

Indicadores do desempenho de misturas asfálticas determinados através do ensaio de compressão diametral

Lélio Antônio Teixeira Brito¹; Jorge Augusto Pereira Ceratti²; Daniel Ramos Victorino³

Resumo: Os ensaios de compressão diametral são amplamente usados no Brasil para determinação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas, tanto através de ensaios monotônicos para determinação da resistência à tração, quanto sob carregamentos cíclicos para determinação do módulo de resiliência e da vida de fadiga. Este trabalho teve como objetivo mostrar que com instrumentação adequada destes ensaios, indicadores adicionais àqueles usualmente determinados podem ser obtidos. A energia mobilizada durante o ensaio de resistência à tração, bem como o monitoramento da rigidez ao longo do ensaio de fadiga e a defasagem medida entre o pulso de carga e o deslocamento no ensaio de módulo de resiliência, mostram-se promissores para este propósito.

Abstract: Indirect tensile test (IDT) are broadly used in Brazil for the assessment of mechanical properties of asphalt mixes, not only under monotonic loading to determine the tensile strength, but also under cyclic loading to determine resilient modulus and fatigue life. This study tries to demonstrate that with adequate instrumentation of these tests, additional indicators to those usually determined are possible to be obtained. The mobilized energy during the IDT test, as well as the monitoring of the stiffness during the fatigue test and the phase lag measured between load and displacement pulses in the resilient modulus test are promising for this purpose.

1. INTRODUÇÃO

Ensaio cada vez mais complexo são usados na determinação de propriedades intrínsecas dos materiais asfálticos, tanto para determinação de suas propriedades mecânicas, quanto para previsão de desempenho em campo. Grande parte destes ensaios, entretanto, necessita de um grande aporte financeiro para a aquisição de equipamento e operação, e só se tornam efetivamente aplicáveis após um grande período de estudos e análises, após o qual pesquisadores e membros da indústria nacional e/ou local conseguem transpor o conhecimento do estado-da-arte para a prática.

Brown (2007) faz um relato sobre o novo Guia de Projeto de Pavimentos Empírico-Mecânico elaborado pelo Projeto NCHRP 1-37(A), difundido largamente como Guia AASHTO 2002. O autor ressalta que três graus de hierarquia foram estabelecidos para a entrada de dados: alto nível de confiabilidade, médio nível de confiabilidade e baixo nível de confiabilidade; este último pré-supõe várias correlações para os parâmetros mais complexos considerados pela metodologia. Brown reitera ainda que atualmente a maior parte das análises é realizada em baixo nível de confi-

abilidade, dado a grande complexidade dos modelos constituintes e também de suas sensibilidades aos fatores de calibração laboratório-campo, ainda pouco explorados.

Como exemplo, Ping (2007) relata que o referido guia AASHTO 2002 prevê o uso do módulo complexo dinâmico como protocolo de testes primário para caracterização de concretos asfálticos, mas que o Estado da Flórida nos EUA, possui um vasto banco de dados apenas baseado em módulo de resiliência (MR) – o qual creditam como sendo um teste rápido e confiável. Para estudar a relação entre MR e módulo complexo, a Universidade do Estado da Flórida desenvolveu a pesquisa BC352-12. Ping afirma no relatório do projeto que a expansão do banco de dados de módulo dinâmico complexo é necessária antes que se proceda à implementação do novo guia da AASHTO pelos órgãos do estado norte-americano.

O Brasil empenha-se, há longa data, em estabelecer e refinar modelos de previsão de desempenho baseados, em essência, em ensaios já amplamente difundidos nas instituições de pesquisas nacionais, como o módulo de resiliência sob compressão diametral, a resistência à tração indireta, a vida de fadiga por compressão diametral, a compressão uniaxial, entre outros. São vários os modelos de previsão de desempenho de pavimentos já desenvolvidos baseados em bancos de dados coletados por diversas instituições.

Desde seu surgimento, assim como o constante desenvolvimento dos vários meios tecnológicos, os equipamentos para ensaios de compressão diametral por cargas repetidas já passaram por diversos estágios de aprimoramento, e com eles, várias foram as modificações dos protocolos de ensaio. A evolução na instru-

¹ **Lélio Antônio Teixeira Brito**, Nottingham Transportation Engineering Centre – NTEC/University of Nottingham. (e-mail: leliobrito@gmail.com).

² **Jorge Augusto Pereira Ceratti**, Laboratório de Pavimentação – UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil (e-mail: lepav1@cpgec.ufrgs.br).

³ **Daniel Ramos Victorino**, Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre – CONCEPA. Porto Alegre, RS, Brasil (e-mail: daniel@concepa.com.br).

mentação eletrônica laboratorial, por viabilizar testes cada vez mais minuciosos, precisos e confiáveis, disponibiliza uma gama de recursos não presentes até alguns anos atrás, fazendo deste ensaio uma proposta simples e atrativa para diversas pesquisas sobre as propriedades mecânicas de misturas betuminosas.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo mostrar que o ensaio de compressão diametral para misturas betuminosas – tanto em carregamento cíclico quanto monotônico – pode ser não só uma excelente ferramenta para análise das propriedades elásticas clássicas, como já é aplicado, mas também uma alternativa para pesquisas de energia dissipada durante o ensaio de fadiga e de resistência à tração. Pode servir também como um forte indicador de propriedades visco-elásticas, durante o ensaio para determinação do módulo de resiliência, através da análise do módulo de resiliência total e instantâneo e da defasagem entre o pulso de carga e deslocamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ensaio de compressão diametral foi desenvolvido por Lobo Carneiro, em 1943, para a determinação da resistência à tração indireta (RT) de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland. Posteriormente foi adaptado para outros materiais, entre eles, os materiais de pavimentação. Há vários motivos para este ensaio ter sido considerado por muitos pesquisadores como um dos mais indicados à avaliação das características resilientes de misturas asfálticas. Entre eles, Queiroz e Visser (1978), Preussler (1983) e Barksdale *et al.* (1997) citam: a facilidade de execução do ensaio e obtenção das amostras, o fato da ruptura não ser seriamente afetada pelas condições superficiais, e também por simular o estado de tensão na parte inferior da camada asfáltica de um pavimento, que é uma zona de tração.

Em contraponto às suas vantagens, Kim e Wen (2002) ressaltam algumas desvantagens deste ensaio: a deformação permanente junto aos frisos de carregamento é indesejável para a avaliação do potencial de fissuração das misturas asfálticas, os ensaios só devem ser feitos sob tensão-controlada e a distribuição de deformações no centro da amostra é razoavelmente não-linear. Retificam, entretanto, que os erros na medição de deslocamentos podem ser superados com disposição e vãos adequados no posicionamento dos sensores. Dizem ainda os autores que a questão de deformação-controlada versus tensão-controlada pode vir a ser superada caso um modelo real do material possa ser desenvolvido. A terceira desvantagem mencionada também pode ser superada através do uso de soluções teóricas apropriadas.

Este ensaio é correntemente utilizado nos laborató-

rios de pesquisa de materiais para pavimentação no Brasil para execução dos seguintes ensaios: ensaio de resistência à tração indireta, ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral cíclica e ensaio de fadiga à compressão diametral cíclica.

2.1. Resistência à tração por compressão diametral

Alguns estudos investigam parâmetros adicionais à-queles corriqueiramente determinados a partir do ensaio de RT, buscando indicadores do desempenho de misturas asfálticas em função da energia de fratura mobilizada – este parâmetro é usualmente correlacionado à curva tensão-deformação desenvolvida durante a ruptura da amostra. Hugo e Nachenius (1989), Rowe (1996) e Kim e Wen (2002) fizeram avanços sobre este tema.

Hugo e Nachenius (1989) desenvolveram um método para medição das deformações de tração durante o ensaio de RT. As curvas obtidas foram de particular interesse para análise da misturas com asfalto-borracha (AB), tendo em vista que a característica principal de projeto da mesma é a absorção de deformações relativamente altas com baixo índice de fissuração. A principal idéia trazida no estudo é que a área sob a curva tensão *versus* deformação até o pico de tensão é um indicador da energia requerida para atingir a resistência à tração. Identificam em conclusão ao estudo que as medidas realizadas durante o ensaio de RT foram úteis na identificação de diferenças entre os asfaltos estudados. Reiteram, que a reprodutibilidade do ensaio pode ser afetada dependendo do elemento de volume representativo – função do vão entre os pontos de apoio do LVDT e o tamanho máximo de agregado da mistura.

Kim e Wen (2002) apresentam um estudo sobre a energia de fratura determinada no ensaio de RT como um simples indicador de performance de trincamento por fadiga de misturas asfálticas, correlacionando ensaios de laboratório com o desempenho de pavimentos durante ensaios acelerados. Os autores determinaram, a partir do ensaio de RT, a tensão de tração última, a deformação horizontal central durante o pico de carregamento e a energia de fratura até a ruptura; com resultados de ensaio de deformação permanente também à compressão diametral, determinam os parâmetros da função de fluência a 200s e o valor-n (a rampa da porção linear na curva da função de fluência-tempo em escala logarítmica). Como resultado da pesquisa, os autores indicam que a RT e a deformação durante o pico de carregamento não servem como indicadores de resistência à fadiga, mas que a correlação entre energia de fratura determinada no ensaio de RT e o trincamento por fadiga é muito bom.

2.2. Comportamento à fadiga de misturas betuminosas

Os métodos de dimensionamento de um pavimento consistem, em parte, em impedir a propagação de uma fissura proveniente das camadas subjacentes até a superfície do pavimento e, assim, projetar a espessura de material necessária considerando a ação do tráfego e a característica dos materiais utilizados. Com efeito, o dimensionamento das camadas asfálticas de um pavimento é baseado, sobretudo, em estudos experimentais de ensaios de fadiga.

Os ensaios de fadiga em laboratório mais usados são o ensaio de tração/compressão em corpos-de-prova cilíndricos, ensaio de flexão em dois, três ou quatro pontos ou, ainda, através de ensaios por compressão diametral. Este último é o mais comumente usado no Brasil.

Realiza-se a caracterização do comportamento à fadiga de misturas asfálticas como função da tensão de tração aplicada e da deformação de tração inicial. Rowe (1996), Bodin (2002) e Di Benedetto *et al.* (2004), entretanto, descrevem outros modelos de fadiga que levam em conta modelos baseados na teoria do dano – função da quantidade de energia dissipada por ciclo de carregamento ao longo da vida de fadiga. Os autores afirmam que estes modelos são promissores e que modelagens alternativas podem melhor caracterizar a vida de fadiga, ainda que nem todos os problemas estejam resolvidos.

A energia dissipada em misturas asfálticas durante o carregamento e a relaxação são função do comportamento preponderantemente visco-elástico do material à temperatura ambiente. A dissipação de energia é demonstrada esquematicamente na Figura 1. Num material elástico, a energia armazenada no sistema (quando carregada) é igual à área sob a curva tensão-deformação e, durante o descarregamento, toda a energia é recuperada. Já um material visco-elástico, quando descarregado, traça um caminho diferente de quando do seu carregamento. Este fenômeno é comumente conhecido como histerese, e a energia dissipada é equivalente à área dentro do laço histerético (*hysteresis loop*) (Rowe, 1996).

Apesar da deterioração ser um resultado da iniciação e da propagação do dano, outros fenômenos, que

não devem ser interpretados como fadiga, podem contribuir para a redução da rigidez durante um ensaio de fadiga. Um destes fenômenos é o auto-aquecimento causado pela energia dissipada, diz Di Benedetto *et al.* (2004). Outro fenômeno que pode causar a redução de rigidez durante a excitação mecânica é a tixotropia do ligante asfáltico.

2.3. Módulo de resiliência por compressão diametral

A determinação do MR no ensaio de compressão diametral é um tema bastante discutido nacional e internacionalmente. Vários são os trabalhos que discutem a metodologia usada para sua determinação e interpretação. No Brasil, inúmeros são os trabalhos que discutem a forma dos ensaios e suas metodologias, entre eles, Preussler (1980), Medina e Motta (1995), Vianna (2002) e Brito (2006).

Barksdale (1997), Medina e Motta (1995) e Brito (2006) ressaltam as várias variáveis experimentais a que este ensaio é suscetível. Vários são os estudos dedicados a harmonizar as metodologias de ensaio. Sabe-se que pelas características visco-elásticas das misturas asfálticas, um dos fatores mais importantes é o modo e a frequência do carregamento imposto ao material. Rowe (1996) chama a atenção para a forma do pulso de carga durante o ensaio de MR. Como o material asfáltico é visco-elástico com propriedades tempo-dependentes, a rigidez é também função da área sob a curva de carregamento. O autor mostra ainda em seu trabalho que, dependendo de como for determinado o deslocamento resiliente, o MR pode sofrer grandes alterações; conclusão esta reiterada por Brito e Ceratti (2006).

Em 1975, Adedimila e Kennedy introduziram as definições de MR instantâneo (MRi) e MR total (MRt). O primeiro leva em conta o valor total do deslocamento resiliente (valor de pico menos valor mínimo), enquanto o segundo visa à determinação da porção linear de deslocamento obtido no ensaio, determinado a partir de um algoritmo de cálculo. Nos ensaios realizados por Brito (2006) evidencia-se que sob baixas temperaturas, quando o ligante asfáltico assume propriedades elásticas mais proeminentes, os valores de MRi e MRt tendem a se aproximar. Então, dadas con-

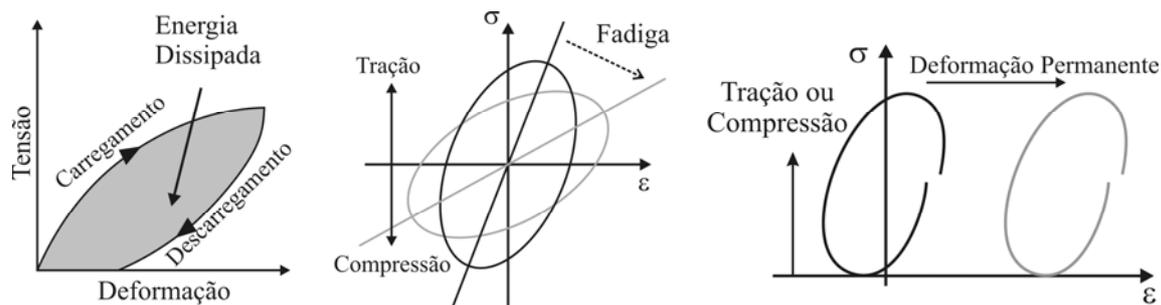


Figura 1: Variação do loop de histerese durante carregamentos cíclicos

dições de carregamento homogêneas, a relação entre MRi e MRt pode ser um indicador das propriedades do material em análise.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Planejamento do experimento

O experimento realizado neste estudo contou com a execução de três ensaios: resistência à tração, módulo de resiliência e fadiga à tensão controlada, todos por compressão diametral. Foram empregados corpos-de-prova Marshall (101,6mm de diâmetro) de duas misturas asfálticas: um concreto asfáltico (CA) com cimento asfáltico convencional – CAP20, codificado por CA-C neste estudo, e um CA com ligante asfáltico modificado por adição de borracha, codificado como CA-AB.

Foi necessária a adaptação dos equipamentos utilizados para que se pudessem realizar medições de carga e deslocamento horizontal no ensaio de RT e fadiga, e de carga, deslocamentos verticais e horizontais no ensaio de MR. O sistema para aquisição de dados e controle do ensaio desenvolvido foi o SEEPAV8200, descrito em detalhe por Brito (2006). A Figura 2 mostra (a) o sistema de aquisição e controle dos ensaios de cargas repetidas (b) o sistema de carregamento nestes ensaios, (c) a prensa de ruptura do ensaio RT e (d) um detalhe do corpo-de-prova com os LVDTs colados na face deste.

3.2. Materiais utilizados

Ambas as misturas usadas, CA-C e CA-AB, foram projetadas seguindo as recomendações do Asphalt Institute (1995). A faixa granulométrica adotada foi a IVB, de granulometria densa, com tamanho máximo

de granulares de 19mm; o agregado usado foi granítico proveniente da Santa Isabel / SP; também foi utilizada cal hidratada CH-I como material de enchimento. As características das misturas projetadas estão resumidas na Tabela 1. As Tabelas 2 e 3 apresentam as propriedades dos ligantes asfálticos.

Os corpos-de-prova apresentaram volume de vazios (Vv) abaixo do projeto e com variabilidade elevada. Para os corpos-de-prova de CA-C, obtiveram-se valores de Vv entre 2,0% e 3,9%. Para os corpos-de-prova de CA-AB, os valores foram entre 3,0% e 5,3%. Para que os resultados médios dos ensaios realizados fossem representativos, procedeu-se à classificação dos corpos-de-prova segundo seu Vv em três níveis – alto, médio e baixo; para cada grupo de ensaios, utilizou-se um corpo-de-prova de cada grupo, obtendo-se Vv médio no grupo de 3,0% nos ensaios com o CA-C e 4,0% nos ensaios com o CA-AB.

3.3. Metodologia

3.3.1. Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração realizado nesta pesquisa seguiu as prescrições do DNER ME 138/94 (DNER, 1994). Para viabilizar a medição da curva tensão/deformação, foi instalada uma célula de carga na prensa e um LVDT colado à superfície numa face do corpo-de-prova com pontos de apoio equidistantes 25,4mm do centro, alinhado com o plano perpendicular à aplicação da carga. Os ensaios foram realizados às temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C.

De acordo com Kim e Wen (2002), as magnitudes dos deslocamentos devido ao abaulamento nos corpos-de-prova durante um ensaio de RT são muito pequenas se comparadas aos deslocamentos na tensão de ruptura, podendo ser desconsideradas. Brito (2006)

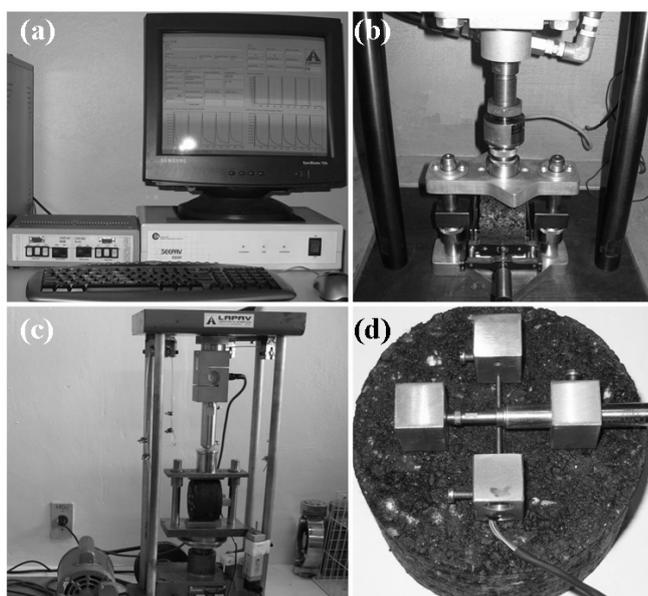


Figura 2: (a) Sistema de aquisição e controle e (b) sistema de carregamento, nos ensaios resiliêntes (c) prensa de RT (d) corpo-de-prova com LVDTs presos à face

Tabela 1: Resumo das características volumétricas das misturas utilizadas na pesquisa

	% Ligante	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	DMT
CA-C	5,1	4,8	17	68,7	2,463
CA-AB	5,6	5,1	17,8	72,1	2,464

Tabela 2: Propriedades do asfalto-borracha utilizado na mistura CA-AB

<i>Ensaio</i>	<i>Especificação</i>	<i>Resultado Asfalto-borracha</i>	<i>Unidade</i>
<i>Ponto de Amolecimento</i>	NBR 6560 (>55)	59	°C
<i>Penetração a 25°C, 100g, 5 seg</i>	NBR 6576 (25-75)	48	dmm
<i>Viscosidade Aparente a 175°C</i>	ASTM D2196/98 (800-2500)	1520	cP
<i>Ponto de Fulgor</i>	NBR 11341 (>235)	280	°C
<i>Massa Específica 25°C</i>	NBR 6296	1,022	g/cm ³
<i>Recuperação Elástica a 25°</i>	NLT 329/91 (>50)	70	

Tabela 3: Propriedades do CAP 20 utilizado na mistura CA-C

<i>Ensaio</i>	<i>Método</i>	<i>Especificação CAP20</i>	<i>Resultado</i>	<i>Unidade</i>
<i>Viscosidade Saybol Furol a 135°C</i>	ASTM D2171	2000 a 3500	2550	P
<i>Viscosidade Saybol Furol a 177°C</i>	ASTM E102	120 mín.	183,0	s
<i>Viscosidade Saybol Furol a 177°C</i>	ASTM E102	30 a 150	36,0	s
<i>ECA – Relação de viscosidade a 60°C</i>	X 016*	4,0 máx	2,8	
<i>ECA – Ductilidade a 25°C</i>	ASTM D113	20 mín	150	cm
<i>Índice de Suscetibilidade Térmica</i>	X 018*	-1,5 a 1,0	-1,1	
<i>Penetração</i>	ASTM D5	50 mín	56	0,1 mm
<i>Ponto de Fulgor</i>	ASTM D92	235 mín	304	°C

verifica que, para as condições ensaiadas, a correção pelo efeito de abaulamento ficou abaixo de 5%. Desta forma, nenhuma correção devido ao efeito de abaulamento foi executada para correção dos deslocamentos horizontais mobilizados até a ruptura das amostras nos ensaios de RT.

Para determinação da deformação na máxima tensão de tração e da área sob a curva tensão *versus* deformação desenvolvida até o pico de tensão de tração foi utilizada a metodologia proposta por Hugo e Nachenius (1989). Para o cálculo da área foi feita a integração da equação de melhor ajuste até o pico da tensão de tração considerando os limites pertinentes.

3.3.2. Módulo de resiliência e fadiga

Como a norma brasileira que regulamenta o ensaio de compressão diametral de cargas repetidas, DNER ME 133/94 (DNER, 1994), não é detalhada o suficiente para a execução do ensaio, optou-se por seguir as recomendações preconizadas pela pesquisa 1-28/1-28A do NCHRP (Barksdale, 1997 e Witczak, 2004). O MRi e MRt foram calculados conforme prevê o algoritmo proposto pelo referido documento. O sistema de posicionamento dos LVDTs utilizado foi compatível com as dimensões e sistemática descritas neste procedimento; as equações utilizadas para determinação do MR foram, portanto, aquelas lá registradas.

Procedeu-se, adicionalmente, à correção do efeito de abaulamento na face do corpo-de-prova, conforme previsto por Roque e Buttlar (1992). Para tanto, utilizaram-se as equações de correção discutidas e

apresentadas por Brito (2006). Todos os ensaios foram realizados a 1Hz com pulso de carga de duração igual a 0,10 segundo e forma do tipo semi-seno-verso. A carga perdida pelo atrito das buchas do pórtico de carregamento durante os ensaios resilientes também foi corrigida segundo calibração apresentada por Brito (2006).

Nos ensaios de fadiga, registraram-se apenas os deslocamentos horizontais, uma vez que o ensaio é levado até a ruptura plena e, portanto, danificaria o sensor de deslocamento vertical. Os níveis de tensão aplicados foram de 10, 20, 25 e 40% da RT. Por restrição de tempo para a conclusão dos ensaios, não foi possível realizar os ensaios de fadiga para o CA-C – apenas os ensaios para o CA-AB serão apresentados. Os ensaios de MR foram realizados às temperaturas de 10, 25 e 35°C, enquanto os ensaios de fadiga foram realizados a 25°C.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como ilustração dos resultados obtidos nesta pesquisa para os ensaios de RT, a Figura 3 mostra a curva tensão *versus* deformação ($\sigma \times \epsilon$) obtidos para um corpo-de-prova de CA-AB a 25°C. Salienta-se nesta figura a nomenclatura usada neste estudo. Como já discutido anteriormente, a energia dissipada até o momento da máxima tensão de tração, momento no qual o dano causado ao material excede sua capacidade de resistir a quaisquer outros esforços, pode ser descrito como função da área sob a curva $\sigma \times$

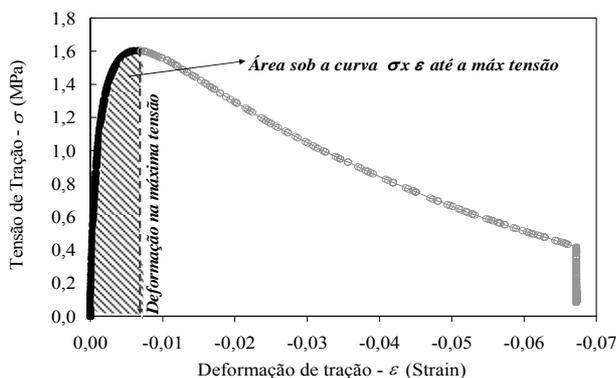


Figura 3: Tensão versus deformação no ensaio de RT

ϵ até este momento. Salienta-se que a determinação da deformação de tração foi feita em um vão de 50,8mm, suficientemente grande para atender o princípio do EVR¹ e, ao mesmo, suficientemente distante dos frisos de carregamento, o qual poderia levar a medição da energia dissipada sobre forma de punção por tensões de cisalhamento nas proximidades das bordas, assim como identificado por Falcão e Soares (2002) e Moura e Bernucci (2004).

A Tabela 4 sintetiza os resultados obtidos. Apresentam-se as medições de área realizadas – através da integração de equações de regressão que aproximaram os pontos experimentais ao longo do intervalo adequado. Devido à variação constatada no volume de vazios das amostras, colocou-se o valor médio do grupo ensaiado para análise paralela dos resultados.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de RT instrumentados

		Área	RT (MPa)	Vv (%)	ϵ_i (Strain)
CA-AB	10°C	0,0099	3,40	3,9	-0,0027
	25°C	0,0098	1,70	4,0	-0,0068
	35°C	0,0062	1,02	4,2	-0,0079
CA-C	10°C	0,0038	4,31	2,8	-0,0013
	25°C	0,0095	1,73	2,9	-0,0071
	35°C	0,0064	0,87	2,9	-0,0095

Algumas verificações podem ser diretamente apontadas:

- A energia mobilizada até o pico de tensão no ensaio a 10°C para o CA-C foi consideravelmente menor do que para o CA-AB na mesma temperatura, denotando maior fragilidade do CA-C à baixa temperatura.
- A deformação de tração medida até o pico de tensão na temperatura de 10°C foi maior no CA-AB do que no CA-C; na temperatura de 25°C apresentaram

¹ Elemento de volume representativo (EVR): volume de um material no qual as propriedades do material são constantes e a resposta sob carregamento mecânico é independente do tamanho de agregado e condições de contorno do corpo-de-prova. EVR = 1:3 é o mínimo indicado pela literatura (Kim e Wen, 2002).

comportamentos semelhantes e na temperatura de 35°C, apresentaram comportamento invertido, mostrando uma maior sensibilidade à temperatura pelo CA-C.

Para análise da variação do MR ao longo da vida de fadiga, apresenta-se a Figura 4, construída conforme proposto por Choi *et al.* (2005). Percebe-se que a curva correspondente a 40% da RT não apresenta três zonas bem definidas – condicionamento, estabilidade e falha. A zona de estabilidade é pouco evidente passando quase que diretamente do condicionamento à falha – provavelmente devido à grande quantidade de energia fornecida desde os primeiros ciclos, representado pela elevada carga aplicada, resultando em grandes danos na mistura desde o início. Nos baixos níveis de tensão, o patamar de estabilidade tendeu a se manter por um maior número de ciclos.

Uma das questões que se evidencia nesta análise é o critério de falha usado correntemente no ensaio de Fadiga à tensão controlada por compressão diametral. Note-se que o MRi cai a 10% do valor inicial quando a amostra foi considerada como tendo atingido sua vida de fadiga. Se for levada em consideração uma redução de 50% da rigidez inicial, valor este recomendado para outros tipos de ensaio de fadiga, note-se que vida de fadiga seria reduzida em aproximadamente 25%, dependendo do nível de tensão considerado.

Para mostrar a evolução do dano durante a vida de fadiga em um ensaio de compressão diametral, traçaram-se ainda os laços histeréticos (Figura 5a) para uma amostra submetida a 20% da RT. Calculou-se ainda a variação dos eixos dos laços, apresentado na Figura 5b.

Estes resultados são incomumente encontrados na literatura pesquisada. Mostram, entretanto, com precisão, a mesma tendência encontrada em ensaios de fadiga em tração-compressão. Por ser um ensaio a tensão controlada, a energia dissipada por ciclo tende a aumentar, devido ao aumento do trincamento no material. Evidencia-se, ainda, que a variação nos eixos dos laços histeréticos mostra a variação da rigidez ao longo da vida de fadiga, como era de se esperar.

É possível determinar a energia dissipada ao longo da vida de fadiga com os resultados apresentados e, com isto, fazer estudos mais aprofundados através do ensaio de compressão diametral cíclica. Para tanto, necessita-se apenas da tensão, deformação e ângulo de defasagem para cálculo da energia dissipada – área do laço histerético. Isto não foi explorado neste trabalho, pois está fora do seu escopo. Naturalmente, para que esta análise possa ser realizada, é necessário que se explore fortemente os princípios teóricos envolvidos no ensaio – ainda pouco desenvolvidos dado à sua complexidade.

Os resultados obtidos para os ensaios de MR estão

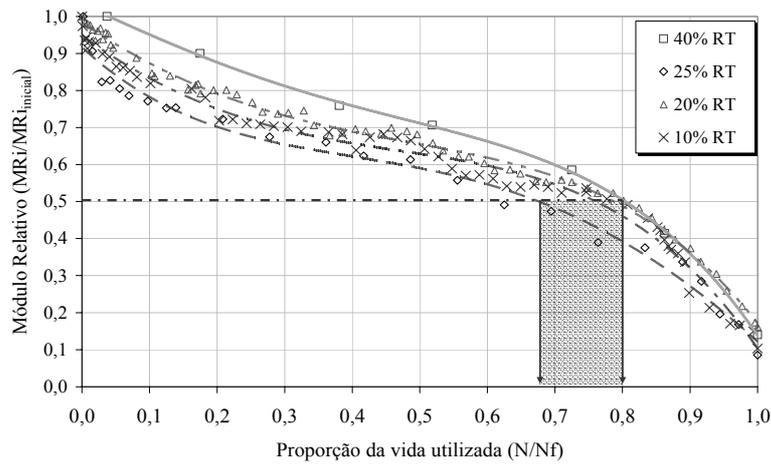


Figura 4: Redução da rigidez ao longo da vida de fadiga

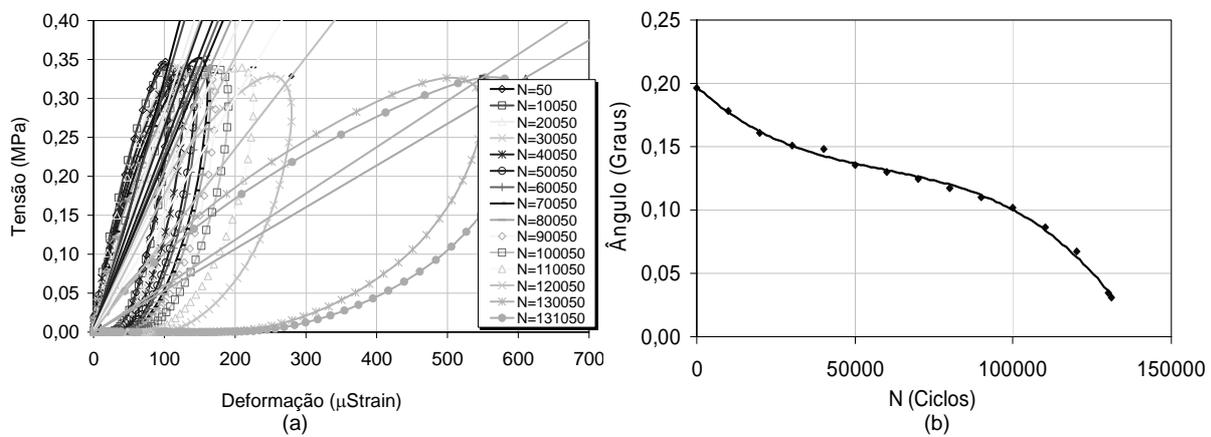
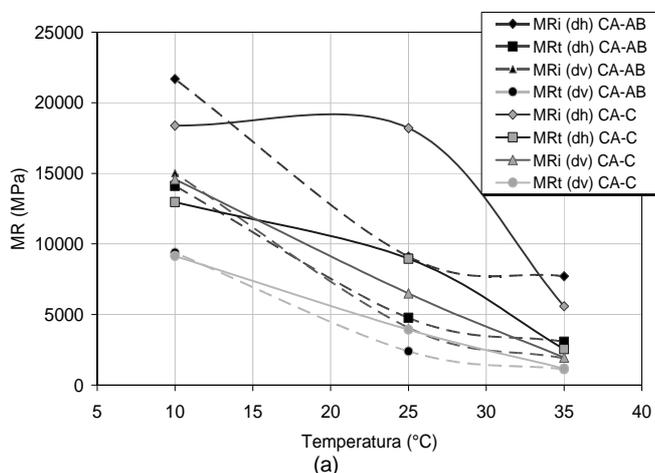


Figura 5: (a) Laços histeréticos no ensaio de fadiga 20%RT (b) Variação no eixo dos mesmos

apresentados na Figura 6a. Cada ponto representa a média de três ensaios. A média entre o MR calculado em função dos deslocamentos horizontais e verticais, para cada temperatura, está apresentada na Figura 6b, bem como a relação MR_i/MR_t . A escolha do coeficiente de Poisson (ν) para as análises a 25°C seguiu a recomendação da Pesquisa 1-28/1-28A (Barksdale, 1997 e Witzczak, 2004), cujo ν adotado deve ser de 0,35. As análises às temperaturas de 10° e

35°C, foram baseadas na experiência de Marques (2004): $\nu=0,21$, para 10°C e $\nu=0,42$, para 35°C.

Observa-se que os valores de módulo de resiliência instantâneos (MR_i) foram sempre maiores, assim como os valores de MR calculados em função dos deslocamentos horizontais. Apenas o MR_i em função dos deslocamentos verticais para o CA-C mostrou comportamento linear no intervalo de temperaturas estudado. A Tabela 5 mostra um resumo dos



	MRi Méd	Mrt Méd	MRi/Mrt Méd	VV Médio
CA-AB 35°C	4804	2099	2,29	4,04
CA-AB 25°C	6586	3584	1,84	3,99
CA-AB 10°C	18349	11744	1,56	4,01

	MRi Méd	Mrt Méd	MRi/Mrt Méd	VV Médio
CA-C 35°C	3770	1859	2,03	2,95
CA-C 25°C	12347	6444	1,92	2,94
CA-C 10°C	16484	11048	1,49	2,95

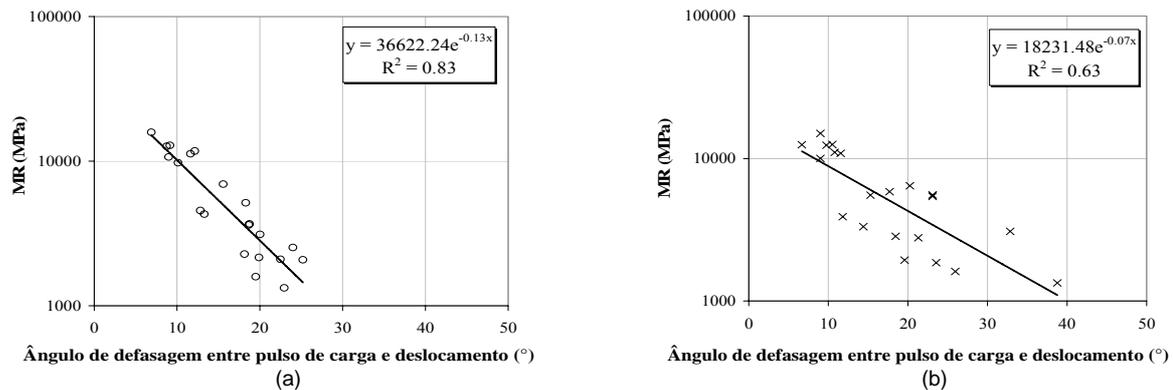
Valores Médios

(b)

Figura 6: Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência

Tabela 5: Resumo dos resultados encontrados nos ensaio de MR e RT

		V_V^* (%)	RT (MPa)	$\varepsilon@ \sigma_{máx}$ (Strain)	Área@ $\sigma_{máx}$ (MPa.Strain)	MRt (MPa)	MRi (MPa)	MRi / MRt	Defasagem $\alpha\varepsilon$ (°)	V_V^{**} (%)
CA-AB	10°C	3,9	3,40	-0,0027	0,0099	11744	18349	1,6	12	4,0
	25°C	4,0	1,70	-0,0068	0,0098	3584	6586	1,8	19	4,0
	35°C	4,2	1,02	-0,0079	0,0062	2099	4804	2,3	23	4,0
CA-C	10°C	2,8	4,31	-0,0013	0,0038	11048	16484	1,5	10	2,9
	25°C	2,9	1,73	-0,0071	0,0095	6444	12347	1,9	20	2,9
	35°C	2,9	0,87	-0,0095	0,0064	1859	3770	2,0	24	3,0

**Figura 7:** Ângulo de defasagem determinado no ensaio de MR para a mistura com (a) CA-AB (b) CA-C

resultados obtidos no ensaio de RT e MR com resultados da medição da defasagem entre o pulso de carga e deslocamento neste último ensaio. Esta medição foi realizada na intenção de melhor compreender as componentes tempo-dependentes dos materiais asfálticos. Este parâmetro é usualmente determinado no ensaio de módulo complexo sob carregamento harmônico de tração-compressão.

Verifica-se que as medições de defasagem apresentam tendências e valores coerentes com os resultados encontrados na literatura. O CA-AB novamente apresenta menor sensibilidade à temperatura com menor variação na defasagem no intervalo de temperaturas estudado, em relação ao CA-C. No entanto, a variação na defasagem medida pode ser mais fortemente correlacionada à temperatura de ensaio do que ao ligante asfáltico empregado. A Figura 7 apresenta os resultados de defasagem medidos no ensaio de MR realizado por Brito (2006) para uma maior matriz experimental. Nota-se que o diagrama Black, usado para descrever os resultados de ângulo de fase no ensaio de módulo complexo, apresenta uma boa correlação dos resultados obtidos para a defasagem no MR.

5. CONCLUSÕES

As medições extras realizadas nesta pesquisa nos ensaios de RT, apesar de não serem prática corrente nos estudos de materiais asfálticos no país, se mostram como um excelente indicador de

performance. Estes resultados serviram para mostrar a sensibilidade à temperatura das misturas convencionais em relação às misturas com asfalto-borracha, corroborando para as explicações do porquê tais misturas, ainda que com características semelhantes de RT e MR, resistem mais ao trincamento por fadiga – isto é, pela maior demanda de energia mobilizada para a sua ruptura. Há ainda outros parâmetros não explorados nesta pesquisa que podem ser estudados, como por exemplo, o tempo necessário para atingir a máxima tensão de tração.

Identificou-se, a partir do monitoramento da rigidez ao longo do ensaio de fadiga, que para a mistura e níveis de tensão estudados, o critério de ruptura total usado no ensaio leva as amostras a uma queda no MR próxima de 10% do valor inicial. Acredita-se também, que com um estudo de maior escopo, seja possível determinar algumas das propriedades de dano ao longo da vida de fadiga neste ensaio – através da determinação da energia dissipada medida pela variação do laço histerético, que mostrou comportamento compatível com o esperado.

A defasagem medida entre o pulso de carga e o pulso de deslocamento apresentou-se como sendo um possível parâmetro de análise sobre o comportamento visco-elástico das misturas, apresentando boa correlação de valores e comportamento semelhante ao ângulo de fase medido nos ensaios de módulo complexo.

Finalmente, como principal conclusão deste estudo, pode-se dizer que dado o nível de avanço da instrumentação disponível para a realização de ensaios con-

vencionais de RT, MR e Fadiga, é possível determinar indicadores de desempenho de misturas asfálticas adicionais àqueles tradicionalmente estudados, o que pode ser útil nos atuais estudos de materiais alternativos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Greca Asfaltos S.A pelo fornecimento do asfalto-borracha usado na pesquisa, à Petrobrás pelo ligante asfáltico CAP20, ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentos da EPUSP pela moldagem dos corpos-de-prova e suporte técnico e também à equipe do Laboratório de Pavimentação da UFRGS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adedimila, A. S. e T. W. Kennedy (1975) Fatigue and Resilient Characteristics of Asphalt Mixtures by Repeated-load Indirect Tensile Test. *Research Report 183-5, CHR*, University of Texas at Austin, USA.
- ASTM (2007) D6931-07 – *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA.
- Barksdale, R. D.; J. Alba; N. P. Khosla; R. Kim e M.S Rahman (1997) Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design. *Project 1-28, Final Report*, Georgia Tech Project E20-634, USA.
- Bodin, D. (2002) *Modèle d'endommagement cyclique: Application à la fatigue des enrobés bitumineux*. Thèse de Doctorat, L'École Central de Nantes et L'Université de Nantes, Nantes, France.
- Brito, L. A. T. (2006) *Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado–PPGEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Brito, L. A. T. e J. A. P. Ceratti (2006) Avaliação do algoritmo de determinação dos deslocamentos resilientes do ensaio de compressão sob cargas repetidas. *Anais do 18º Encontro do Asfalto*. Rio de Janeiro.
- Brown, S. (2007) US Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. *International Symposium on Asphalt Pavement Design & Performance* – Key-note presentation. Nottingham, UK.
- Choi, Y.K.; Thom N.H.; Collop A.C. (2005) Fatigue damage accumulation measured using different laboratory techniques. *Proceedings of Mairepav 4*. Paper 182. Belfast, Northern Ireland.
- Di Benedetto, H.; C. De La Roche; H. Baaj, A. Pronk e R. Lundström (2004) Fatigue of bituminous mixtures. *RILEM – Materials and Structures*, Vol. 37, p. 202-216.
- Falcão, M. F. B e J. B. Soares (2002) Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. *Anais do XVI Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes*, ANPET, Natal, v. 1, p. 169-181.
- Hugo, F. e R. Nachenius (1989) Some properties of bitumen-rubber asphalt and binders. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 58, p. 303-336.
- Kim, Y. R. e H. Wen. (2002) Fracture energy from indirect tension testing. *Proceedings of the AAPT*. 18p.
- Marques, G. L. O. (2004) *Utilização de módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória*. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, RJ
- Medina, J. e L. M. G. M. Motta (1995) Análise do Pulso de Carga em Pavimentos. *Anais da 29ª Reunião Anual de Pavimentação*, Cuiabá, p. 418-449
- Moura, E. e L. L. B. Bernucci (2004) Estudo dos deslocamentos verticais e horizontais em corpos-de-prova Marshall em ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração. *Anais do XVIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes*, ANPET, Florianópolis, v. 1, p. 150-161
- Preussler, E. S. (1983) *Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço*. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Queiroz, C. A. V. e A. T. Visser. (1978) Uma investigação dos módulos de resiliência de revestimentos betuminosos brasileiros. *Anais XIV Reunião Anual de Pavimentação*, João Pessoa/PB.
- Ping, W. V. (2007) Evaluation of the Dynamic Complex Modulus Test and Indirect Diametral Test for Implementing the AASHTO 2002 Design Guide for Pavement Structures in Florida. Summary of Final Report, BC352-12. FDOT. Florida. USA
- Roque, R. e W. G. Buttlar (1992) The development of a measurement and analysis system to accurately determine asphalt concrete properties using the indirect tensile mode. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 61, p. 304-332.
- Rowe, G. M. (1996) *Application of the Dissipated Energy Concept to Fatigue Cracking in Asphalt Pavements*. PhD Thesis. University of Nottingham. Nottingham. UK
- Vianna, A. A. D. (2002) *Contribuição para o estabelecimento de um material padrão e de metodologia para calibração de equipamentos de ensaios dinâmicos*. 2002. Tese (Mestrado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Witczak, M. W. (2004) Harmonized test methods for laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design. Project 1-28A, Research Result Digest N° 285, University of Maryland, 2004. 48p.