

Efeito do uso de corpos de prova moldados e extraídos na caracterização mecânica de misturas asfálticas

Effect of using molded and extracted specimens on the mechanical characterization of asphalt mixtures

Lucas Sasaki Vieira da Silva¹, Juceline Batista dos Santos Bastos², Jorge Barbosa Soares³

¹Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, lucassvs2@alu.ufc.br

²Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Ceará, Ceará – Brasil, jucelinebatista@hotmail.com

³Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, jsoares@det.ufc.br

Recebido:

25 de maio de 2021

Aceito para publicação:

26 de dezembro de 2021

Publicado:

30 de abril de 2022

Editor de área:

Francisco Sacramento Aragão

Palavras-chave:

Extração de corpo de prova.
Metodologia de moldagem.
Caracterização mecânica.

Keywords:

Specimen extraction.
Molding methodology.
Mechanical characterization.

DOI:10.14295/transportes.v30i1.2620



RESUMO

Não há consenso quanto aos efeitos do uso de amostras moldadas ou extraídas para a caracterização mecânica de misturas asfálticas. O objetivo deste artigo é avaliar o efeito do uso de corpos de prova (CPs) moldados e extraídos de uma mistura asfáltica, fazendo uso de ensaios uniaxiais e triaxiais de deformação permanente, uniaxiais de fadiga por tração-compressão e módulo dinâmico, além de resistência à tração indireta e módulo de resiliência. A variação de granulometria e o teor de ligante nos CPs moldados e extraídos também foram avaliados. Observou-se maior sensibilidade nos ensaios de deformação permanente, seguido por módulo dinâmico e fadiga por tração-compressão. Os ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração indireta não apresentaram variação significativa quando comparados os dois tipos de corpos de prova investigados.

ABSTRACT

There is still no consensus on the effects of using molded or cored/cut specimens on the mechanical characterization of asphalt mixtures. The objective of this paper is to evaluate the difference in using molded or cored/cut specimens of a single asphalt mixture by means of different laboratory tests: uniaxial and triaxial permanent deformation, uniaxial tension-compression fatigue, dynamic modulus, indirect tensile strength, and resilient modulus. Aggregate gradation and binder content on both molded and cored/cut specimens were evaluated. Higher sensibility was noticed on the permanent deformation tests, followed by the dynamic modulus and the tension-compression fatigue test. No significant variation was observed on the resilient modulus and the indirect tensile strength tests when the two types of specimens investigated were compared.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Dentre as lacunas do conhecimento na ciência aplicada à engenharia de pavimentação, uma maior compreensão do comportamento mecânico dos materiais para a ampla gama de circunstâncias às quais estes são submetidos segue sendo um desafio. Muitos autores têm buscado entender os mecanismos do surgimento de defeitos em misturas asfálticas, por meio de análises que possibilitem a correlação do que ocorre de forma controlada em laboratório com o que ocorre em campo.

Além de utilizar ensaios cada vez mais sofisticados, minimizando efeitos adversos decorrentes da geometria da amostra ou do tipo de carregamento, também é interessante utilizar amostras mais representativas, que tenham menor variabilidade ou que forneçam resultados que possibilitem uma modelagem mais próxima de levantamentos de campo. Assim, compreender os efeitos da extração ou moldagem de corpos de prova (CPs) é um dos pontos importantes no estudo da mecânica dos materiais de pavimentação.

Dois dos principais defeitos dos revestimentos asfálticos são a Deformação Permanente, retratado pelo Afundamento de Trilha de Roda (ATR) em campo, e o Trincamento por Fadiga. Muitos trabalhos avaliaram métodos que possam caracterizar o comportamento dos pavimentos, seja através de ensaios mecânicos mais sofisticados ou por diferentes metodologias de dosagem que forneçam propriedades sobre o desempenho do pavimento.

Destacam-se mais recentemente: o Módulo Dinâmico (DNIT 416, 2019), realizado alternativamente ao Módulo de Resiliência (DNIT 135, 2018) e fadiga por tração-compressão (AASHTO TP 107, 2014) opcionalmente à fadiga por compressão diametral (DNIT 183, 2018). Além desses, pode-se citar *Stress Sweep Rutting* (AASHTO TP 134, 2019), que simplifica e substitui o *Triaxial Stress Sweep* (Choi e Kim, 2013).

A literatura apresenta estudos que contemplam a avaliação de diferentes características dos materiais asfálticos à luz do efeito da dimensão dos CPs, uso de CPs extraídos em dimensão inferior às usuais ou efeito do histórico de carregamento (Harvey *et al.*, 1994; Robinette e Williams, 2006; Lee *et al.*, 2017; Pape *et al.*, 2018). No entanto, poucos são os trabalhos que reúnem avaliações abrangentes para mais de um parâmetro (e.g., rigidez, deformação permanente e fadiga). Ainda nesses trabalhos, poucos caracterizam a mesma mistura com o objetivo principal de avaliar os efeitos específicos da extração dos CPs.

A hipótese a favor do uso de CPs extraídos ao invés de moldados pode partir (i) da distribuição do Volume de Vazios (Vvs) mais compatível com a compactação em campo; (ii) da possível aproximação ao comportamento em campo por efeitos de restrição durante a compactação; e (iii) da redução de regiões mais heterogêneas do CP, o que poderia supostamente levar a uma amostra mais representativa. No caso de CPs moldados, a compactação fornece energia desigual entre as diferentes porções como base, topo e bordas em contato com o molde. Apesar de a mistura asfáltica ser um material que apresenta variabilidade decorrente dos materiais e do processo produtivo, a distribuição desigual dessa energia e distribuição dos agregados pode gerar tendências de acúmulo de Vvs, aumentando a variação de comportamento dos CPs. Portanto, este artigo avalia os efeitos do uso de CPs moldados e extraídos em uma ampla caracterização mecânica de misturas asfálticas.

1.2. Deformação permanente

O defeito da deformação permanente, ou ATR, ocorre em estágios: (i) danificação com redução volumétrica, (ii) alteração de forma sem variação de volume e (iii) fluência plástica associada à ruptura por cisalhamento. Além de danificar a estrutura, este defeito coloca o usuário em risco por facilitar o acúmulo de água, com consequente dano por umidade e fissuramento (Yoder e Witczak, 1975; Vale *et al.*, 2021). Diversos ensaios podem ser adotados para caracterização da suscetibilidade à deformação permanente de misturas asfálticas: simuladores de tráfego como o *French Rutting Tester* (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées wheel tracker* – LCPC), Uniaxial de Carga Repetida (*Flow Number* – FN; DNIT 184, 2018), *Triaxial Stress Sweep* (TSS; Choi e Kim, 2013) e *Stress Sweep Rutting* (SSR; AASHTO TP 134, 2019). Os dois últimos, além do uso

da tensão confinante, possibilitam a modelagem da evolução do defeito, enquanto o FN fornece apenas o ranqueamento e a consequente indicação do nível de tráfego suportado (Bastos *et al.*, 2017).

1.3. Trincamento por fadiga

O surgimento e a evolução do trincamento por fadiga podem ser definidos como a perda da resistência do material após aplicações cíclicas de carregamento. No entanto, o estudo deste fenômeno pode acarretar efeitos adversos e efeitos parasitas decorrentes do tipo de ensaio utilizado e consequente direção ou forma do carregamento induzido. Dentre os ensaios, podem ser citados: compressão diametral (tração indireta) e tração-compressão (tração direta), sendo este último um ensaio que induz um estado de tensões mais homogêneo na amostra, o que é desejado (Di Benedetto *et al.*, 2004; Babadopulos *et al.*, 2015).

Como resultado do ensaio, espera-se que seja obtida uma curva característica de dano dependente apenas do material em análise. Para tal, utiliza-se a teoria do dano viscoelástico contínuo (*ViscoElastic Continuum Damage – VECD*) por meio do modelo simplificado (*Simplified ViscoElastic Continuum Damage – SVECD*) que torna as equações de comportamento do material mais próximas do meio elástico, tornando o cálculo da curva característica, dependente das propriedades de Integridade (C) e Dano (S), mais simples (Daniel e Kim, 2002; Underwood *et al.*, 2012; Nascimento, 2015).

2. REVISÃO QUANTO AO USO DE CPS MOLDADOS E EXTRAÍDOS

As propriedades das misturas asfálticas e os tipos de CP são temas de diversas pesquisas em pavimentação, focando na eficiência dos métodos de compactação, distribuição de Vvs e variações de dimensões e geometria, por vezes avaliando também efeitos do uso de CPs extraídos. Em geral, as avaliações do uso de amostras extraídas ou moldadas não são o objetivo principal ou os resultados observados para a metodologia não fazem parte das principais conclusões. Os trabalhos cujas contribuições relacionam-se ao efeito do uso de CPs extraídos estão resumidos na Tabela 1.

Harvey *et al.* (1994) compararam CPs obtidos por diferentes metodologias de compactação e extração, ressaltando dificuldades em comparar Vvs de CPs extraídos e moldados, assim como alguma redução da resistência à deformação permanente para CPs extraídos. Essa dificuldade pode estar relacionada ao corte de agregados e indução de quebra dos agregados pelo contato com o molde do Compactador Giratório Superpave (CGS). Chehab *et al.* (2000) verificaram a distribuição de Vvs e diferentes dimensões de moldagem de CPs e uso de amostras extraídas. Ainda que os autores tenham verificado variação nos resultados de Módulo Dinâmico ($|E^*|$) em frequências de 10 e 20Hz, reforçaram a necessidade do procedimento de extração e serragem de CPs para obtenção de amostras mais homogêneas.

Utilizando a Tomografia de Raios-X, Tashman *et al.* (2002) e Thyagarajan *et al.* (2010) analisaram a distribuição de Vvs de CPs oriundos de campo ou obtidos por CGS de diferentes fabricantes, corroborando as observações de Harvey *et al.* (1994) e Chehab *et al.* (2000). Leandro *et al.* (2017) observaram que CPs extraídos apresentam maiores valores de Módulo de Resiliência (MR) comparados aos moldados com o CGS, considerando-se a mesma energia de compactação. Robinette e Williams (2006) avaliaram os efeitos do histórico de carregamento em ensaios, além de utilizar CPs extraídos e moldados no programa experimental. Os autores observaram FNs 33% maiores para amostras extraídas e variação não significativa para $|E^*|$. Um trabalho

semelhante quanto a avaliação do uso de CPs extraídos foi realizado por Pinheiro *et al.* (2019). Os referidos autores avaliaram além dos efeitos da extração, a influência de tipo de carregamento para o $|E^*|$, mas considerando apenas compressão e tração-compressão uniaxiais. Resaltaram os efeitos da redução de V_v s após o procedimento de extração e corte dos CPs e notaram que as variações entre o módulo medido apenas por compressão ou por tração-compressão e os resultados obtidos com o uso de CP extraído não justificariam a extração de amostras, assim como a medida do módulo por tração-compressão ao invés de compressão. Silva *et al.* (2020) analisaram CPs moldados e extraídos quanto à $|E^*|$, SSR, FN, MR e RT, verificando para uma das misturas utilizadas, o acúmulo de deformação permanente em CPs extraídos consideravelmente maior, enquanto para outra mistura apenas o SSR apresentou grande variação, seguido pelo ensaio de $|E^*|$. Além disso, avaliaram a variação de V_v durante as etapas de extração e variação do teor de ligante em uma das misturas e constataram que pode haver variações do teor de ligante entre CPs moldados e extraídos.

Em pesquisas recentes, considerando apenas os efeitos na realização de ensaios de $|E^*|$ e fadiga a tração-compressão, Lee *et al.* (2017) e Pape *et al.* (2018) avaliaram a possibilidade de extrações múltiplas com dimensões, geometrias e sentido da extração a partir de um mesmo CP de 150mm de diâmetro e alturas variadas. Lee *et al.* (2017) verificaram para $|E^*|$ pouca variação, com exceção de baixas frequências reduzidas, porém concluíram que não há diferença significativa para fadiga após simulações com LVECD (originalmente *Layered ViscoElastic Continuum Damage*, atualmente *Layered ViscoElastic pavement analysis for Critical Distresses*). Já Pape *et al.* (2018) observaram também que não há influência a partir da anisotropia da amostra para resultados de $|E^*|$ e fadiga, recomendando extração vertical de até 4 CPs cilíndricos de 110mm \times 38mm.

Tabela 1 – Trabalhos com contribuições diretamente relacionadas à extração de CPs

Autores	Avaliação
Harvey <i>et al.</i> (1994)	CPs extraídos apresentam reduzida resistência à deformação permanente.
Chehab <i>et al.</i> (2000)	Observada variação de $ E^* $ principalmente em frequências de 10 e 20Hz.
Robinette e Williams (2006)	Não verificaram variação significativa do $ E^* $, já o FN variou em 33% para mais em CPs extraídos.
Leandro <i>et al.</i> (2017)	Relatam maior MR para CPs obtidos por extração daqueles moldados no CGS.
Lee <i>et al.</i> (2017)	Indicaram pouca variação do $ E^* $, exceto para as baixas frequências reduzidas, e variação insignificante de previsão de desempenho quanto à fadiga.
Pape <i>et al.</i> (2018)	Não foi verificada variação significativa entre $ E^* $ e vida de fadiga e recomendam extração vertical de até 4 CPs cilíndricos com 38mm \times 110mm.
Pinheiro <i>et al.</i> (2019)	Verificaram variação no $ E^* $ decorrente da extração do CP se comparado à variação de $ E^* $ por compressão e por tração-compressão.
Silva <i>et al.</i> (2020)	Observaram variação mais significativa para o SSR; também foi observada variação de $ E^* $ mais nítida em altas e baixas frequências reduzidas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Este artigo avaliou duas misturas asfálticas: M1 e M2, sendo M1 utilizada para os testes de extração de CPs e ensaios de deformação permanente e M2 para uma caracterização mecânica mais completa. A Tabela 2 apresenta os dados referentes a ambas as misturas, enquanto a Figura 1 apresenta as respectivas curvas granulométricas. Apesar de a Faixa C do DNIT ser utilizada como referência, M2 apresentou curva granulométrica fora dos limites dessa faixa.

Tabela 2 – Caracterização de M1 e M2

Característica	M1	M2
Ligante classificado por penetração	50/70	50/70
Teor de ligante (%)	5,2	5,3
Temperatura de Compactação (°C)	$144 \leq T \leq 149$	$139 \leq T \leq 144$
Gmm (densidade relativa máxima medida)	2,460	2,442
Percentual de material fresado m/m (%)	-	10

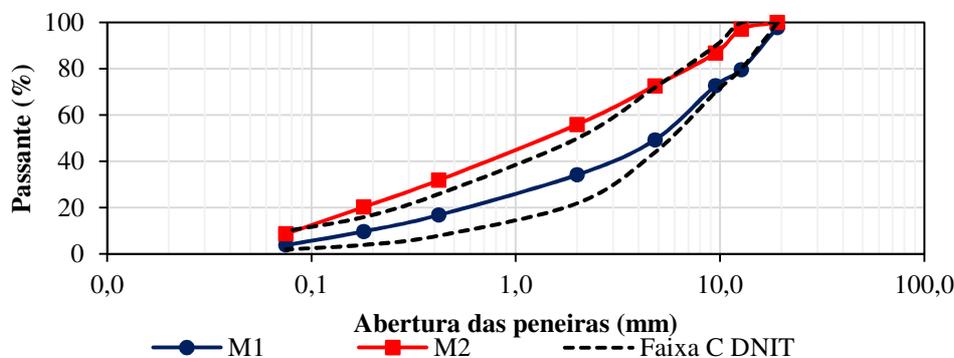


Figura 1. Curvas granulométricas de M1 e M2

3.2. Metodologia

Os CPs foram obtidos através de duas metodologias: moldagem na dimensão do ensaio; moldagem em dimensões maiores para posterior extração do núcleo e serragem das extremidades ou região central. A comparação entre as misturas não foi objetivo da pesquisa, mas sim o método de obtenção dos CPs. Buscou-se analisar a tendência entre os resultados de resistência à tração, deformação permanente, fadiga, e rigidez quando os dois métodos foram considerados.

Foram moldados CPs em três dimensões: (i) 63,5mm × 100mm; (ii) 150mm × 100mm e (iii) 180mm × 150mm, sendo os CPs do terceiro grupo utilizados para o procedimento de extração e serragem. Assim, o processo de extração de CPs originava um CP nas dimensões de 150mm × 100mm ou dois CPs com 63,5mm × 100mm.

Além dessas dimensões e para atender à especificação AASHTO TP 107 (2014), foram utilizados os CPs para o ensaio de fadiga a tração-compressão de 130mm × 100mm. Para obter os CPs nesta altura, foram serradas as extremidades de CPs moldados e extraídos com 150mm de altura. Após este procedimento, a probabilidade de ruptura próximo à extremidade (região de maior acúmulo de vazios) é reduzida, além de padronizar a altura dos CPs extraídos aos moldados, reduzindo variáveis consideradas para a análise. A Figura 2 apresenta as etapas do processo de moldagem, extração e serragem das amostras, assim como as prensas utilizadas nas etapas subsequentes de avaliação mecânica: hidráulica *Universal Testing Machine 25* (UTM-25), Marshall automática e Pneumática.

Conforme já verificado por outros autores, há redução dos Vvs decorrentes do processo de extração por eliminar a região periférica. Portanto, os CPs foram moldados com Vvs cerca de 1% a 2% acima do desejado. Ou seja, para um CP com Vvs finais pretendidos de $4,0\% \pm 0,4\%$, a moldagem deveria ser feita tal que o CP apresentasse cerca de 5,5% de vazios. Apesar dessa redução, este acréscimo é um valor médio e, algumas amostras apresentaram redução superior ou inferior, tornando-as impróprias para ensaio.

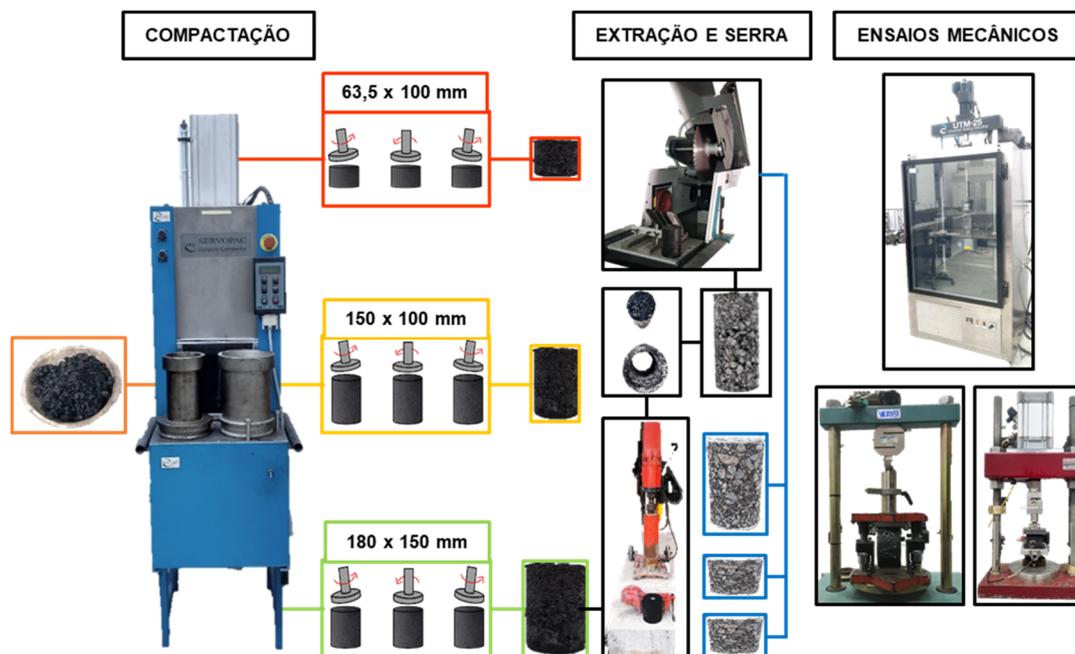


Figura 2. Esquema do método de obtenção dos CPs e prensas utilizadas para ensaios

Para separar os CPs obtidos por moldagem dos obtidos por extração e corte, foram utilizados dois grupos de legendas para cada mistura avaliada. A letra “E” foi incluída no fim da nomenclatura do grupo de CPs extraídos e serrados. Assim, nas discussões, o CP1 é moldado, enquanto o CP1E é extraído e serrado, assim como o M1 refere-se aos resultados da mistura 1 moldada, enquanto M1E refere-se aos resultados da mistura 1 extraída e serrada. Alguns CPs moldados e extraídos foram escolhidos aleatoriamente para avaliar teor de ligante e granulometria. O ligante foi extraído conforme DNER 053 (1994). O agregado mineral resultante da extração foi usado para determinação da granulometria.

3.3. Ensaios utilizados e adaptações

Além dos ensaios já normatizados no Brasil como MR, RT, FN e $|E^*|$, optou-se por realizar também avaliação por deformação permanente através do SSR e de fadiga por TC. Foi utilizada a temperatura de 25°C para determinação de MR e RT, e de 60°C para o FN. A Tabela 3 lista os ensaios, normas e respectivos Vvs alvo para os CPs.

Tabela 3 – Lista de ensaios e normas seguidas para caracterização mecânica

Ensaio	Sigla	Vvs	Norma
Módulo de resiliência por compressão diametral	MR	4,0% ± 0,4%	DNIT 136 (2018)
Resistência à tração por compressão diametral	RT	4,0% ± 0,4%	DNIT 135 (2018)
Módulo Dinâmico	$ E^* $	4,0% ± 0,4%	DNIT 416 (2019)
Uniaxial de carga repetida (<i>Flow Number</i>)	FN	5,5% ± 0,5%	DNIT 184 (2018)
<i>Stress Sweep Rutting</i>	SSR	5,5% ± 0,5%	AASHTO TP 134 (2019)
Fadiga por tração-compressão	Fadiga TC	4,0% ± 0,4%	AASHTO TP 107 (2014)

A escolha do SSR deve-se aos resultados de trabalhos recentes (Bastos *et al.*, 2016; Kim e Kim, 2017; Vale *et al.*, 2021), que mostraram que ensaios triaxiais de deformação permanente permitem a previsão do ATR de campo. Foram adotadas as alterações de temperaturas e tensão desvio utilizadas pelos autores citados, sendo o protocolo descrito na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo de parâmetros utilizados no ensaio SSR

Temperatura (°C)	47 (TH)	17 (TL)
Período de carga (s)	0,4	0,4
Período de descanso (s)	3,6	1,6
Ciclo completo (s)	4,0	2,0
Tensão confinante (kPa)	138	138
Tensão desvio (kPa)	620 – 414 – 827	414 – 620 – 827
Ciclos	200 – 200 – 200	200 – 200 – 200

Fonte: adaptado de Bastos et al. (2016), Kim e Kim. (2017) e Vale et al. (2021).

Já a opção pela realização do ensaio de fadiga TC é decorrente de outros trabalhos ressaltarem que ensaios com carregamento não axial podem induzir efeitos que não estejam relacionados ao dano por fadiga (Babadopulos *et al.*, 2015). O ensaio é realizado com o controle de deslocamento do atuador da UTM-25, sendo o deslocamento escolhido para cada CP a partir da avaliação do sinal e deformações obtidas com 15 ciclos de carregamento senoidal e deslocamento em torno de 0,1mm em tração e compressão. A partir dessa informação, define-se a amplitude de deslocamento para atingir um nível de deformação esperado. Foram utilizadas as amplitudes de 250, 300 e 350 *microstrains* para cada 2 CPs.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Deformação permanente

O ensaio uniaxial de carga repetida foi aplicado nas misturas M1 e M2. Apesar de não fornecer parâmetros de modelagem, o FN permite a classificação quanto ao tráfego e possibilita analisar se a ocorrência do defeito pode estar associada à sobrecarga. Esses dados foram analisados com o modelo de Francken, descrevendo o comportamento de acúmulo da deformação permanente e indicando se houve ruptura do CP, representada pela inversão de sinal da segunda derivada da expressão.

Conforme a Figura 3a, os CPs M1E apresentaram acelerado acúmulo de deformação permanente em relação aos CPs M1. Esse padrão não foi verificado para M2 (Figura 3b). Conforme Figura 3c, utilizando as classificações verificadas por Bastos *et al.* (2017), os CPs de M1 obtidos por ambas as metodologias resistiriam a um tráfego médio ($3 \times 10^6 - 1 \times 10^7$).

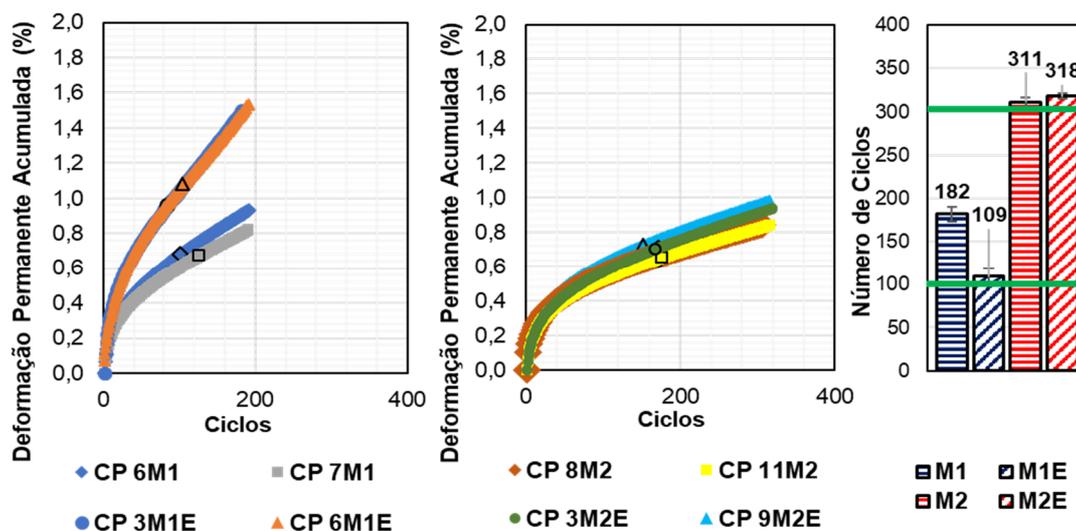


Figura 3. Deformação permanente por FN para (a) M1, (b) M2 e (c) Resumo

Destaca-se a redução de 40% do FN para os CPs extraídos (FN médio = 109) em relação aos moldados na dimensão do ensaio, próximo de rebaixar o nível de tráfego de médio para leve. Utilizando a mesma classificação, M2 foi classificada para tráfego pesado ($1 \times 10^7 - 3 \times 10^7$), sem variação significativa entre as metodologias. Dentre as hipóteses levantadas para a variação no comportamento das misturas, destacaram-se: (i) possível efeito do corte de agregados e (ii) efeito da variação do teor de ligante.

Apesar do comportamento distinto de M1 e M2 quanto ao FN, verificou-se tendência de acúmulo de deformação permanente no ensaio SSR pelo uso de CPs extraídos. Ambas as misturas apresentaram redução da resistência à deformação em CPs extraídos (M1 na Figura 4a e M2 na Figura 4b).

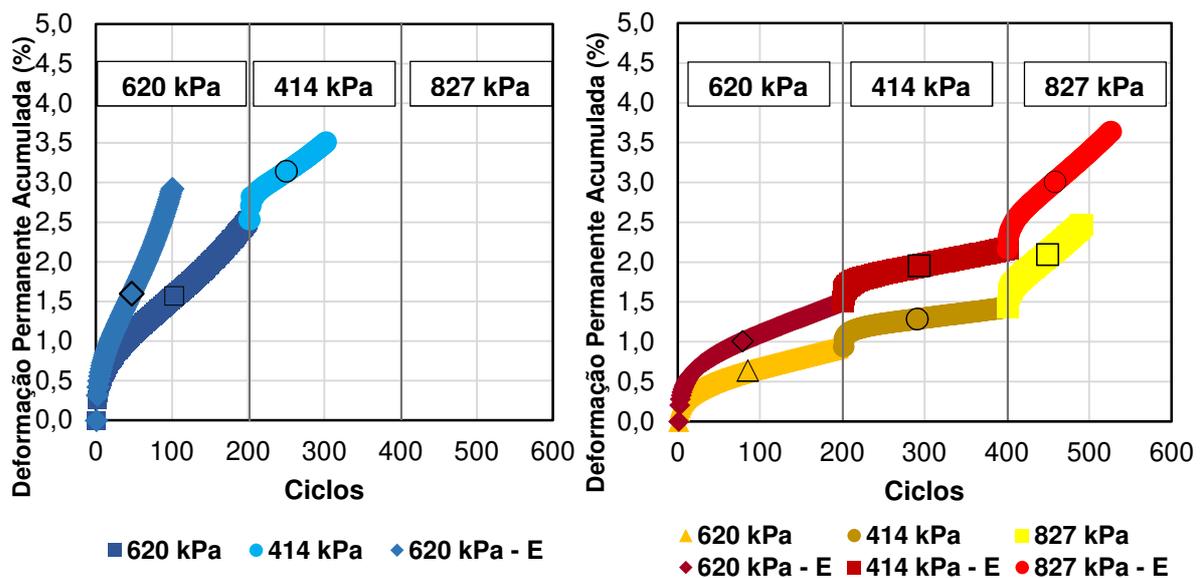


Figura 4. Deformação permanente pelo Stress Sweep Rutting (a) M1 e (b) M2 em $T_H = 47^\circ\text{C}$

O protocolo completo de ensaio deve ser realizado em duas temperaturas ($T_H = 47^\circ\text{C}$ e $T_L = 17^\circ\text{C}$) considerando três estágios de carga (620kPa, 414kPa e 827kPa) divididos em blocos de 200 ciclos, totalizando os 600 ciclos de ensaio. No entanto, M1 e M2 apresentaram ruptura antes de atingir o fim dos 600 ciclos de carga em T_H , impossibilitando o cálculo de todos os parâmetros de modelagem. Portanto, o ensaio em T_L não foi realizado.

Foi realizado também o cálculo dos coeficientes do modelo de Francken. Essa análise se deu para confirmar se, de fato, houve ruptura dos CPs em cada estágio de carga conforme verificado na aquisição de dados pelo aumento da taxa de deformação permanente.

Verificou-se que os CPs de M1 romperam aos 45 ciclos (média) ainda do bloco de 620 kPa. Já os CPs de M1E, aos 28 ciclos.

Para M2, as médias de ruptura verificadas foram aos 318 ciclos, mais da metade do bloco de 414kPa. Isso justificou submeter os CPs ao bloco de 827kPa, evitando perda por falsa verificação de ruptura. Já as médias de ciclos de ruptura dos CPs de M2E foram aos 243 ciclos, ainda no início do bloco de 414kPa, no entanto também foram submetidos ao bloco de 827kPa com o intuito de confirmar tal ruptura.

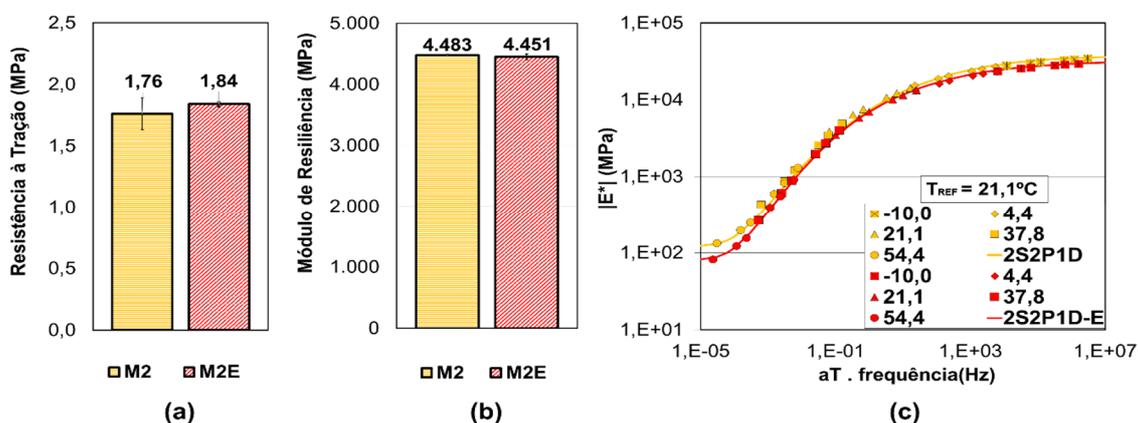
4.2. Resistência à tração, módulos dinâmico e de resiliência

Conforme DNIT 031 (2006), o menor valor admitido para uma mistura asfáltica apresentar no ensaio de RT é 0,65MPa. Ainda que este parâmetro não seja suficiente para caracterizar a mistura, é um dos poucos resultados avaliados rotineiramente em obras viárias e, portanto, foi avaliado neste artigo. Observa-se na Figura 5a que tanto CPs moldados quanto extraídos atendem aos requisitos mínimos de RT, sem variação significativa entre os métodos.

Além da RT, o MR que, em uma primeira versão do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) foi adotado como parâmetro de entrada para rigidez de revestimentos asfálticos, foi avaliado. Utilizou-se uma prensa pneumática com aquisição automática de dados a cada ciclo. Semelhante à RT, os valores de MR (Figura 5b) não apresentaram variação significativa entre as metodologias de obtenção do CP, por moldagem ou extração e corte.

Alternativamente ao MR, o $|E^*|$ também foi avaliado, tendo em vista: (i) consideração de propriedades termo-viscoelásticas do material; (ii) possibilidade do modelo em séries de Prony; (iii) possibilidade de uso em *softwares* como CAP3D-D e *FlexPave* junto aos parâmetros da curva C vs. S ou modelo do SSR. O ensaio foi realizado seguindo as combinações de temperatura e frequência em conformidade ao disposto em DNIT 416 (2019).

O tratamento dos dados para obtenção das curvas mestras fez uso de um conjunto de planilhas desenvolvidas no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC. Para a construção da Curva Mestre (Figura 5c), foi utilizada a Lei de Williams-Landel-Ferry (WLF) na obtenção dos parâmetros de transladação (*shift factors*, a_T) à temperatura de referência $T_{REF} = 21,1^\circ\text{C}$. Por último, os dados experimentais e fatores de transladação foram aplicados à modelagem 2S2P1D (*two Springs, two Parabolic elements, 1 Dashpot*) que apresenta boa aderência aos dados inclusive nas extremidades referentes às altas e baixas frequências reduzidas (baixas e altas temperaturas, respectivamente).



Os dados referentes aos CPs extraídos apresentaram menor rigidez em relação aos moldados. Essa observação pode relacionar-se ao maior acúmulo de deformação permanente para os CPs extraídos (Figura 5b). Araújo Júnior *et al.* (2009) avaliaram diferentes métodos de comparar MR ao $|E^*|$. Decidiu-se utilizar uma frequência de análise igual a Equação 1 que aproxima os resultados satisfatoriamente em relação aos demais métodos avaliados pelos autores. Para o MR, $t = 0,1\text{s}$, logo foi avaliado o $|E^*|$ à temperatura de 25°C e frequência de 1,6Hz.

$$f = \frac{1}{2\pi t} \tag{1}$$

Onde: f é a frequência, e t o tempo de aplicação de carga do ciclo.

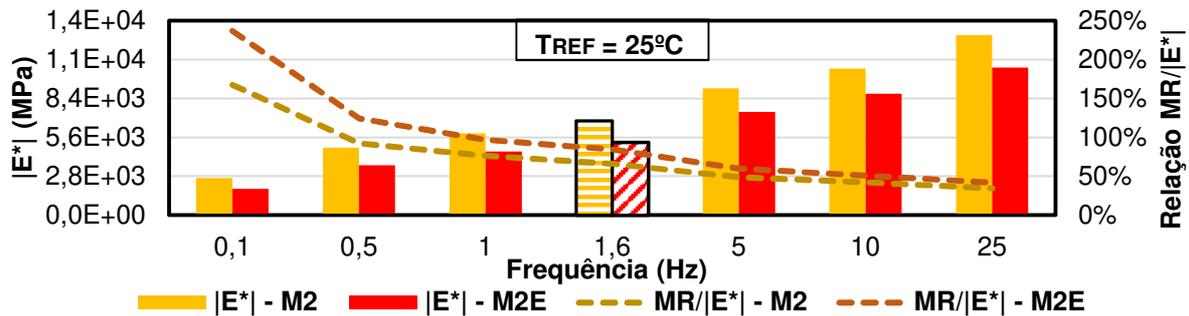


Figura 6. Relação entre módulos de M2 e M2E

A Figura 6 relaciona o MR e o $|E^*|$ a 25°C para cada método. Ambos os resultados a 1Hz e 1,6Hz são satisfatórios para avaliação. Ainda que os CPs extraídos sejam ligeiramente menos rígidos, esses apresentam maior concordância entre os resultados em ambos os ensaios, sendo a relação de 66% para CPs moldados e 85% para os CPs extraídos.

Considerando apenas a metodologia de moldagem ou extração, a diferença de rigidez pode ser observada também na Figura 7 por meio da relação entre os resultados de $|E^*|$. Percebe-se maior divergência em altas temperaturas, onde a rigidez é menor.

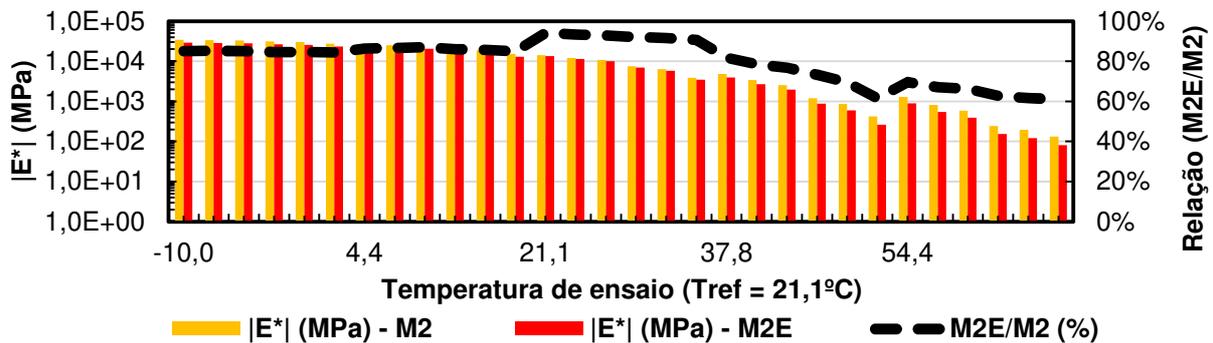


Figura 7. Relação entre módulos de M2 e M2E

4.3. Fadiga à tração-compressão

Para a avaliação da resistência à fadiga, seguiu-se o protocolo da AASHTO TP 107 (2014). Foi considerada a altura serrada de 130mm, excluindo a região de extremidade em que se acumulam Vvs. A partir da modelagem 2S2P1D, foram obtidas as séries de Prony utilizando planilhas e códigos de MATLAB.

Durante o tratamento de dados, determinou-se o ciclo de ruptura utilizando o pico do ângulo de fase medido pelos *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs). Eles apresentam melhor aderência às variações de tensão e deformação da amostra em relação à medida do atuador, em parte devido às possibilidades de ruídos no sinal ou folgas mecânicas no sistema. Apesar disso, durante o ensaio é possível ter ideia do ciclo de ruptura pelo surgimento de microtrincas que evoluem a macrotrincas até a ruptura do CP (Figura 8).

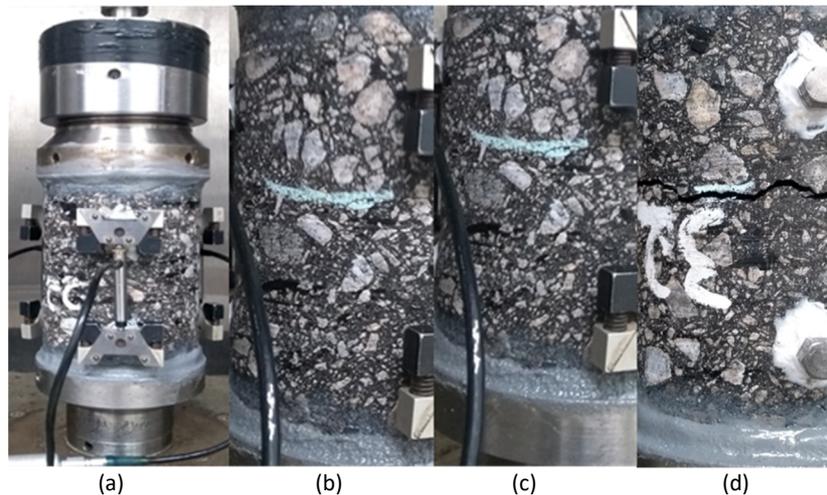


Figura 8. Evolução de trincas: (a) CP íntegro, (b) início de macrotrinca, (c) aumento, (d) CP rompido

Os dados referentes ao processamento do sinal e cálculo do dano das misturas asfálticas são ajustados utilizando a Equação 2 que fornece a curva característica de dano (C versus S) (Figura 9a).

$$C = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \tag{2}$$

Onde: C₁₁ e C₁₂ são coeficientes de ajuste do modelo.

Além dessa curva, após o processamento de dados, foi avaliada a variação da energia de pseudo-deformação para o Nf de cada CP. Assim foi obtido também um modelo de regressão para essa curva G_R versus Nf (Figura 9b).

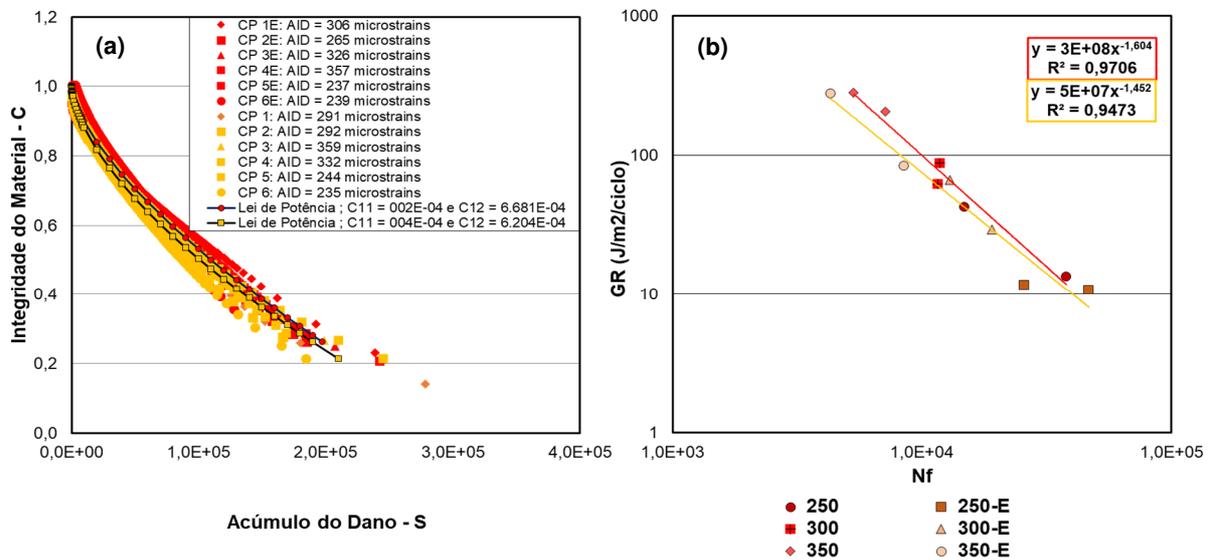


Figura 9. (a) Curva característica de dano (b) G_R versus Nf para M2 e M2E

Nota-se pelas curvas que ambas as metodologias geram CPs com comportamento semelhante, cujas curvas características de dano confundem-se, como é possível ver na Figura 9a. No entanto, ao comparar as curvas de dano médias obtidas pela Equação 2, observa-se variação nos coeficientes com afastamento mais nítido com a evolução do Nf. Isso pode indicar que a metodologia de obtenção do CP resultou em alguma variação no comportamento da mistura.

Os coeficientes da Equação 2 indicam variação entre os métodos. No entanto, a variação da integridade e de dano na falha ($Cf_{médio}$, $Sf_{médio}$), assim como a relação de módulo dinâmico médio $DMR_{médio}$ entre as amostras de cada metodologia foram próximas (Tabela 5). Foi calculada também a variação entre os valores médios das duas metodologias tomando-se como referência os resultados dos CPs moldados.

Tabela 5 – $Cf_{médio}$, $Sf_{médio}$, $DMR_{médio}$ de M2 e M2E e Variação de $Cf_{médio}$, $Sf_{médio}$, $DMR_{médio}$

	M2			M2E		
	Sf Médio	Cf Médio	DMR médio	Sf Médio	Cf Médio	DMR médio
Valor	210334,65	0,23	0,91	197505,79	0,26	1,00
CV(%)	20,16	22,65	4,13	21,51	19,69	4,88
Variação						
	Sf Médio (%)		Cf Médio (%)	DMR médio (%)		
$\left(\frac{M2E - M2}{M2}\right) \times 100$	-6,10		17,20	9,70		

Visto que todos os CPs tiveram as extremidades serradas e Vvs em torno de $4,0 \pm 0,4\%$, foi ignorada a possibilidade de Vvs discrepantes entre os CPs. Também foi desconsiderada possível concentração de Vvs nas extremidades que induzissem a ruptura fora da região de captura dos LVDTs. Além disso, a variação de Cf e Sf foi próxima para ambos os métodos.

4.4. Teor de Ligante e Granulometria

Devido às hipóteses levantadas durante a análise da deformação permanente por FN e SSR, foi realizada a avaliação da granulometria dos CPs extraídos e CPs moldados (Figura 10) para M1 e M2. Observa-se leve variação entre as curvas granulométricas, principalmente para agregados graúdos em M1, e de maneira distribuída em M2. Além da granulometria, foi avaliada a possibilidade de variação no teor de ligante entre as amostras (Figura 11). Observou-se que, para M1, houve redução do teor de ligante além do admitido na especificação de serviço 031 (DNIT, 2006). No entanto, não foi verificada variação para M2.

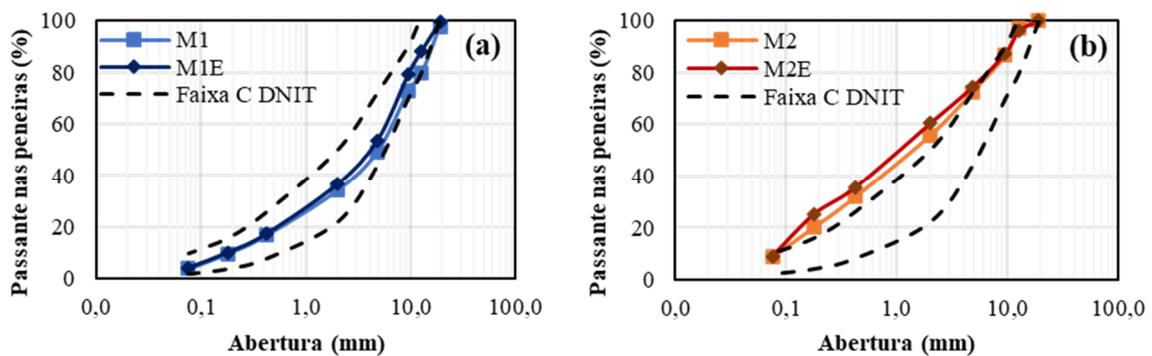


Figura 10. Variação Granulométrica de (a) M1 e M1E, (b) M2 e M2E

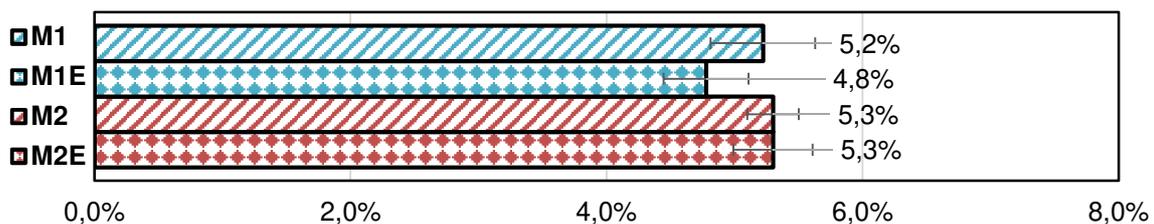


Figura 11. Variação do teor de ligante

Acredita-se que as variações evidenciadas nas Figuras 10 e 11 sejam decorrentes da ordenação dos agregados durante a compactação, além do procedimento de extração que pode remover parte do ligante que tenha se deslocado para as bordas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram consideradas duas misturas asfálticas, M1 e M2, para avaliação dos efeitos do uso de corpos de prova moldados e extraídos quanto à caracterização mecânica. A mistura M1 foi usada, prioritariamente, para montagem e calibração do aparato de extração e condições de compactação para obter os Vvs desejados para ensaio nos CPs extraídos e serrados. Dessa forma, M1 foi utilizada apenas para avaliação quanto ao FN e SSR, enquanto M2 foi avaliada para todos os ensaios investigados: MR, RT e FN, além dos ensaios mais avançados: $|E^*|$, SSR e fadiga TC. Não foi objetivo do trabalho a comparação entre as misturas, mas sim uma avaliação quanto aos efeitos do uso de CPs moldados ou extraídos para as avaliações mecânicas. A motivação da pesquisa está relacionada às hipóteses de que um CP extraído é mais homogêneo quanto à distribuição dos Vvs, eliminando regiões mais heterogêneas e com uma possível aproximação ao comportamento em campo. As principais conclusões podem ser divididas em grupos quanto aos ensaios realizados, conforme descrito a seguir:

- Para a deformação permanente, M1 apresentou comportamento de perda de resistência dos CPs extraídos em relação aos moldados para ambos FN e SSR. Considerando M2, a tendência foi verificada apenas para o SSR. Supõe-se que os ensaios de deformação permanente, sobretudo o SSR cuja redução de resistência foi verificada em M1 e M2, sejam mais suscetíveis às variações de distribuição dos Vvs na amostra e possíveis efeitos de cortes dos agregados decorrentes do processo de extração. Assim, uma variável de estado dependente do confinamento poderia estar relacionada aos resultados mais expressivos do SSR.
- Quanto à RT e ao MR, foram observados resultados equiparáveis entre ambas as metodologias, não justificando a preferência por CPs extraídos ou moldados. Porém, a resposta obtida por compressão diametral se concentra na porção central do CP, alinhada ao sentido de aplicação da carga. Supõe-se que a condição de borda com corte de agregados e redução de Vvs periféricos não influenciem significativamente essas análises.
- Para $|E^*|$, verificou-se variações principalmente nas baixas e altas frequências reduzidas, alta (54,4°C) e baixa temperatura (-10°C), respectivamente. As amostras extraídas apresentaram redução na rigidez, especialmente em altas temperaturas. Isso corrobora com a redução da resistência à deformação permanente para o SSR cujas respostas foram de maior acúmulo de deformação para os CPs extraídos. Também é notável a concordância entre resultados do MR e $|E^*|$, sobretudo de CPs extraídos.
- A avaliação dos resultados de fadiga TC apontam diferenças entre as metodologias de obtenção de CPs a partir da evolução do Nf, porém todos os CPs utilizados encontravam-se dentro do limite de $4,0 \pm 0,4\%$ com extremidades serradas, altura de 130mm e DMR acima de 0,9. Dessa maneira, atribui-se divergência entre as curvas C versus S à variação da rigidez verificada para os CPs extraídos, que apresentaram redução da integridade menos acentuada em relação aos moldados.
- Ainda que sejam verificadas variações entre os métodos, o uso de CPs extraídos ou moldados mostra-se equivalente para a maioria dos ensaios avaliados. A ressalva é feita apenas para os ensaios de deformação permanente, em especial o SSR.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PRH/ANP-31 e à FINEP pela bolsa do primeiro autor, ao CNPq pela bolsa do terceiro autor e à Insttale Engenharia pela mistura asfáltica cedida.

REFERÊNCIAS

- AASHTO (2019) TP 134: *Provisional Standard Method of Test for Stress Sweep Rutting (SSR) Test Using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. Washington.
- AASHTO (2014) TP 107: *Determining the damage characteristic curve of asphalt concrete from direct tension cyclic fatigue tests*. Washington.
- Araújo Jr., P. C.; W. L. G. Ferreira; V. T. F. Castelo Branco e J. B. Soares (2009) Considerações a respeito dos ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico. *XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Vitória.
- Babadopulos, L. F. A. L.; J. B. Soares e V. T. F. Castelo Branco (2015) Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics. *TRANSPORTES*, v. 23, n. 2, p. 85-94. DOI: 10.14295/transportes.v23i2.898.
- Bastos, J. B. S.; S. A. T. Silva; J. B. Soares; L. A. H. Nascimento e Y. R. Kim (2016) Triaxial stress sweep test protocol considerations for permanent deformation characterization of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 2, p. 431-444. DOI: 10.1080/14680629.2016.1261729.
- Bastos, J. B. S.; J. B. Soares e L. A. H. Nascimento (2017) Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. *TRANSPORTES*, v. 25, n. 2, p. 19-40. DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1284.
- Chehab, G. R.; E. O'Quinn e Y. R. Kim (2000) Specimen geometry study for direct tension test based on mechanical tests and air void variation in asphalt concrete specimens compacted by Superpave gyratory compactor. *Transportation Research Record*, v. 1723, p. 125-132. DOI: 10.3141/1723-16.
- Choi, Y. T. e Y. R. Kim (2013) Development of a calibration testing protocol for the permanent deformation model of asphalt concrete. *Transportation Research Record*, v. 2373, p.34-43. DOI: 10.3141/2373-04.
- Daniel, J. S. e Y. R. Kim (2002) Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model. *Journal Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 71, p. 619-650.
- DNER 053/1994 – ME (1994) *Misturas betuminosas – percentagem de betume. Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- DNIT 031/2006 – ES (2006) *Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro.
- DNIT 135 – ME (2018) *Pavimentação - Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- DNIT 136 – ME (2018) *Pavimentação - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- DNIT 184 – ME (2018) *Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- DNIT 416 – ME (2019) *Pavimentação - Misturas asfálticas – Determinação do Módulo Dinâmico – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Di Benedetto, H.; C. De La Roche; H. Baaj; A. Pronk e R. Lundström (2004) Fatigue of Bituminous Mixtures. *Materials and Structures*, v. 37, p. 202-216. DOI: 10.1007/BF02481620.
- Harvey, J.; K. Eriksen; J. Sousa e C. L. Monismith (1994) Effects of Laboratory Specimen Preparation on Aggregate-Asphalt Structure, Air Void Content Measurement, and Repetitive Simple Shear Test Results. *Transportation Research Record*, v. 1454 p. 113-122.
- Kim, D. e Y. R. Kim (2017) Development of Stress Sweep Rutting (SSR) test for permanent deformation characterization of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 373-383. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.172.
- Leandro, R. P.; K. L. Vasconcelos e L. L. B. Bernucci (2017) Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.178.
- Lee, K.; S. Pape; C. Castorena e Y. R. Kim (2017) Evaluation of Small Specimen Geometries for Asphalt Mixture Performance Testing and Pavement Performance Prediction. *Transportation Research Record*, v. 2631, p. 74-82. DOI: 10.3141/2631-09.
- Nascimento, L. A. H. (2015) *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. Tese (doutorado), Graduate Faculty of North Carolina State University. Raleigh, North Carolina.
- Pape, S.; K. Lee; C. Castorena e Y. R. Kim (2018) Optimization of the Laboratory Fabrication of Small Specimens for Asphalt Mixture Performance Testing. *Transportation Research Record*, v. 2672, n. 28, p. 438-450. DOI: 10.1177/0361198118790845.
- Pinheiro, G. S.; L. P. Specht; C. Faccin; P. M. Vestena; L. F. A. L. Babadopulos e D. S. Pereira (2019) Módulo complexo de amostras de concretos asfálticos extraídos e não extraídos obtido por dois históricos de carregamento: compressão e tração-compressão. *Anais do XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Balneário Camboriú.
- Robinette, C. e R. C. Williams (2006) The Effects of the Testing History and Preparation Method on the Superpave Simple Performance Test. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 75, p. 297-320.
- Silva, L. S. V.; J. B. S. Bastos e J. B. Soares (2020) Avaliação mecânica de misturas asfálticas utilizando corpos de prova extraídos e moldados. *Anais do XXXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*, v. 1. 100% Digital.

- Tashman, L.; E. Masad; J. D'Angelo; J. Bukowski e T. Harman (2002) X-ray Tomography to Characterize Air Void Distribution in Superpave Gyrotory Compacted Specimens. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 3, p. 19-28. DOI: 10.1080/10298430290029902a.
- Thyagarajan, S.; L. Tashman; E. Masad e F. Bayomy (2010) The heterogeneity and mechanical response of hot mix asphalt laboratory specimens. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 11:2, p. 107-121. DOI: 10.1080/10298430902730521.
- Underwood, B. S.; C. Baek e Y. R. Kim (2012) Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis. *Transportation Research Record*, v. 2296, p. 36-45. DOI: 10.3141/2296-04.
- Vale, A. C. F.; L. S. Oliveira; J. B. Soares; J. B. S. Bastos e L. F. A. L. Babadopulos (2021) Impact of the addition of fly ash on the mechanical behavior of asphalt mixtures. *Anais do XXXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*, v. 1. 100% Virtual.
- Yoder, E. J. e M. W. Witzczak (1975) *Principle of Pavement Design. 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Hoboken.