os de resistência à tração por compressão diametral, de módulo de resiliência e de vida de fadiga.

Entre os defeitos comumente encontrados nos pavimentos brasileiros, sem dúvida, o trincamento precoce como resultado da fadiga de misturas asfálticas tem sido o mais predominante (Pinto e Preussler, 2002). O ensaio laboratorial de resistência à tração por compressão diametral, norma DNER-ME-138-94 – Misturas Betuminosas Determinação de Resistência à Tração por Compressão Diametral, tipo de ensaio originalmente desenvolvido por Lobo Carneiro para concreto de cimento, tem como resultado o valor da resistência que o material oferece quando submetido à compressão, rompendo por tração; este ensaio é conhecido em muitos centros de pesquisa no exterior por “ensaio brasileiro” (Medina, 1997).

Um dos parâmetros mecânicos empregados para prever e limitar o trincamento precoce em camadas de misturas asfálticas é a resistência à tração no revestimento. A consideração desse valor é de fundamental importância para projetos de recuperação como também de novos pavimentos. Quando da escolha de uma mistura asfáltica a ser utilizada em um pavimento, a sua capacidade de resistir a esforços de tração deve necessariamente ser bastante superior às tensões de tração a que vão ser submetidos os revestimentos quando em serviço.

Para a obtenção do valor de resistência à tração por compressão diametral, aplica-se a expressão:

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

onde: σ_t = resistência à tração por compressão diametral (MPa)

F = força aplicada para a ruptura (N)

H = altura do corpo-de-prova (mm)

D = diâmetro do corpo-de-prova (mm)

O ensaio consiste na aplicação da carga com uma prensa, com velocidade de carregamento de 50 mm/min, que são transmitidas ao corpo-de-prova Marshall moldado em laboratório ou extraídos de pista, através de um suporte munido de dois frisos diametralmente opostos, dispostos longitudinalmente à geratriz do corpo-de-prova com largura 12,7 mm.

Para a determinação do valor de módulo de resiliência utiliza-se o mesmo suporte do ensaio de resistência à tração por compressão diametral; entretanto, a aplicação da carga é cíclica, conforme especificado pelas normas ASTM-D 4123-82, AASHTO TP31-96 e DNER-ME 133/94. O tempo de aplicação da carga é de 0,1s e tempo de repouso 0,9s resultando em ciclos de 1 Hz. Conforme especificado pela norma DNER-ME 133/94, a carga a ser aplicada para determinação do módulo de resiliência é de 30% da carga necessária para a ruptura do corpo-de-prova, determinada a priori no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Já a norma da AASHTO TP31-96 preconiza uma carga suficiente para imprimir um deslocamento horizontal mensurável pelos dispositivos de medidas, não devendo exceder 20% da carga de ruptura.

No ensaio de módulo de resiliência a intensidade da carga aplicada apresenta-se como um fator decisivo no valor de módulo obtido. É recomendável caracterizar a mistura asfáltica em uma tensão padrão de 15% da tensão de tração, conforme é relatado por (Brown e Foo, 1989).

O objetivo deste trabalho é mostrar os deslocamentos verticais e horizontais que ocorrem durante a realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e também no ensaio de módulo de resiliência e relatar a influência desses deslocamentos nos resultados desses ensaios. Conforme mencionado anteriormente, o suporte utilizado nestes ensaios possui dois frisos dispostos diametralmente opostos. Segundo Falcão e Soares, (2002), a largura desses frisos, que é normalizado em 12,7 mm, tem influência nos valores de resistência à tração; concluem esses autores que devido à largura, ocorre primeiro um esmagamento na região de contato e só depois é que a carga mobiliza tensões de tração no corpo-de-prova.

2. RESULTADOS DE LABORATÓRIO

2.1. Materiais Utilizados

O estudo laboratorial foi feito com três tipos de ligantes asfálticos: um tipo convencional denominado de CAP-20, o segundo modificado por 4% de polímero SBS e o terceiro modificado por borracha de pneu moído (BPM). A faixa granulométrica adotada para moldagem dos corpos-de-prova foi a IVb-do Instituto do Asfalto.

Foram moldados um total de 11 corpos-de-prova tipo Marshall com 75 golpes por face para cada tipo de ligante asfáltico no teor de projeto de 5,5%, correspondente a aproximadamente 4% de vazios. No caso do BPM, para manter os 4% de vazios, utilizou-se 0,2% a mais de ligante. A massa de misturas asfálticas utilizada para a moldagem de cada corpo-de-prova foi retirada de uma única porção, ou seja, foi usinada uma única quantidade de mistura asfáltica, para cada ligante, suficiente para a moldagem dos 11 corpos-de-prova. Após a

usinagem a mistura ficou em uma estufa para atingir a temperatura de usinagem. A Tabela 1 mostra algumas características dos ligantes asfálticos utilizados nesse estudo.

Tabela 1: Algumas características dos ligantes asfálticos utilizados

| Ensaio | Tipo de ligante asfáltico | | | | | |
|--|---------------------------|---|------------|--------------------------|------------|--------------------------|
| | CAP-20 | | 4% de SBS | | BPM | |
| | Resultados | Especificação DNC 01/92 Revisão 02* | Resultados | DNER- EM- 396/99** | Resultados | Especificação DNER-ME |
| Ponto de Amolecimento °C | | | 75 | 60/85 | 49 | anotar |
| Penetração (mm) | 53 | 50 mín. | 52 | 45 mín. | 50 | 50 mín |
| Ductibilidade (cm) | > 20 | 20 mín | > 100 | 100 mín | -o- | -o- |
| Viscosidade SSF – 135°C (s) | 191,9 | 120 mín. | -o- | -o- | | |
| Viscosidade Brookfield a 135°C cP | | 2000/3500 | 1177 | | 382 | |
| Viscosidade Brookfield a 155°C cP / 175°C cP | | | | | 150/70 | |
| Recuperação Elástica a 25°C | | | 90,9 | 80 mín. | | |

(*) Especificação técnica para o CAP, classificação por viscosidade (Regulamento técnico-DNC 1/92- Revisão 02).

(**) Especificação técnica para o cimento asfáltico modificado por polímero (DNER-EM 369/99).

O agregado utilizado é de origem granítica e a distribuição granulométrica é mostrada na Figura 1.

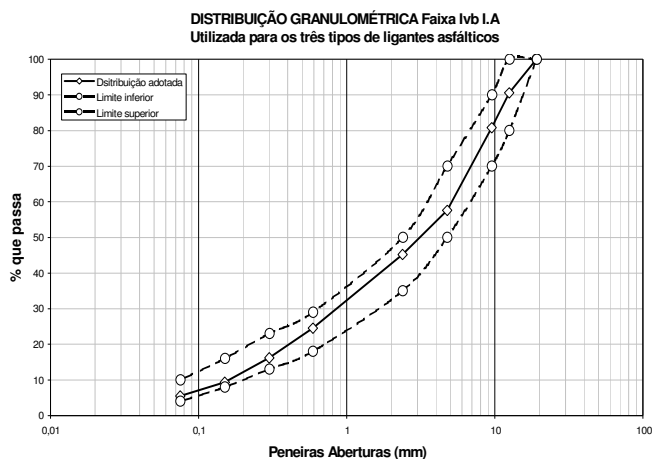


Figura 1: Distribuição Granulométrica e faixa IVb do Instituto do Asfalto

2.2. Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral, conforme preconiza a norma DNER-ME-138-94, foram realizados em três corpos-de-prova para cada tipo de ligante

asfáltico empregado. Os ensaios foram conduzidos à temperatura de 25 °C. Os resultados apresentados na Figura 2 foram obtidos em três corpos-de-prova selecionados como representativos, um para cada ligante asfáltico.

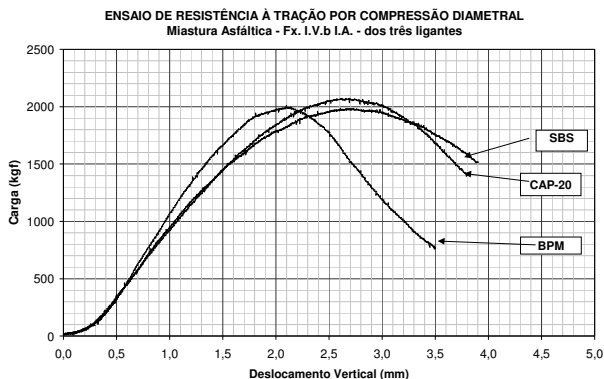


Figura 2: Resultados das cargas necessárias para a ruptura dos corpos-de-prova.

Durante a realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos três ligantes, os corpos-de-prova foram instrumentados de maneira a se obter também os deslocamentos horizontais. Para esses deslocamentos foi utilizado um LVDT (*linear variable differential transducers*) da mesma forma que normalmente se utiliza para a obtenção dos deslocamentos horizontais registrados no ensaio de módulo de resiliência. A precisão do LVDT utilizado foi de 0,02 mm. Os deslocamentos verticais foram obtidos através da velocidade de avanço da prensa – 50mm/min.

Na análise dos dados obtidos verificou-se que os deslocamentos verticais distanciavam-se muito em magnitude dos deslocamentos horizontais durante a aplicação da carga, ou seja, o incremento do deslocamento vertical era muito superior ao do deslocamento horizontal, caracterizando-se relações não-lineares entre os deslocamentos. Observou-se também que boa parcela do deslocamento vertical é a redução do diâmetro do corpo-de-prova ocasionada pelo esmagamento dos frisos, conforme também foi realçado por Falcão e Soares (2002).

No intuito de reduzir o efeito desse esmagamento e obter deslocamentos verticais que ocorressem ao longo de toda superfície vertical de aplicação da carga, optou-se, então, por reduzir a velocidade de avanço da prensa de 50 mm/min, conforme especificado pela norma DNER-ME-138-94, para 1,0 mm/min. As Figuras 3 e 4 evidenciam a diferença de comportamento e da redução da ocorrência de esmagamento no caso de menor velocidade de ensaio.



Figura 3: Esmagamento do cp com velocidade de ensaio de 1 mm/min

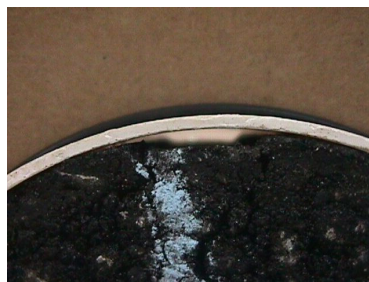


Figura 4: Esmagamento do cp com velocidade de ensaio de 50 mm/min

Os valores dos deslocamentos horizontais medidos sofreram pouca variação devido à redução da velocidade de avanço da prensa. Já os deslocamentos verticais tiveram uma redução significativa, principalmente para os ligantes tipo CAP-20 e modificado por SBS dada a redução da parcela devido ao esmagamento. São apresentados nas Figuras 5, 6 e 7 a diferença de deslocamentos registrados utilizando as duas velocidades de ensaio para os três ligantes empregados no estudo. Observe-se que, para os três ligantes a redução da velocidade de avanço da prensa de 50mm/min para 1,0mm/min houve uma redução significativa da carga de ruptura.

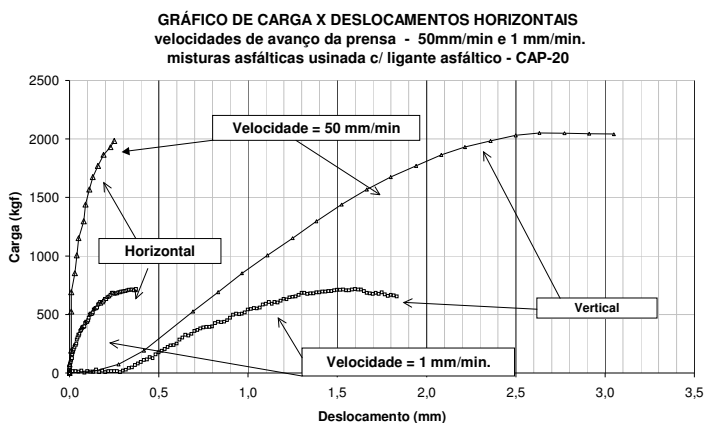


Figura 5: Deslocamentos Verticais e Horizontais registrados para a mistura asfáltica com CAP-20

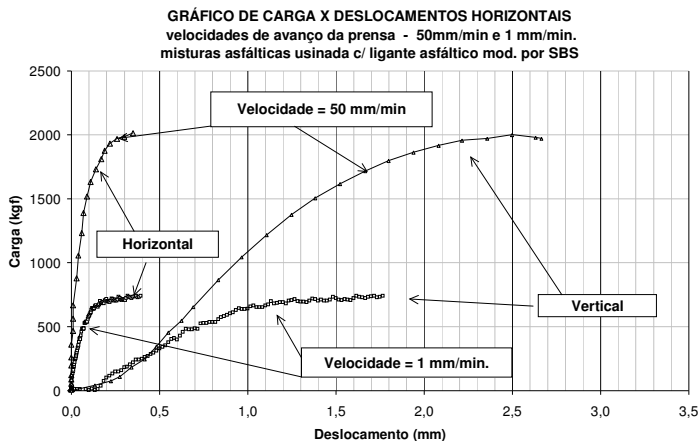


Figura 6: Deslocamentos Verticais e Horizontais registrados para a mistura asfáltica com polímero SBS

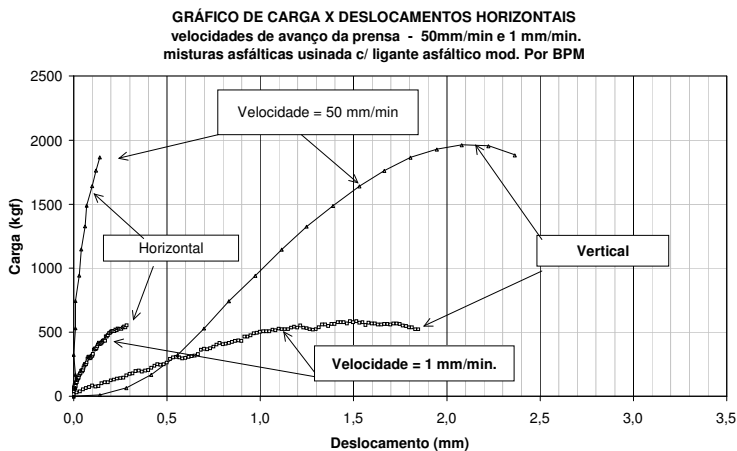


Figura 7: Deslocamentos Verticais e Horizontais registrados para a mistura asfáltica com BPM

2.3. Módulo de resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência foram conduzidos conforme o que preconiza a norma ASTM-D 4123-82, com velocidade aplicação de carga de 0,1s e tempo de repouso de 0,9s, resultando em uma frequência de aplicação de carga de 1 Hz. Nesse estudo, a carga aplicada variou de 10% até 40% da carga necessária para a ruptura do corpo-de-prova, determinada a

priori no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Foram registrados os deslocamentos verticais e horizontais máximos para cada nível de carga utilizada e foi locado em um gráfico para verificação de como os valores são influenciados para esses níveis de carga. Os resultados estão apresentados na Figura 8.

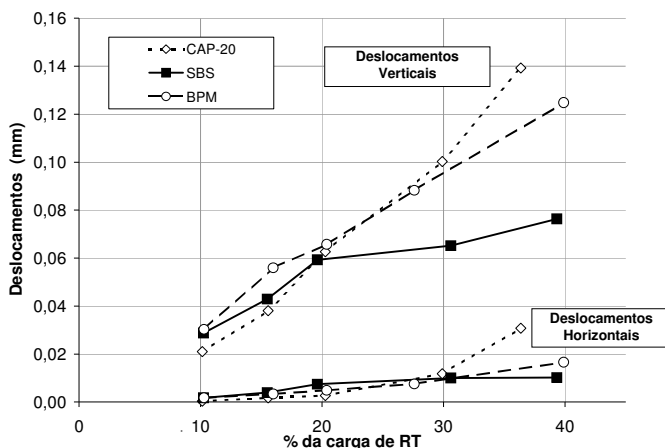


Figura 8: Deslocamentos verticais e horizontais *versus* percentagem da carga aplicada durante o ensaio de módulo de resiliência.

Na Figura 9 são mostrados os valores de módulo de resiliência em função da percentagem da carga da carga de ruptura. Os ensaios foram conduzidos à temperatura de ensaio de 25°C, e ficaram em câmara climatizada por no mínimo seis horas. Os deslocamentos horizontais recuperáveis instantâneos foram registrados após 60 ciclos de carga, obtidos conforme preconiza a norma ASTM D 4123-82.

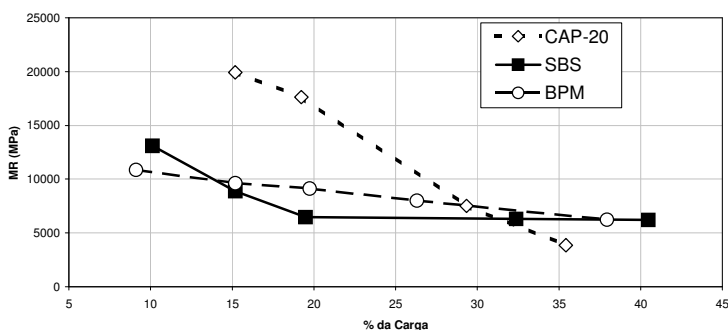


Figura 9: Módulo de resiliência *versus* percentagem da carga de ruptura aplicada

Os deslocamentos verticais foram obtidos com a instalação de um LVDT na mesma direção da aplicação da carga. Na Figura 10, a título de ilustração, são mostradas a forma e a intensidade dos deslocamentos verticais e horizontais dependendo da magnitude da carga aplicada.

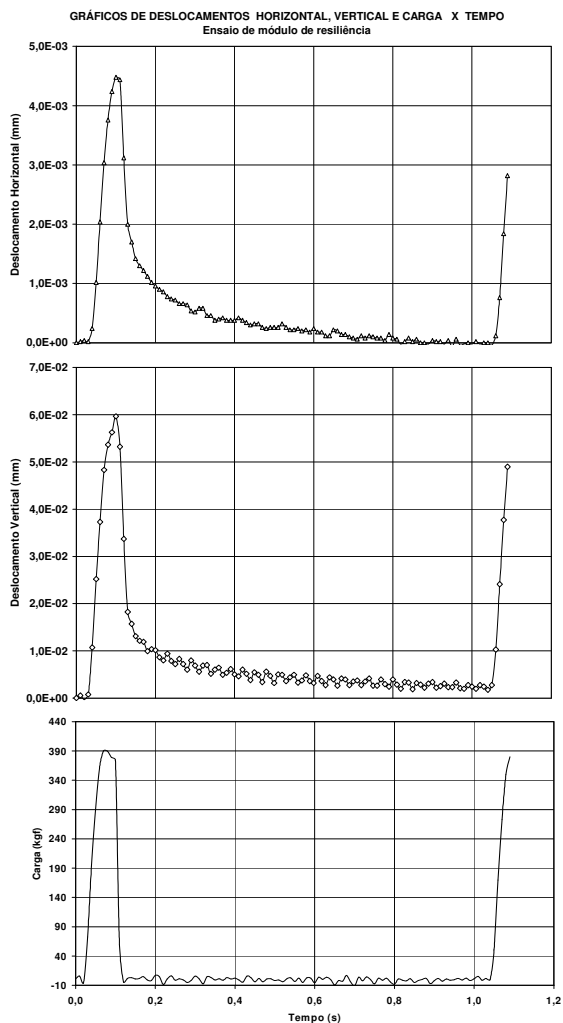


Figura 10: Deslocamentos verticais, horizontais e a carga aplicada *versus* tempo no ensaio de módulo de resiliência.

3. COMENTÁRIOS

3.1. Resistência à tração por compressão diametral

Os valores de resistência à tração por compressão diametral obtidos para os três ligantes asfálticos em duas velocidade de avanço da prensa constam da Tabela 2.

Tabela 2: Resultados do RT dos três ligantes asfálticos para as duas velocidades de avanço

| Tipo de Ligante asfáltico | Resistência à tração por compressão diametral (MPa) | |
|---------------------------|---|-------------|
| | Velocidade de avanço da prensa | |
| | 1,0 mm/min | 50,0 mm/min |
| CAP-20 | 0,70 | 2,02 |
| Modificado por SBS | 0,72 | 1,98 |
| Modificado por BPM | 0,58 | 1,94 |

As diferenças nos valores de resistência à tração por compressão diametral encontradas estão diretamente ligadas à velocidade com que os corpos-de-prova foram rompidos. Em uma velocidade baixa, de 1,0mm/min, o corpo-de-prova tem tempo de relaxação, ou seja, a viscoelasticidade do ligante asfáltico permite com que a parte pétrea do corpo-de-prova se mova ocasionando uma baixa resistência. O mesmo não ocorre para velocidades maiores, como a normalizada de 50mm/min, não existindo tempo hábil para ocorrer a relaxação do corpo-de-prova, o que resulta em uma maior resistência do material.

Observe-se que a forma das curvas de tensão *versus* deslocamento vertical para os três ligantes asfálticos, na velocidade preconizada em norma, possuem a mesma forma de desenvolvimento; já para os deslocamentos horizontais, para mesma velocidade, a forma das curvas não são as mesmas. Esse fato pode estar associado às características viscoelásticas dos ligantes asfálticos, uma vez que esses deslocamentos são resultados do sistema bi-axial de tensões.

Para a velocidade inferior à preconizada em norma, de 1,0mm/min, não é bem definido o pico de ruptura, quando se considera os deslocamentos verticais. Entre 30% e 40% da carga de ruptura começou-se a registrar valores de deslocamentos horizontais, o que anteriormente não foi possível. No ensaio de resistência à tração por compressão diametral os deslocamentos verticais e horizontais não se apresentam com correspondência direta quanto aos seus incrementos, ocorrendo variações desiguais com o aumento da carga aplicada.

3.2. Módulo de resiliência

Semelhante ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral o ensaio de módulo de resiliência apresenta deslocamentos verticais e horizontais também de relação não-linear. Observe-se na Figura 8 que conforme a magnitude da carga foi aumentando a diferença entre os deslocamentos também foi aumentando. Embora a aplicação da carga nesse ensaio seja cíclica de 0,1s, é suficientemente capaz de imprimir um efeito de inércia ao corpo-de-prova,

ocasionando efeitos de deslocamentos ao corpo-de-prova semelhante ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Uma vez que, os deslocamentos não são lineares com o aumento da carga, os valores de módulo de resiliência são afetados diretamente pela magnitude da carga.

O procedimento de ensaio recomendado pela ASTM-D 4123-82 especifica que se deve obter também os deslocamentos verticais durante a realização do ensaio de módulo de resiliência. Provavelmente, e ainda carente de estudos, o coeficiente de Poisson apresente variações em função da carga, uma vez que se trata de um material viscoelástico.

4. CONCLUSÕES E DISCUSSÃO

Conforme exposto neste trabalho, os deslocamentos verticais e horizontais apresentam-se relação não-linear tanto nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral como também no ensaio de módulo de resiliência. Devido a este fato, recomenda-se medir os deslocamentos verticais durante a realização do ensaio de módulo de resiliência, conforme preconiza a norma ASTM D 4123-82, para a avaliação da possível variação do coeficiente de Poisson dependendo do nível de tensão aplicada no ensaio.

Conclui-se também que a influência carga é significativa na determinação do valor de módulo de resiliência. A carga deve estar situada próxima a 15% da carga de ruptura à tração no ensaio de compressão diametral, uma vez que os deslocamentos horizontais no ensaio de módulo de resiliência já estão mobilizados com esta magnitude de carga. Observe-se, no entanto, que em ensaio estático de resistência à tração por compressão diametral, os deslocamentos horizontais só começam a ser registrados com cargas próximas a 30% da carga de ruptura.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado em corpos-de-prova tipo Marshall, como preconiza a norma DNER-ME-138-94, fornece valores de resistência calculados quando a ruptura em local previamente estabelecido, não necessariamente na face menos favorável de resistência do corpo-de-prova. Outra consideração a ser tecida é acerca da diferença de solicitação atuante na camada do pavimento quando solicitada pela ação do tráfego, ocorrendo tensão de tração por flexão. Além disso, a frequência de carregamento e o tempo de aplicação de carga devem ser cuidadosamente considerados; como visto nesse trabalho a influência da velocidade da aplicação da carga na determinação do valor da resistência à tração é significativa. Da mesma forma, deve-se considerar estas variações no ensaio de módulo de resiliência.

Como a tensão de tração é um parâmetro bastante importante tanto para projeto como para controle de obras, os autores sugerem que sejam feitos estudos em corpos-de-prova de outras dimensões, com corpos-de-prova cilíndricos de maior diâmetro ou ainda com vigotas moldadas em laboratório ou extraídas de campo, variando a forma e a velocidade de solicitação de carga, além de empregar estudos de ensaios que determinem a resistência à tração direta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO TP31-96 (2000) *Standart Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Estados Unidos.
- ASTM D-4123-82 (1995) *Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. American Society Testing and Materials, Estados Unidos.
- Brown, E.R e K. Y. Foo (1989) Evaluation of Variability in Rasilient Modulus Test Results (ASTM 4123), *National Center for Asphalt Technology of Alburn University*, Report n.91-6. Estados Unidos.
- DNER-ME-133-94 (2002) *Misturas Betuminosos Determinação de Módulo de Resiliência*, DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER-ME-138-94 (2002) *Misturas Betuminosos Determinação de Resistência à Tração por Compressão Diametral*, DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- Falcão, M.F.B. e J.B.Soures (2002) Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. *XVI Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, ANPET*, Natal, v. 1, p. 169-181.
- Medina, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*. Ed. UFRJ, Rio de Janeiro.
- Pinto, S. e E. Preussler (2002) *Pavimentação Rodoviária Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis*. Ed. Copiarte, Rio Janeiro.

Endereço dos autores

Escola Politécnica da USP
Depto de Engenharia de Transportes
Av. Prof. Almeida Prado, Trav. II n. 83
Cidade Universitária – Butantã – SP
CEP-05508-900
Edson de Moura – edmoura@usp.br
Liedi L. B. Bernucci – liedi@usp.br

Fone – (0xx11) 3091-5213
Fax - (0xx11) 3091-5716