

COMPARAÇÃO DE RIGIDEZ DE MISTURAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO MÓDULO RESILIÊNCIA E MÓDULO DINÂMICO

Jennifer Ilha Vendrusculo

Acadêmica do curso de Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Maria
jennifer-ilha@hotmail.com

Pablo Menezes Vestena

Acadêmico do curso de Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Maria
pablovestena@gmail.com

Andressa Ambrós de Oliveira

Acadêmica do curso de Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Maria
andressa.ambros@hotmail.com

Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior

Doutorando em Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Maria
engcivilpedro@hotmail.com

Sílvio Lisboa Schuster

Doutorando em Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Maria
silviolschuster@gmail.com

Luciano Pivoto Specht

Professor/Pesquisador do curso de Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Maria
luspecht@gmail.com

Resumo. *Conhecer o comportamento vinculado à rigidez do revestimento asfáltico é fundamental para o dimensionamento do revestimento, bem como para tentar compreender o comportamento mecânico dos pavimentos. Este estudo tem o propósito de realizar uma inferência comparativa nos parâmetros de rigidez, através da avaliação do comportamento de quatro misturas asfálticas com distintas granulometrias e ligantes asfálticos com base nos ensaios de Módulo de Resiliência, que trabalha no domínio elástico e de Módulo Complexo, que traz uma abordagem viscoelástica. Enquanto o módulo complexo analisa as propriedades reais de módulo dentro dos domínios que os pavimentos trabalham, de viscoelasticidade linear, o módulo de resiliência analisa a capacidade de o material voltar ao seu estado inicial depois da aplicação de carga. Através da análise dos resultados dos dois ensaios de módulo, é possível perceber que apesar de utilizar domínios de comportamento distintos, ambos os ensaios demonstram resultados de mesma tendência.*

Palavras-chave: *Módulo de Resiliência. Módulo Complexo. Rigidez.*

1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é de suma importância na contemporaneidade, visto que, possibilita o transporte de mercadorias, pessoas e as mais diversas oportunidades de acesso. Dessa forma, para garantir que o pavimento cumpra com sua função é necessário que o concreto asfáltico utilizado seja condizente com as finalidades do projeto, e caracterizado quanto as suas principais propriedades, rigidez e dano.

A rigidez da mistura asfáltica é uma propriedade importante para o dimensionamento de pavimentos e influenciada por diversos fatores relacionados aos materiais utilizados e também por solicitações de tráfego e temperatura.

Em relação ao dimensionamento, a rigidez retorna a resposta do pavimento as tensões do tráfego, e no caso do concreto asfáltico, o material herda o comportamento termoreológico do ligante.

A rigidez do concreto asfáltico pode ser determinada por testes de Módulo de Resiliência (MR) e Módulo Complexo. Ambos apresentam diferentes procedimentos

de ensaio, análises e resultados. Portanto este trabalho busca comparar os resultados de rigidez obtidas pelo ensaio de MR realizado em diferentes temperaturas e tempos de carregamento com o ensaio de Módulo Complexo através da avaliação de quatro misturas asfálticas. O plano deste trabalho contém as seguintes etapas: a) realização do ensaio de MR em três temperaturas e três tempos de carregamento e Módulo Complexo em quatro misturas asfálticas, preparadas com ligante convencional e modificado e duas granulometrias; b) modelar o comportamento viscoelástico das misturas com o modelo de espectro contínuo 2S2P1D (*two springs, two parabolic dashpots and one dashpot*); c) avaliar as diferenças dos resultados modelados do Módulo Complexo e experimentais do MR.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O correto dimensionamento é fundamental para que qualquer projeto seja bem-sucedido. Em relação à pavimentação, para que isso aconteça, é fundamental que a rigidez do material a ser utilizado seja conhecida, visto sua importância nas propriedades mecânicas dos concretos asfálticos.

Atualmente, projetos rodoviários no Brasil não utilizam este parâmetro para dimensionamento. No entanto, o cenário da pavimentação brasileira vem passando por mudanças, como o aprimoramento do programa SisPav desenvolvido por Franco (2007), que em versão atual, Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), leva em consideração o Módulo de Resiliência para interpretar a rigidez em uma temperatura e frequência de carregamento definida.

Em uma modelagem mais precisa, pesquisadores da North Carolina State University, em Raleigh – NC, Estados Unidos, implementaram a mecânica do dano contínuo viscoelástico (Kim, 2004) em um *software* computacional para análise de pavimentos, referenciado como *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses* (Eslamina et al, 2012), que leva em

consideração dados de rigidez de Módulo Dinâmico em diferentes temperaturas e frequências.

2.1 Rigidez da mistura

Segundo Medina e Motta (2015), a rigidez é uma propriedade das misturas asfálticas que indica a capacidade de resistir as deformações. Conforme Kim (2009), essa propriedade é afetada por diversos fatores, tais como: taxa de deformação, temperatura, estado de tensão, as partículas dos agregados, o tipo de ligante, os vazios na mistura, a idade da mistura asfáltica, os finos no mastic, a água em forma líquida ou vapor e sua localização na mistura, entre outros.

Diversos são os ensaios de obtenção de dados de rigidez de misturas asfálticas, dentre elas o ensaio de Módulo de Resiliência é o mais comumente utilizado no Brasil. Módulo Complexo, ou Módulo Dinâmico, conforme Brito (2006) é atualmente a melhor fonte de dados para determinação do comportamento tensão-deformação de misturas asfálticas.

O Módulo de Resiliência é obtido analogamente ao módulo de elasticidade (E), relação entre tensão e deformação, entretanto, é obtido por aplicação de carga repetida (Medina e Motta, 2005). Esse ensaio considera um comportamento elástico linear das misturas asfálticas ao passo que, os deslocamentos analisados são recuperáveis, ou seja, resilientes e obedecem a Lei de Hooke. O ensaio é conduzido normalmente na temperatura de 25°C com carregamento de 0,1 s e repouso de 0,9 s.

A carga é aplicada no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico regular, que gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação de carga. O deslocamento diametral recuperável na direção horizontal é medido numa dada temperatura (Bernucci et al. 2010).

Devido a não homogeneidade das tensões dentro dos corpos de prova, Kim e Wen (2002) atentam para a não-linearidade da distribuição das deformações no centro da amostra.

Já ensaio de módulo complexo considera um comportamento visco-elástico linear do material, avaliando também o atraso na resposta da amostra (ângulo de fase) a uma gama de diferentes frequências de carregamento e temperaturas.

Realiza-se com carregamento uniaxial vertical compressivo senoidal, e medida da deformação vertical no eixo correspondente. De acordo com Di Benedetto e Corté (2005), é um ensaio homogêneo, que não requer nenhuma solução estrutural, não demandando assim nenhuma hipótese complementar, de modo que apresenta resultados mais similares a real propriedade dos materiais testados.

Comenta Huang (2004) que a diferença entre os ensaios é que o primeiro usa carregamentos semi-seno-verso ou triangular, com um dado período de descanso, enquanto o segundo aplica carregamentos do tipo senoidal sem períodos de descanso. As Figuras 1 e 2 representam os dois distintos carregamentos e as respostas na amostra.

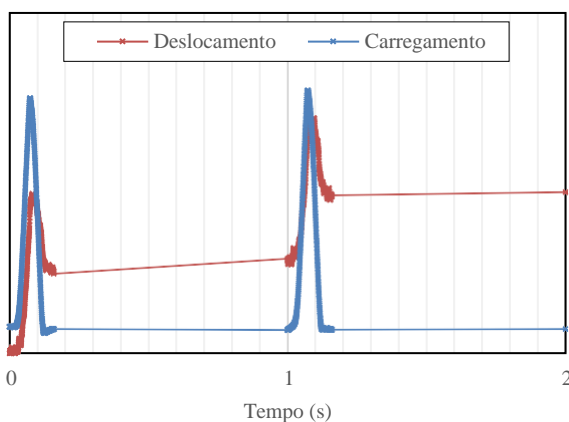


Figura 1. Carregamento ensaio MR

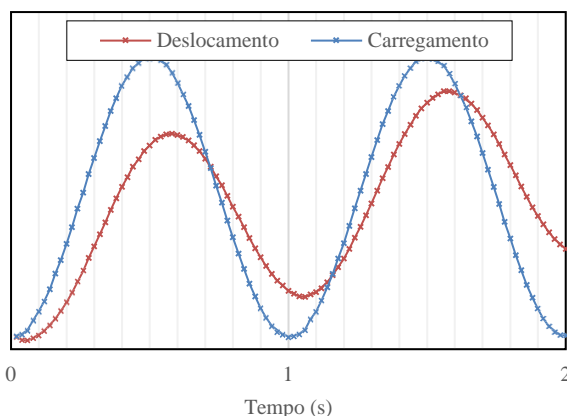


Figura 2. Carregamento ensaio MD

Ademais, conforme Specht et al. (2017), o uso de uma única temperatura e uma única frequência de carga no ensaio de MR negligencia a natureza viscoelástica das misturas asfálticas e sua susceptibilidade à temperatura, herdada do ligante asfáltico.

2.2 Superposição tempo-temperatura

A partir da utilização da propriedade de equivalência tempo-temperatura pode-se obter uma curva contínua (frequência-temperatura) chamada de curva mestra. Esta é a união das curvas, através de pontos com mesmo valor de módulo do material, para uma temperatura de referência, escolhida arbitrariamente, com a translação paralela dos eixos das frequências de cada isotérmica relacionada com a isotérmica correspondente e a temperatura de referência, até a superposição de pontos de mesma ordenada (OTTO, 2009). A determinação da curva mestra é um importante meio de caracterização da rigidez da mistura para dimensionamento de pavimentos, representada na Figura 3.

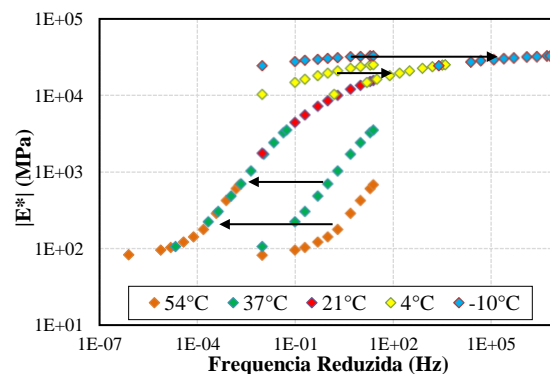


Figura 3. Superposição tempo-temperatura

Conforme Di Benedetto e Corté (2005), materiais que apresentam este comportamento são conhecidos como materiais ‘termo reológicos simples’, e a utilização dos princípios de superposição tempo-temperatura passa a ser interessante, já que, para um ensaio realizado num intervalo limitado de temperatura ou frequência, seus resultados possam ser expandidos para domínios inacessíveis em laboratório.

2.3 Modelo 2S2P1D

O comportamento viscoelástico linear é definido como uma combinação de molas e amortecedores que representam, respectivamente, o comportamento elástico e o comportamento viscoso newtoniano, simulando mecanicamente as respostas do comportamento da mistura.

Dentre os modelos de espectro contínuo podemos citar o modelo 2S2P1D (Olard e Di Benedetto, 2003). Neste modelo temos a adição de um amortecedor linear em série com dois elementos parabólicos e uma mola, de acordo com a Figura 4.

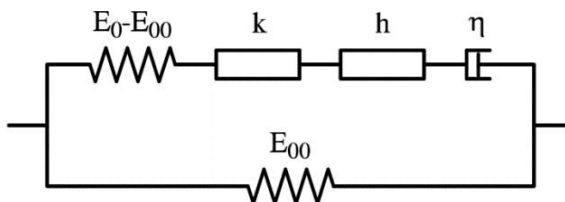


Figura 4. Representação modelo 2S2P1D
Fonte: Mangiafico (2014)

Mangiafico (2014), relata que através dessa adaptação o modelo pode ajustar-se muito bem ao comportamento mecânico da maioria das misturas betuminosas, passando a representar bem os intervalos de altas temperaturas e baixas frequências, deficiências encontradas no modelo analógicos anteriores. Através da modelagem 2S2P1D, o cálculo do módulo complexo é feito pela Eq (1):

$$E^*(i\omega\tau_E) = E + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (1)$$

Onde:

ω a pulsação de solicitação = $2\pi f$

E_0 o módulo vítrio quando $\omega \rightarrow \infty$

E_{00} o módulo estático quando $\omega \rightarrow 0$

β é relacionada a viscosidade do amortecedor linear, e é definido pela Eq (2):

$$\eta = (E_0 - E_{\infty})\beta\tau \quad (2)$$

τ_E o tempo característico, que varia com a temperatura referência fixada, Eq (3).

$$a_T = \tau_E / \tau_{E, T_{ref}} \quad (3)$$

A resolução da Eq (1) é ajustada pelos sete diferentes parâmetros δ , k , h , E_0 , E_{00} , τ e β , diferentes para cada mistura, e conforme Olard & Di Benedetto (2003), definem completamente o comportamento viscoelástico linear das misturas betuminosas.

3. METODOLOGIA

Nesta pesquisa, foram comparados dados de rigidez provenientes de Módulo de Resiliência, realizados em três temperaturas e três tempos de carregamento, e Módulo Dinâmico realizados em cinco temperaturas e dez frequências, para quatro misturas asfálticas, combinação de duas faixas granulométricas, e dois tipos de ligantes.

3.1 Materiais

Os agregados são originários de rocha vulcânica do município de Sarandi-RS. O agregado graúdo (>4,76mm) apresenta absorção de água de 1,18 %, massa específica real de 2,976 g/cm³ e massa específica aparente de 2,875 g/cm³ (DNER-ME 081/98), perda a abrasão de 21,30 % (DNER-ME 035/98) e sanidade de 1,22 % (DNER-ME 089/94). O agregado fino apresenta equivalente de areia de 60,8 % (DNER-ME 054/97) e massa específica real de 3,009 g/cm³ (DNER-ME 195/97).

Os ligantes asfálticos utilizados foram o CAP 50-70, e o COMPLAFLEX AMP CAP 60/85E. Os ensaios e os resultados de caracterização de ambos os materiais estão na Tabela 1.

Com os agregados foram compostas duas granulometrias com Tamanho Máximo Nominal de 19 mm, sendo uma enquadrada na faixa B e outra na faixa C do DNIT-ES 031 (2006). As composições granulométricas estão demonstradas na Figura 5.

SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTECNIA DO RIO GRANDE DO SUL
GEORS 2019

Tabela 1. Propriedades dos ligantes CAP 50-70 e AMP 60/85 E

Propriedade	Norma	Resultados	
		CAP 50-70	AMP 60/85 E
Performance Grade	AASHTO M 320/17	58 H -28	70 H -22
Penetração (0,1mm)	DNIT-ME 155/10	70	61,2
Ponto de Amolecimento (°C)	DNIT-ME 131/10	49	60
Ponto de Fulgor (°C)	NBR 11341/08	334	>400
Recuperação Elástica (%)	DNIT-ME 130/10	20	85
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21, 20rpm (cP)	NBR 15184/04	333	1025
Viscosidade Brookfield a 150°C, SP 21 (cP)	NBR 15184/04	138	514
Viscosidade Brookfield a 177°C, SP 21 (cP)	NBR 15184/04	68	225

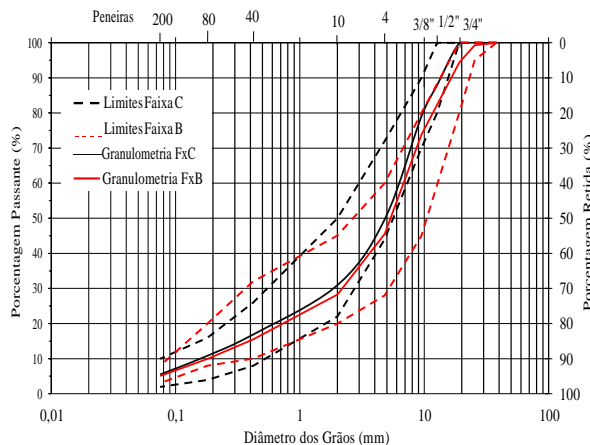


Figura 5. Composição granulométrica - Faixa B e C

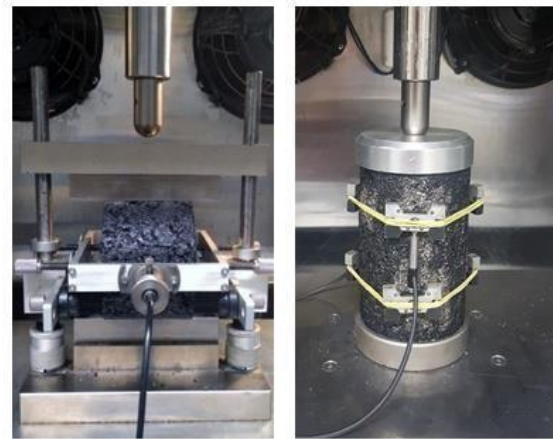


Figura 6. Ensaio de MR e MD

Com os dois ligantes asfálticos e duas granulometrias foram elaboradas quatro misturas asfálticas designadas como: FxB 50-70, FxC 50-70, FxB 60-85 e FxC 60-85. As misturas foram dosadas pela metodologia Marshall, segundo a norma DNER – ME 43-95, com 75 golpes, utilizada no Brasil.

Os teores obtidos para cada mistura foram de: 4,25% para FxB 50-70; 4,40% para FxC 50-70 e 4,50% para as FxB 60-85 e FxC 60-85.

3.2 Ensaio mecânicos

Foram realizados os ensaios de módulo de resiliência (MR) e módulo complexo ou dinâmico (MD) com intuito de avaliar a rigidez. Ambos os ensaios foram realizados no equipamento Universal Test Machine – UTM 25 da IPC Global e estão representados na Figura 3, módulo de resiliência e módulo dinâmico, respectivamente.

Módulo de Resiliência. Foram moldados 4 corpos de provas por mistura, ensaiados em duas direções a 0° e a 90°, com diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm, altura 6,3 cm e volume de vazios de $4 \pm 1\%$, conforme norma AASHTO TP 31

Cada amostra das diferentes misturas foi ensaiada nas temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C e para cada temperatura, foram aplicadas três tempos de carregamento diferentes: aplicação de 0,2s, com repouso de 0,8s; aplicação de 0,1s com repouso de 0,9s e aplicação de 0,04s, com repouso de 0,96s.

Módulo Complexo. Foram moldadas 2 amostras por mistura utilizando o compactador Giratório Superpave (CGS), com dimensões de 10 cm de diâmetro por 15 cm de altura e volume de vazios de $5,5 \pm 0,5\%$, conforme AASHTO T 342. As amostras foram ensaiadas em cinco temperaturas distintas: -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C, e dez frequências: 25Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz, 2Hz, 1Hz, 0,5Hz, 0,2Hz, 0,1Hz e 0,01 Hz.

O limite de pequenas deformações para o regime viscoelástico linear de misturas asfálticas proposto por Olard e Di Benedetto (2003) é 100 $\mu\text{m/m}$. Por esta razão, a deformação a ser a da no ensaio foi limitada na faixa de 50 a 75 $\mu\text{m/m}$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados das cinco temperaturas e dez frequências de Módulo Dinâmico, foi montada a superposição tempo-temperatura, seguindo a Equação (4), proposta por William, Landel e Ferry (1955):

$$\log(a_T) = -\frac{C_1*(T-T_{ref})}{C_2+T-T_{ref}} \quad (4)$$

O modelo 2S2P1D então se aplica a curva mestra de rigidez para os 50 pontos de média de duas amostras dos dados experimentais, calibrando-se os 7 parâmetros da Equação (1). A Tabela 2 apresenta os parâmetros da modelagem 2S2P1D à temperatura de referência de 21°C, bem como a superposição tempo-temperatura das 4 misturas abordadas na pesquisa.

Pelos coeficientes C_1 e C_2 é possível extrapolar dados às temperaturas não ensaiadas, metodologia utilizada para as temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C do ensaio MR (Figura 7).

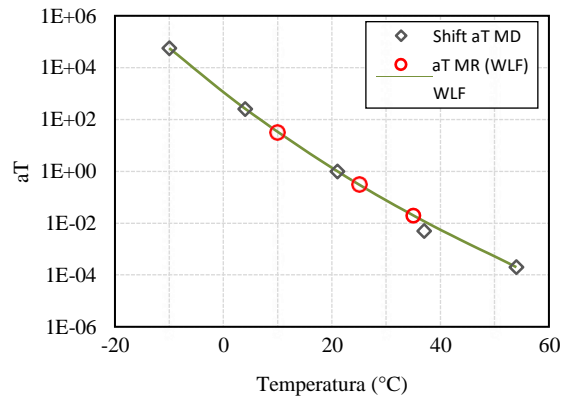


Figura 7. Obtenção dos coeficientes de translação pela curva WLF

Para comparar dados de módulo dinâmico com módulo de resiliência foi utilizada metodologia proposta por Loulizi et al. (2006), onde tempo de carregamento deve ser equivalente para ambos testes. Como neste estudo os tempos de aplicação (t) foram de 0,2s, 0,1s e 0,04s, a frequência angular equivalente será de 5rad/s, 10rad/s e 25rad/s ($\omega=1/t$). A frequência angular então é convertida para frequência fazendo a divisão por 2π , resultando em frequências equivalentes de 0,80Hz, 1,59Hz e 3,98Hz, como demonstra a Equação (5). Após isto, ela é multiplicada pelo a_T correspondente a sua temperatura, para comparação com a curva mestra.

$$f(\text{Hz}) = a_T * 1/2\pi t \quad (5)$$

Após transladar os dados de MR a temperatura referência de 21°C, pode-se avaliar os dados de MR junto aos de MD nas mesmas condições de temperatura e frequência, representados nas Figuras 8 a 12.

Tabela 2. Resultado da modelagem matemática 2S2P1D e superposição WLF

Mistura	Modelo 2S2P1D						WLF (21°C)		
	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ_E (s)	β	C_1	C_2
FxB 50-70	94,29	35761	0,232	0,695	3,028	3,81E-01	400	29,47	210,14
FxB 60-85	179,00	35271	0,218	0,585	2,834	6,20E-01	2000	43,49	300,68
FxC 50-70	50,00	36325	0,230	0,608	2,555	3,44E-01	10000	49,90	349,95
FxC 60-85	119,00	35884	0,200	0,540	2,214	3,76E-01	10000	56,74	397,42

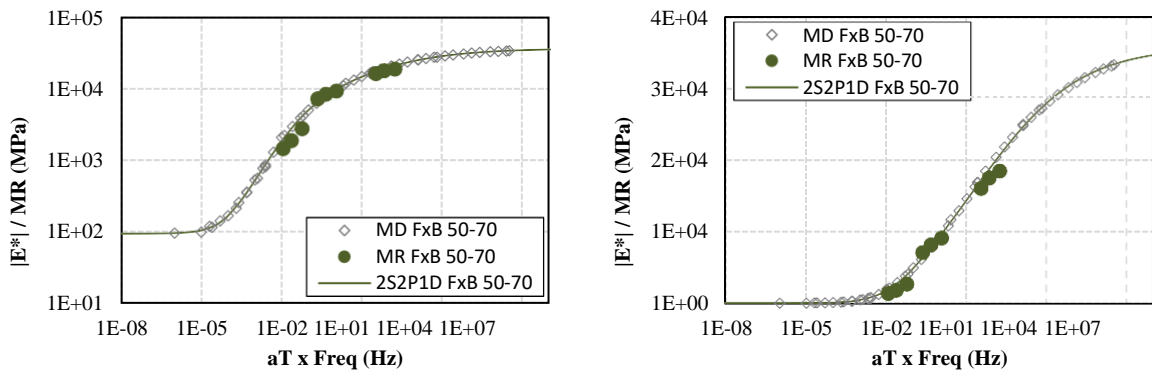


Figura 8. Comparativo de rigidez mistura FxB 50-70

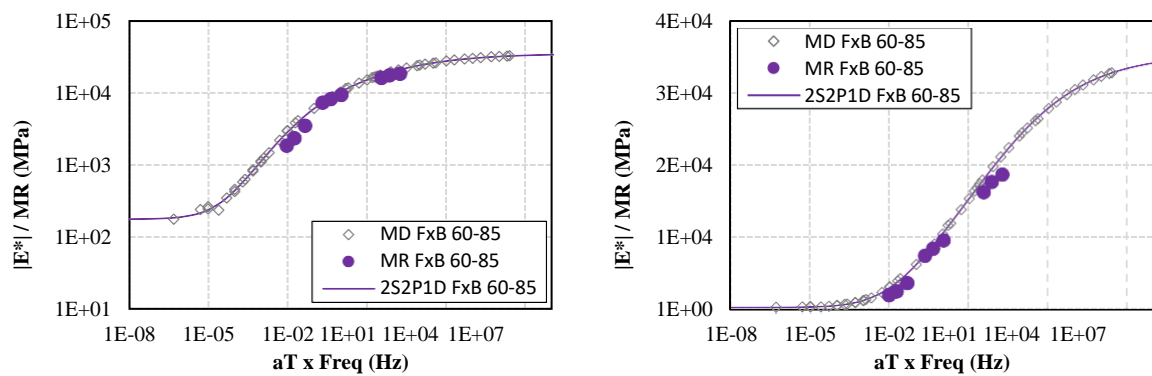


Figura 9. Comparativo de rigidez mistura FxB 60-85

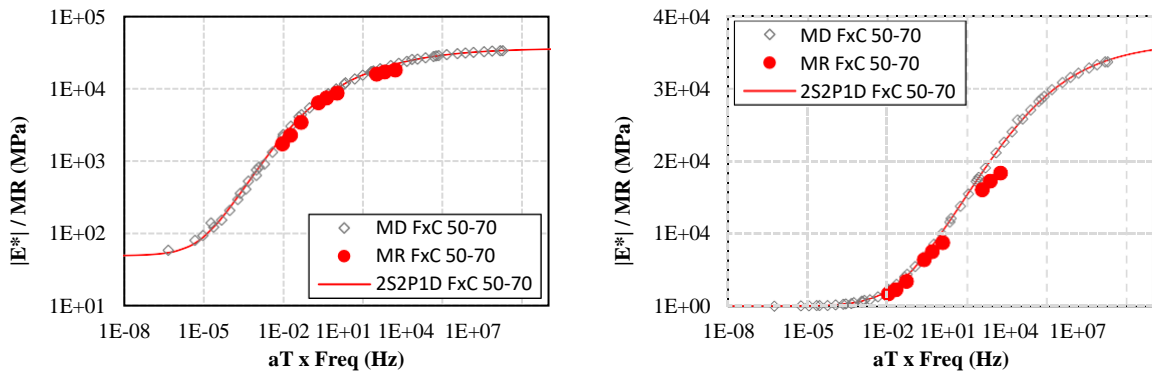


Figura 10. Comparativo de rigidez mistura FxC 50-70

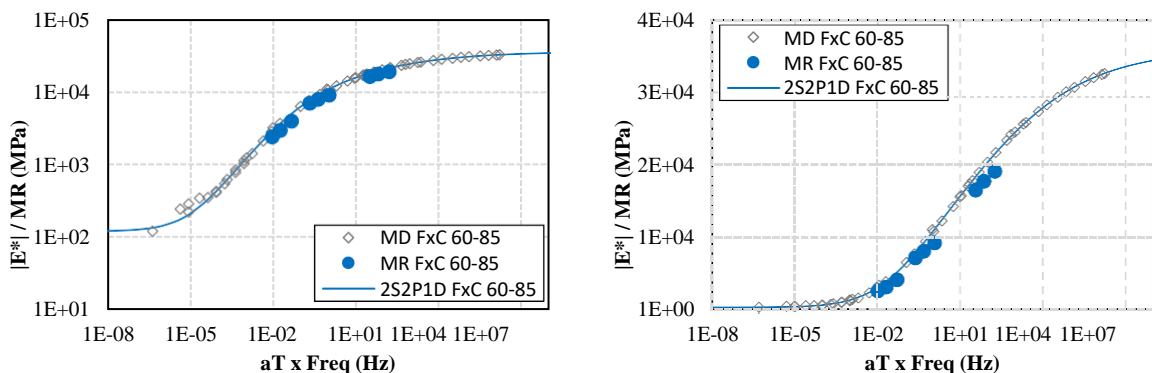


Figura 11. Comparativo de rigidez mistura FxC 60-85

De maneira geral, os resultados de módulo de resiliência se aproximam da curva mestra, ficando em média 10,79%, 6,33% e 25,39% menores que os de módulo dinâmico para a mesma frequência reduzida, nas temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C respectivamente. A maioria dos dados analisados de rigidez de MR ficaram inferiores aos de MD, exceto alguns dados de da mistura FxB 50-70 na temperatura de 25°C.

Nota-se a maior divergência nas rigidezes na menor temperatura (10°C), onde alguns corpos de prova tiveram de ser refeitos por sofrerem trincamento, característico de um processo de fadiga. Pela literatura, as temperaturas entre 15 e 25°C são as mais críticas a este processo, porém um nível de deformações em que haja danificação do material seria necessário, acima de 100µS. Isto explicaria a queda na rigidez nas leituras, já que o ensaio prevê ciclos prévios de condicionamento antes das medidas utilizadas no cálculo do módulo.

Ainda que para a temperatura de 35°C os resultados se aproximaram da curva mestra, não é recomendado realizar o ensaio de MR para temperaturas além disto, visto a notada deformação que ocorre nas amostras próxima aos frisos de suporte do pistão de carga, já que a amostra passaria de um domínio elástico-

linear para um domínio com também deformação permanente.

Spetch et al. (2017) comenta que diferenças nas leituras experimentais dos dois ensaios podem causar a divergência nos dados, mas seria esperado um erro randômico, acima e abaixo da linha de igualdade, que também não foi observado neste trabalho.

Atestam ainda para outros fatores como a não homogeneidade na distribuição de tensões nas amostras durante o ensaio de MR.

Di Benedetto et al. (2009) realizou módulo complexo em amostras moldadas em compactador giratório em diferentes direções, para avaliar a anisotropia de misturas asfálticas. Observou que a rigidez analisada perpendicular a compactação pode ser até 10% menor que na direção de compactação.

A diferença no volume de vazios nos protocolos de ensaio entre as amostras de módulo de resiliência (4% ± 1%) e módulo dinâmico (5% ± 0,5%) também pode ser creditada a estas divergências de dados.

Devido aos dados de MR não criarem uma tendência similar aos de MD, não é razoável extrapolar curvas mestras para domínios de temperaturas não ensaiadas utilizando dados de MR.

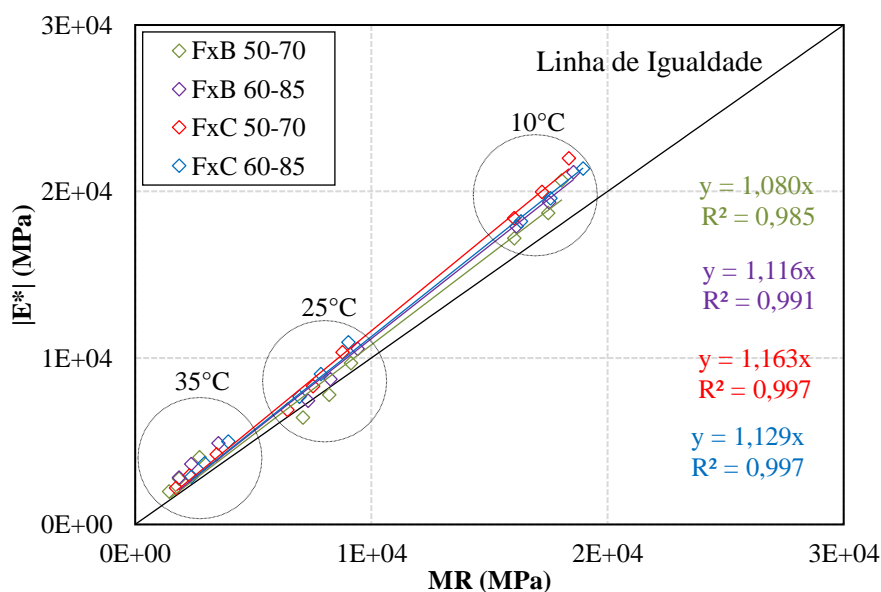


Figura 12. Comparativo dados de ensaios de MR e MD das quatro misturas

5. CONCLUSÃO

O módulo de resiliência é um ensaio mais fácil de ser realizado, visto que requer instrumentação mais simples. Avaliando apenas uma temperatura (25°C), próxima a ambiente, requer pouco esforço para condicionamento das amostras. O pulso de forma semi-seno-verso pode ser atingido utilizando equipamentos pneumáticos, sem muita calibração. Ainda, por utilizar as mesmas dimensões dos corpos de prova utilizados em dosagens no país, este ensaio está bem adaptado a prática da pavimentação brasileira.

Em contraponto, realizar um ensaio em uma faixa de temperaturas abaixo de zero e acima de cinquenta graus requer uma câmara de resfriamento e aquecimento adequada, além de dispositivos de precisão para captar sensíveis leituras, o que tornam o ensaio de módulo dinâmico mais caro de ser executado.

Ambos buscam avaliar dados de rigidez do material asfáltico, porém demonstram resultados divergentes, devido a alguns fatores:

- Diferença no volume de vazios das amostras entre os ensaios;
- Não homogeneidade das tensões nas amostras de MR;
- Diferença nos planos de compactação e avaliação da rigidez entre os ensaios;
- Geometrias diferentes de ensaio, gerando diferença na metodologia das leituras experimentais.

Por fim, por varrerem uma faixa de temperaturas e frequências maiores, os resultados de módulo dinâmico se mostram mais favoráveis a extrapolação de curvas mestras que contribuam para modelos de previsão e dimensionamento de pavimentos. Apesar dos aspectos mencionados, a conversão de valores apresentada no presente trabalho indica uma boa convergência de valores e pode ser utilizada em casos práticos de engenharia rodoviária.

6. RECONHECIMENTOS

Projeto Rede Temática do Asfalto - ANP/Petrobras.

7. REFERÊNCIAS

AASHTO TP 31,1996, **Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension**. Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO TP 31, Washington, D.C

AASHTO, T 342, 2011, **Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 342- 11, Washington, D.C.

BERNUCCI, L. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3. ed. reimp. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2010

BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil –Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre RS,2006.

DNER-ME 035/98: **Agregados – Determinação da abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro, 1998.

DNER - ME 043/95: **Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

DNER-ME 054/97: **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, 1997.

DNER-ME 081/98: **Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 089/94: **Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego desoluções de sulfato de sódio ou de magnésio**. Rio de Janeiro, 1994

SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTECNIA DO RIO GRANDE DO SUL
GEORS 2019

- DNER-ME 195/97: **Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1997.
- DNIT 031/2006 - ES: **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2006.
- DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. F. **Matériaux routiers.** Tome 2. 2005. 283p.
- DI BENEDETTO, H.; Sauzéat C.; Sohm, J. (2009). Stiffness of Bituminous Mixtures Using Ultrasonic Wave Propagation, **484 Road Materials and Pavement Design**, v.10:4, p.789-814. DOI: 10.3166/RMPD.10.789-814.
- ESLAMINIA, M., THIRUNAVUKKARASU, S., GUDDATI, M. N., KIM, Y. R. Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis. In: **7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements**, pp. 497-506, 2012.
- FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro RJ, 2007.
- HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design.** 2nd ed.. New Jersey: Prentice Hall, 2004. 775p.
- KIM, Y. R.; WEN, H. Fracture Energy from Indirect Tension Testing. **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**, 2002. 18p.
- KIM, Y. R., E CHEHAB G. “**Development of a Viscoelastoplastic Continuum Damage Model for Asphalt –Aggregate Mixtures: Final Report as Part of Tasks F and G in the NCHRP 9-19 Project.**” National Cooperative Highway Research Program, NCHRP, National Research Council, Washington, D. C. 2004.
- KIM, Y. R. (2009). “**Modeling of Asphalt Concrete**”. ASCE Press, Vol. 1, pp. 163-200.
- LOULIZI, A.; FLINTSCH, G. W.; AL-QADI, I. L.; MOKAREM, D. Comparison between resilient modulus and dynamic modulus of hot-mix asphalt as material properties from flexible pavement design. **Transportation Research Board.** Washington, D. C., V. 1970, n.1, p. 161-170, 2006.
- MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends.** 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: l'École Nationale des Travaux Publics de l'État, Vaulx-en-Velin, França, 2014.
- MEDINA, J.; MOTTA L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 2^a Edição, Rio de Janeiro-RJ, Editora UFRJ, 2005.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.
- NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** 2008. 204f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro RJ, 2008.
- OLARD, F, E DI BENEDETTO, H., General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. **Road Materials and Pavement Design**, 4:2, 185-224, DOI: 10.1080/14680629.2003.9689946. (2003).
- OTTO, G. G. **Misturas Asfálticas Mornas - Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTECNIA DO RIO GRANDE DO SUL
GEORS 2019

RIVIERE, N. **Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux**. 1996. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Université de Bordeaux I, Bordeaux, 1996.

SPECHT, L. P. et al. Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 648-658, 2017.

WILLIAMS, M. L., LANDEL, R. F., & FERRY, J. D. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. **Journal of the American Chemical Society**, 77(14), 3701-3707. <https://doi.org/10.1021/ja01619a008>, 1955.