

ASPECTOS DOS ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE E A PERSPECTIVA BRASILEIRA PARA UTILIZAÇÃO NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Larissa Montagner de Barros¹
Caroline Dias Amancio de Lima²
Luis Alberto Herrmann do Nascimento³
Laura Maria Goretti da Motta⁴
Francisco Thiago Sacramento Aragão⁵

^{1, 2, 4, 5} Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ
³ CENPES/Petrobras, Brasil

RESUMO

Assim como em muitos outros países, o modal rodoviário é o principal meio de transporte de pessoas e produtos no Brasil, e os pavimentos sofrem degradação com este uso intenso devido a diversos fatores. Destaca-se neste artigo o defeito de deformação permanente, que encarece o custo de operacionalidade e diminui o conforto e a segurança do usuário. Buscando reproduzir o mecanismo de evolução deste tipo de dano, diversos protocolos experimentais disponíveis na literatura podem ser adotados para avaliar a deformabilidade plástica dos materiais usados nas camadas de pavimentos. Contudo, a consideração destes ensaios no dimensionamento de pavimentos no país é ainda limitada. Neste contexto, o presente artigo tem por objetivo salientar a importância de ensaios de laboratório que visam prever a deformação permanente de materiais utilizados em pavimentos asfálticos. Faz-se uma revisão dos ensaios utilizados para essa finalidade e indica-se os que estão em maior uso no Brasil.

ABSTRACT

As for several other countries, the road transportation mode is the main means for the transportation of people and goods, and the pavements suffer degradation with this intense use due to several factors. This article highlights the permanent deformation distress, which raises the cost of operation and reduces the user's comfort and safety. In order to reproduce the mechanism of evolution of this damage type, several experimental protocols available in the literature may be adopted to evaluate the plastic deformability of materials used in the pavement layers. However, the consideration of such tests on the pavement design is still limited in Brazil. In this context, this article aims to emphasize the importance of laboratory tests that aim to predict the permanent deformation of materials used in asphalt pavements. A review of the tests used for this purpose is presented and the experimental protocols most used in Brazil.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o transporte de cargas e passageiros tem predominância do modal rodoviário, e neste os pavimentos asfálticos são maioria absoluta. Historicamente, o defeito estrutural mais comum nos pavimentos asfálticos tem sido o trincamento por fadiga, tendo em vista que o método de dimensionamento tradicional não leva em conta este aspecto e que, também, tem-se solos de boa qualidade e clima favorável quanto à umidade de equilíbrio das camadas geotécnicas.

No entanto, dois aspectos principais chamam a atenção, no momento atual, quanto à prevenção e tratamento do defeito de deformação permanente: o aumento exponencial do volume e peso dos veículos comerciais e a implementação do novo método de dimensionamento mecanístico-empírico brasileiro, lançado em 2018.

O mecanismo de deformação permanente das misturas asfálticas é influenciado pela dosagem (o esqueleto mineral escolhido, o tipo e o teor de ligante asfáltico), pela temperatura máxima a que os materiais estarão submetidos, pela pressão dos pneus e pela velocidade dos veículos. Para os solos e britas, os principais fatores que influenciam são a umidade de compactação e a natureza do solo, além da forma dos grãos e do arranjo granulométrico para as britas.

Quanto às deformações plásticas, assunto abordado neste artigo, há ensaios de deformação permanente que caracterizam a parcela plástica da deformação total quando o material é

solicitado por cargas repetidas. A partir desses ensaios, espera-se avaliar o surgimento e o acúmulo deste defeito para que o pavimento seja bem dimensionado e atinja a sua vida útil prevista.

Como o problema de afundamento de trilha de rodas, consequência do acúmulo de deformações plásticas, é um defeito estrutural relevante, tem sido foco de muitos estudos e há diferentes tipos de ensaios e modelos de previsão focados na mistura asfáltica ou nos materiais granulares e nos solos. Guimarães salientou, em 2009, que havia uma grande diversidade de modelos para solos e britas em outros países e pouca pesquisa voltada para camadas de base e sub-base no Brasil. Além disso, recomendou que, para se ter a garantia de que não haverá ruptura plástica do pavimento como um todo deve-se buscar solos granulares e finos que apresentem acomodamento das deformações permanentes após poucos ciclos de aplicação de cargas.

Diversos países implantaram ou estão implantando métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento aplicando a mecânica dos pavimentos. Estes métodos consideram que o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas em que cada material contribui com uma parcela para o seu desempenho final.

No Brasil, iniciou-se o processo de transição do método empírico para o método mecanístico-empírico e é necessário difundir o conhecimento a este respeito. O pavimento passará a ser melhor dimensionado se utilizados os conceitos da mecânica dos pavimentos com ensaios mais apropriados para a seleção dos materiais.

Neste contexto, este artigo aborda diversos aspectos dos ensaios de laboratório que visam prever o comportamento plástico, ou seja, a deformação permanente, de materiais utilizados na pavimentação. Faz-se uma revisão dos ensaios utilizados para essa finalidade e indica-se os que estão em maior uso no Brasil.

2. A DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A deformação permanente é definida como o acúmulo de parcelas irrecuperáveis resultantes da aplicação de cargas repetidas ao pavimento, sendo considerada um dos defeitos estruturais mais comuns que o pavimento asfáltico pode apresentar. Este defeito pode estar relacionado a todas as camadas do pavimento, como resultado da associação entre a carga de tráfego e os fatores ambientais, conhecida como deformação estrutural, ou somente resultante do afundamento da camada de revestimento.

A deformação em misturas asfálticas devido à passagem de um único veículo é tipicamente muito pequena, mas a passagem consecutiva de veículos pode levar à deformação permanente considerável desta camada, principalmente em situações de temperatura elevada e dosagem inadequada (Partl *et al.*, 2013). No caso das britas e dos solos finos, o surgimento de deformação permanente devido às cargas aplicadas (intensidade e quantidade), pode ocorrer desde a abertura ao tráfego, mas pode cessar após certo número de ciclos caso o material tenha sido bem selecionado e compactado na umidade ótima.

O acúmulo destas deformações plásticas para os materiais granulares e solos aplicados em camadas no pavimento são decorrentes de diferentes fatores: condições climáticas e de tráfego, propriedades intrínsecas dos materiais, grau de compactação, teor de umidade, entre outros. Lekarp *et al.* (2000) comentaram a influência da atuação do conjunto de alguns destes fatores, incluindo os efeitos dos níveis de tensões e história de tensões. Autores diversos continuam estudando estes fatores de campo por meio de ensaios de laboratório. Lima *et al.*

(2019), por exemplo, buscaram avaliar a influência da variação de umidade de compactação no surgimento de deformação permanente em campo por meio de ensaios de laboratório.

Já com relação aos materiais betuminosos, a deformação permanente depende em grande parte da temperatura, e secundariamente do nível de tensão e do tempo de carregamento (Bell, 1978). Sousa *et al.* (1991) fizeram uma relação de diversos parâmetros que influenciam na deformação permanente de misturas asfálticas, dos constituintes isolados e da mistura como um todo.

A melhor abordagem em projetos de pavimentos é limitar o potencial à deformação permanente e à fadiga, de modo que a qualidade do pavimento não decaia rapidamente. O mecanismo pelo qual o afundamento do revestimento asfáltico ocorre pode ser explicado por dois conceitos: densificação (diminuição do volume) e deslocamento por cisalhamento (movimento do material sem alterar o volume) (Elnasri, 2015; Kutay *et al.*, 2017).

O mecanismo de surgimento de deformação permanente nas camadas granulares/solos também pode ser por densificação e por deslocamento cisalhante. Segundo Werkmeister *et al.* (2002), um projeto de pavimento bem-sucedido é aquele em que o pavimento é capaz de resistir à acumulação de deformação permanente em todas as camadas. Para estes autores, o dimensionamento considerando as camadas granulares e os solos implica no conhecimento de uma tensão máxima associada a uma resposta unicamente resiliente, ou seja, saber se o material apresenta limite de acomodamento das deformações permanentes e situações de deformações permanentes não controladas que devem ser evitadas. Nos métodos de dimensionamento, geralmente considera-se um limite máximo do afundamento de trilhas de rodas aceitável para um pavimento ainda estar em serviço. No MeDiNa, por exemplo, estes limites são especificados de acordo com o tipo de via.

3. ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Em geral, os ensaios de laboratório para a previsão da deformação permanente ainda são restritos, no país, aos centros de pesquisas. Contudo, a crescente consideração sobre a importância desse defeito na vida útil do pavimento e a busca pela padronização de normas de ensaio e por um modelo de dimensionamento mais moderno aumentaram a utilização destes ensaios. A seguir, é feita uma revisão dos principais tipos de ensaios usados para as misturas asfálticas e para as camadas geotécnicas.

3.1. Deformação permanente de misturas asfálticas

Entre os ensaios que têm sido aplicados para o estudo da deformação permanente de misturas asfálticas, destacam-se os de carga repetida uniaxial e triaxial e os simuladores de tráfego. A Figura 1 mostra imagens dos equipamentos para realização dos ensaios detalhados neste artigo.

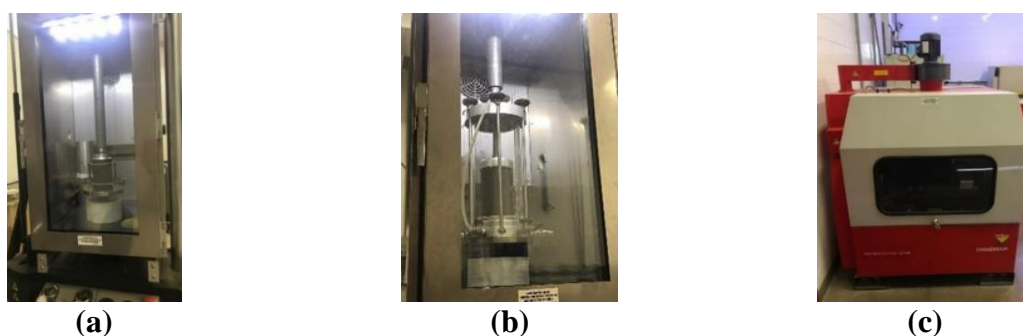


Figura 1: Equipamentos para avaliação de deformação permanente de misturas asfálticas: (a) ensaio uniaxial de carga repetida, (b) ensaio triaxial de varredura de tensões e ensaio *stress sweep rutting*, e (c) simuladores de laboratório

3.1.1. Ensaio uniaxial de carga repetida (EUCR)

Ensaio recentemente normalizado no Brasil com a NBR 16505/2016, que também foi adaptado pelo DNIT 184/2018 - ME. Este tem ganhado maior destaque nos últimos anos. O EUCR é utilizado como critério de avaliação das misturas asfálticas quanto à deformação permanente, sendo um ensaio simples e que permite estimar o desempenho futuro da mistura em campo.

O ensaio consiste basicamente na aplicação de carregamento cíclico de compressão uniaxial no formato *haversine*, com frequência de 0,1 s de carregamento seguido por 0,9 s de repouso, e as deformações acumuladas são registradas para cada ciclo de carga. A tensão aplicada durante a fase de carregamento é de 204 ($\pm 4,0$) kPa e durante a fase de repouso aplica-se 5% da tensão de carregamento ($10,2 \pm 0,5$ kPa). O ensaio é realizado em corpos de prova cilíndricos, com 150 mm ($\pm 2,5$ mm) de altura e 102 mm ($\pm 2,0$ mm) de diâmetro e volume de vazios (VV) de 7% ($\pm 0,5$ %), submetidos à temperatura de 60°C (com condicionamento prévio de no mínimo 3 horas). Tipicamente, o ensaio é realizado até 7.200 ciclos (2 horas) ou até que seja identificada a ruptura do corpo de prova, que corresponde à transição para a zona terciária na curva de deformação plástica vertical uniaxial.

A resposta do ensaio é representada em gráficos que mostram a evolução da deformação permanente com o número de ciclos de carga e pode ser dividida em três estágios, como pode ser observado na Figura 2. O número de ciclos onde o ensaio passa da fase secundária para a terciária é referido como número de fluxo ou *Flow Number* (FN) e está evidenciado no gráfico.

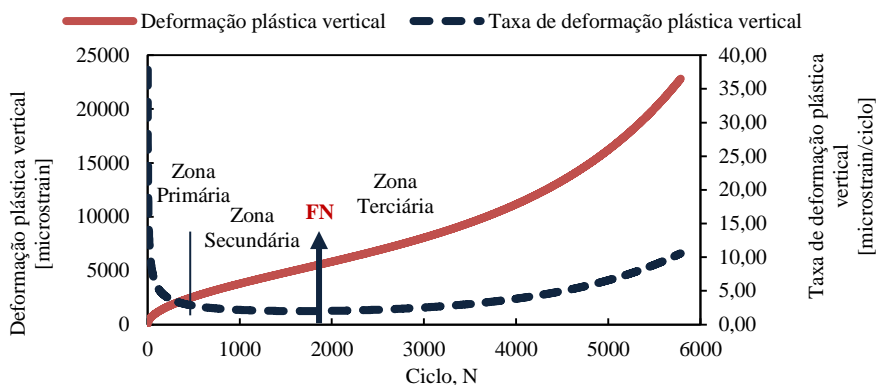


Figura 2: Relação entre a deformação total acumulada, a taxa em que as deformações ocorrem e o número de ciclos

O FN é número do ciclo no qual a taxa de deformação é mínima e no qual o corpo de prova (CP) começa a entrar na fase de cisalhamento a volume constante. Alguns autores brasileiros já sugeriram valores de referência do FN para níveis de tráfego, como é observado na Tabela 1. Já as fases representadas na Figura 2 podem ser descritas (Adorjányi e Füleki, 2013; Mirzahosseini *et al.*, 2015; NBR 16505/2016; DNIT 184/2018 - ME) como:

- Fase primária: as deformações são crescentes a uma taxa decrescente. Nesta fase há uma boa representação da densificação do material, associada tipicamente à mudança volumétrica; corresponde ao nível inicial de deformação que ocorre tipicamente até o segundo ano da vida de serviço do pavimento.
- Fase secundária: as deformações são crescentes a uma taxa com pequenas variações. A deformação permanente acumulada nesta fase é tipicamente menor que a observada na fase primária, contudo, a deformação ainda é associada a pequenas variações

volumétricas para pavimentos com bom desempenho; espera-se que as deformações fiquem dentro desta etapa durante a vida útil.

- Fase terciária: as deformações são crescentes a uma taxa crescente. Durante esta etapa, a deformação é causada principalmente por deformação cisalhante, havendo um alto nível de deformação permanente acumulada não associada a alterações volumétricas.

Nascimento (2008) compatibilizou índices oriundos da curva de compactação do compactador giratório e valores de deformação obtidos no simulador francês LCPC para recomendar valores de FN. Bastos *et al.* (2017) utilizaram clusters para agrupar as misturas dos trechos investigados de acordo com o tráfego, propondo, ao final da análise, os valores apresentados na Tabela 1. Os valores propostos por Nascimento serviram de referência para os adotados no novo método de dimensionamento (MeDiNa) proposto recentemente no país.

Tabela 1: Critérios de FN para diferentes níveis de tráfego (adaptado de Nascimento, 2008 e Bastos *et al.*, 2017)

Pesquisa	Tensão axial (kPa)	Temp. (°C)	Volume de vazios (%)	Nível de Tráfego (FN mínimo)			
				Leve < 3x10 ⁶	Médio 3x10 ⁶ ; 1x10 ⁷	Pesado 1x10 ⁷ ; 3x10 ⁷	Ext. pesado > 3x10 ⁷
Nascimento (2008)	204	60	6,5 a 7,5	----	100	750	----
Bastos <i>et al.</i> (2017)	204	60	5,0 a 7,5	< 100	100	300	> 1000

3.1.2. Ensaio triaxial de varredura de tensões (TSS)

O objetivo do ensaio é relacionar o desempenho durante a vida útil da mistura em campo com o seu comportamento em laboratório quando se variam as condições impostas, ou seja, temperatura, número de repetições de carga, taxa de carregamento e níveis de deformação. A variação de diferentes parâmetros permite prever o comportamento quanto à deformação permanente ao longo da vida útil do pavimento aproximando as deformações previstas das lidas na camada asfáltica. O ensaio é complexo e tem ganhado destaque recentemente (Subramanian, 2011; Choi, 2013; Borges, 2014; Bastos *et al.*, 2015). É definido pela aplicação de cargas de compressão cíclica, sob pressão confinante constante com pulso *haversine*, seguido por um período de repouso (Bastos *et al.*, 2015) e é dividido em duas etapas: primeiramente, é realizado o ensaio de referência triaxial de deformação permanente com carregamento repetido (TRLPD - *Triaxial Repeated Load Permanent Deformation*) e, posteriormente, são realizados ensaios múltiplos de varredura de tensão (MSS - *Multiple Stress Sweep*) (Choi, 2013).

No Brasil, o protocolo de ensaio TSS foi estudado na UFC (Borges, 2014 e Bastos *et al.*, 2015). Houve dificuldade em finalizar os ensaios TRLPD e MSS devido à ruptura prematura das amostras, inviabilizando a utilização completa do protocolo. Com base nos resultados encontrados nestes estudos, Bastos *et al.* (2016) realizaram uma análise das tensões que estavam sendo aplicadas no TSS a fim de aproximar os valores aos representativos da realidade brasileira, em que os pavimentos são mais esbeltos (aproximadamente 10 cm). Ao final, os autores propuseram o aumento da tensão confinante e a diminuição da tensão desvio, de modo que a σ_1 , neste ensaio como tensão vertical, manteve-se inalterada.

O ensaio de TSS é envolvente experimentalmente, no entanto, permite o uso de modelos viscoplásticos para a previsão do desempenho de pavimentos asfálticos. O EUCR apresenta-se como uma ferramenta para a avaliação de misturas asfálticas ainda no processo de dosagem e o ensaio de TSS parece ser mais apropriado para uso nos modelos de previsão de

desempenho, que possam ser associados ao dimensionamento, para prever o afundamento oriundo da camada asfáltica.

3.1.3. Ensaio stress sweep rutting (SSR)

O ensaio triaxial mais recente desenvolvido foi proposto por Kim (2015), como uma alternativa simplificada do ensaio TSS proposto por Choi (2013). O principal objetivo do SSR é facilitar a caracterização da mistura asfáltica em laboratório quanto à deformação permanente. Enquanto o protocolo do TSS requer quatro ensaios (referência, temperatura alta, temperatura intermediária e temperatura baixa) além de duas réplicas para eliminar a variabilidade, sendo necessários dois dias para avaliar uma única mistura, o ensaio SSR simplifica esse procedimento necessitando de dois ensaios (temperatura alta e temperatura baixa) e há também uma alteração da ordem do carregamento para temperatura alta. Na Figura 3 é possível visualizar as diferenças destes dois ensaios.

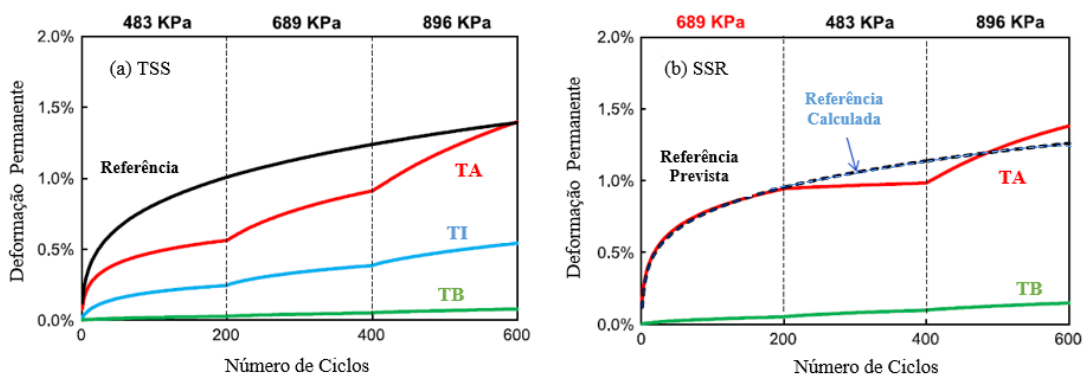


Figura 3: Comparação das curvas de ensaio do TSS e do SSR (adaptado de Kim e Kim, 2017)

Tabela 2: Diferenças entre os protocolos de ensaio TSS e SSR (adaptado de Bastos *et al.*, 2016; Kim e Kim, 2017; NBR 16505/2016 e DNIT 184/2018 - ME)

Método de ensaio	SSR (NCSU)	TSS (NCSU)	TSS (UFC)	EUCR (ABNT, DNIT)
Medida de deformação	Deslocamento do atuador da máquina	CP - LVDTs	CP - LVDTs	CP - LVDTs
Referência TSS	---	1 (TA)	1 (TA)	1 (TA)
Nº testes	2 (TA e TI)	3 (TA, TI e TB)	3 (TA, TI e TB)	1 (TA)
Total de amostras	4	8	8	3
Tempo total de ensaio (incluindo condicionamento)	6	16	16	5
Tempo de pulso	0,4	0,4	0,4	0,1
Tempo de descanso	3,6 (TA) e 1,6 (TB)	10,0 (TA) e 1,6 (TB e TI)	10,0 (TA) e 1,6 (TB e TI)	0,9
Tensão Desvio (kPa)	689 / 482 / 896 (TA) e 482 / 689 / 896 (TB)	482 / 689 / 896	482 / 689 / 896	204 ± 4
Tensão Confinante (kPa)	69	69	138	-
Número de ciclos	200 (para cada bloco de tensão desvio)			7200

* TA - temperatura alta, TI - temperatura intermediária e TB - temperatura baixa (a temperatura de ensaio depende do local em que a mistura será utilizada)

Obs: No ensaio TSS, a curva de referência é executada com 600 ciclos

No SSR, não é necessário realizar o ensaio de referência, pois a curva de referência deste ensaio é resultado do primeiro bloco de carregamento de 200 ciclos, na alta temperatura.

Como no ensaio TSS a curva é construída com informações de 600 ciclos, no SSR há uma extrapolação dos resultados a partir de um modelo incremental (Kim e Kim, 2017). Além da análise da redução de temperaturas, estes dois autores ainda fizeram uma análise do tempo de descanso necessário em cada carregamento e da necessidade de as medidas de deformação serem feitas com LVDTs. A Tabela 2 traz um resumo do EUCR e das modificações realizadas do TSS para o SSR, além das diferenças do TSS proposto pela UFC.

3.1.4. Simuladores de laboratório

Outra maneira para a avaliação da deformação permanente é com o uso de simuladores de tráfego, de verdadeira grandeza ou de laboratório. Há diversos modelos de simuladores de laboratório que apresentam um bom resultado quanto à deformação permanente. Alguns dos modelos mais utilizados são detalhados a seguir.

O simulador de tráfego francês, desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) no final dos anos 1960 com a finalidade de estudar o afundamento da trilha de roda na fase de dosagem das misturas asfálticas (Fritzen, 2005). As misturas são submetidas a diferentes condições de temperatura e carregamento para simular as condições próximas das do campo. As misturas asfálticas são moldadas em placas retangulares com 500 mm de comprimento, 180 mm de largura e 50 ou 100 mm de espessura (Borges, 2014). A mistura é compactada por amassamento, com volume de vazios após a compactação próximo ao esperado no campo. A análise da medida do afundamento de trilha de roda nas misturas asfálticas fundamenta-se em especificações francesas. Utiliza-se o critério de porcentagem máxima de afundamento de 10%, em relação à espessura da amostra analisada para 30.000 ciclos, para misturas de concreto asfáltico adequadas à camada de revestimento (Fritzen, 2005; Moura 2010).

O simulador norte-americano, o *Asphalt Pavement Analyser* (APA), surgiu em 1996, como aprimoramento do simulador desenvolvido pelo Departamento de Transportes da Geórgia, objetivando introduzir um método simplificado de ensaios para a previsão de características da deformação permanente das misturas asfálticas (Sá, 1996; Cooley *et al.*, 2000 e Fritzen, 2005). O equipamento permite avaliar a deformação permanente, o trincamento por fadiga e a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas (Fritzen, 2005).

O *Hamburg Wheel Test* (HWTD) foi desenvolvido na Alemanha e é utilizado como requisito de especificação de algumas rodovias alemãs mais movimentadas, visando avaliar o afundamento de trilha de roda e a degradação da mistura. Os ensaios são conduzidos em placas de 260 mm de largura e 320 mm de comprimento e espessura de 40 mm, compactadas por amassamento linear com volume de vazios entre 6% e 8%. Os ensaios são realizados com as amostras submersas, com temperaturas variando entre 25°C e 70°C, sendo 50°C a temperatura mais usual. O carregamento é realizado por aplicação de uma força de 705 N, com uma roda de aço de 47 mm de largura, com velocidade de deslocamento de aproximadamente 340 mm/s. As amostras são submetidas ao carregamento de 20.000 ciclos ou até atingirem 20 mm de deslocamento vertical (Cooley *et al.*, 2000).

3.2. Deformação permanente de materiais granulares e solos

Os equipamentos mais usados para determinação da deformação permanente de materiais granulares e de solos são os triaxiais de cargas repetidas (TCR), que podem apresentar inúmeras variações quanto à posição de leitura, condições de ensaio drenadas ou não, dimensões de corpo de prova, frequência, entre outras características. Em alguns casos, simuladores em grande escala, ou de verdadeira grandeza, também são usados para análises

deste tipo. A Figura 4 mostra alguns destes equipamentos.



Figura 4: Equipamento (a) TCR, (b) simuladores em grande escala e (c) tanque teste

3.2.1. Ensaio de multiestágios e de estágio único no TCR

Os ensaios deste tipo visam simular como o material é solicitado em campo; as cargas aplicadas representam as passagens dos eixos dos veículos. Os TCRs, em geral, aplicam uma tensão confinante constante, enquanto na direção vertical é aplicada de forma cíclica, podendo variar a frequência. As dimensões dos corpos de prova variam de acordo com a granulometria do material a ser ensaiado para que não haja influência da parede, devendo o material obedecer à relação de diâmetro máximo das partículas para diâmetro do corpo de prova de 1:4. A quantidade de aplicações de cargas e a escolha das tensões dependem da norma seguida ou da análise a ser realizada. Os resultados das leituras no ensaio são fornecidos para diferentes números de aplicações de carga predeterminados.

Algumas normas estrangeiras, europeia e australiana, indicam realização de ensaios do tipo multiestágios (*multistages*), onde diferentes aplicações de estados de tensões são feitas no mesmo corpo de prova para certos números de ciclos, e do tipo estágio único (*single stage*), no qual são necessários vários corpos de prova submetidos a diferentes pares de tensões cada um.

Para fins de dimensionamento, a norma brasileira (DNIT, 2018) requer a realização dos ensaios na umidade ótima, do tipo drenado, com no mínimo 150 mil ciclos de aplicação de carga à frequência de até 2 Hz (tipo *haversine* com 0,1 s de aplicação de carga e 0,4 s de repouso) por corpo de prova que será submetido a um par de tensão, ou seja, ensaio do tipo estágio único. Os corpos de prova podem ser de dimensões (mm) diâmetro *versus* altura: 100 x 200 ou 150 x 300. É indicado que a curva de compactação seja produzida com os corpos de prova na mesma dimensão que serão ensaiados no TCR. A Figura 5 ilustra as diferenças de resultados destes dois protocolos de ensaio.

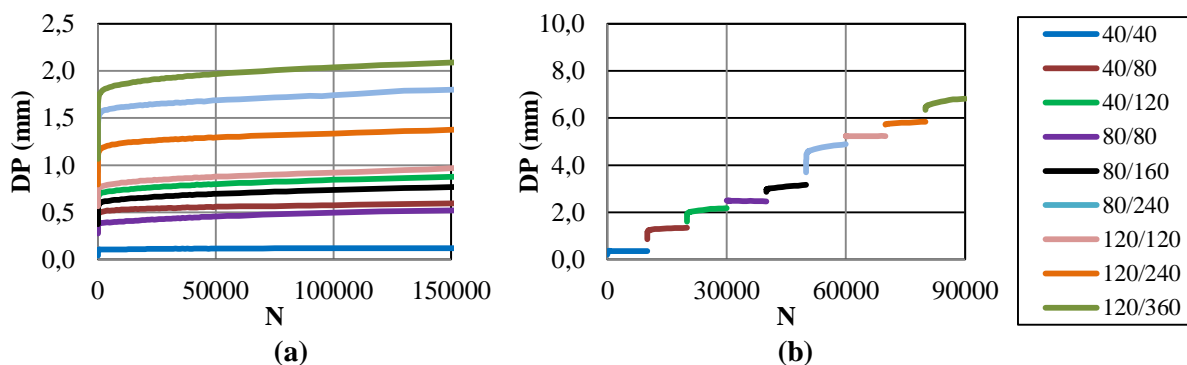


Figura 5: Exemplos de curvas resultantes de solos ensaiados em (a) estágio único e (b) multiestágios no TCR

Na norma DNIT (2018) são indicados nove pares de tensões, mas também é permitido que os engenheiros projetistas escolham outras tensões, sendo no mínimo seis, para que se possa obter os parâmetros do modelo de previsão da deformação permanente proposto. Os resultados permitem a avaliação do comportamento do material nas tensões ensaiadas e a previsão do desempenho deles quando utilizados os modelos do ensaio no dimensionamento.

3.2.2. Ensaio com simuladores em grande escala

Assim como para misturas, equipamentos em grande escala também foram desenvolvidos para laboratório e para campo. Os simuladores requerem a construção, em certos casos, de variadas camadas que são utilizados para análise das camadas subjacentes ao revestimento asfáltico, ou mesmo da mistura asfáltica e da estrutura do pavimento como um todo. A princípio, estes simuladores pretendem fornecer previsões acuradas do desempenho do material em serviço. São aplicadas rodas sobre uma curta seção do pavimento (pistas experimentais) mediante ciclos de carga contínuos, durante vários dias, mais rapidamente que em campo, para reproduzir o tráfego de projeto sobre os materiais ensaiados. Apesar de semelhantes, cada simulador tem suas próprias peculiaridades. Podem ser divididos em móveis e fixos, de pistas lineares ou circulares, estando na Figura 5b um exemplo de simulador fixo da UFRGS. Também há modelos físicos menores como o “Tanque Teste” da COPPE/UFRJ (Figura 5c), que já foi usado em várias teses.

Muitos países possuem simuladores de tráfego. O *Heavy Vehicle Simulator* (HVS), por exemplo, está presente em diversos países, incluindo a África do Sul, o Brasil, os Estados Unidos e países europeus. O do Lanamme UCR, na Costa Rica, possui um diferencial frente aos demais, pois está posicionado dentro de uma câmara climática que permite simulações dos pavimentos em laboratório nas condições climáticas em que os materiais estariam expostos em campo, variando, além da temperatura, parâmetros importantes como a umidade e a precipitação.

4. PERSPECTIVA BRASILEIRA

O Brasil está em um momento de transição, onde cada vez mais a importância de ensaios de laboratório para prever o comportamento de materiais está sendo levada em conta. Porém, ainda tem sido pequena a utilização destes ensaios de DP para fins de dimensionamento de pavimentos brasileiros, especialmente para solos e britas. O processo de busca por novos métodos de dimensionamento vem ocorrendo, e no ano de 2018 foi lançado oficialmente, pelo DNIT, o Método de Dimensionamento Nacional - MeDiNa, em que já é possível considerar a deformação permanente de materiais asfálticos (*Flow Number*), granulares e de solos.

No MeDiNa, consideram-se, além dos fatores de tráfego, as propriedades dos materiais (Ubaldo *et al.*, 2018; Fritzen *et al.*, 2019), havendo a necessidade de realização de ensaios de caracterização mecânica. Assim, aos poucos, os equipamentos necessários para as caracterizações estão sendo obtidos por diferentes agentes, universidades e construtoras. Equipamentos triaxiais de cargas repetidas, por exemplo, estão presentes em universidades como COPPE/UFRJ, UFC, UFCG, UFG, UFJF, UFRGS, UFSM, entre outras instituições. Os equipamentos para misturas asfálticas como o EUCR estão presentes nas seguintes instituições: CENPES, COPPE/UFRJ, UFC, UFRGS, UFSM, USP. Até o momento, só há relatos do uso do TSS na UFC.

Segundo Nascimento (2008), no Brasil, existem poucos simuladores em operação: cinco franceses desenvolvidos pelo LCPC nos laboratórios das seguintes instituições: CENPES,

COPPE/UFRJ, UFPR, UFSC e USP. Na UFC, há um simulador denominado Sistran, similar ao do LCPC, que foi desenvolvido com ajuda da iniciativa privada. Um equipamento norte-americano APA está em operação na Stratura Asfaltos. Algumas unidades de outros simuladores, como o HWT, também são encontradas em empresas da iniciativa privada. Quanto aos simuladores que podem analisar as diferentes camadas da estrutura, a UFRGS possui um simulador acelerado em verdadeira grandeza, e a COPPE/UFRJ possui um modelo físico, denominado “Tanque Teste”, que permite simular a oscilação do lençol freático e a precipitação.

No programa MeDiNa, a deformação plástica dos materiais granulares e solos constituintes das camadas abaixo do revestimento são considerados para o cálculo do afundamento de trilha de roda, e, para isso, foi implementado o modelo de previsão de DP proposto por Guimarães (2009). Os parâmetros deste modelo são obtidos por meio de regressão não linear dos resultados experimentais que são realizados com base na instrução de ensaio da primeira norma brasileira de deformação permanente, a DNIT 179/2018-IE (2018). Já com relação ao revestimento asfáltico, as análises estruturais por enquanto só consideram a fadiga, deixando de lado a deformação permanente, pois não há um modelo de desempenho consolidado no Brasil. No entanto, são disponibilizados limites de classes de desempenho do FN quanto à deformação permanente e o programa fornece o valor de FN que deverá ser exigido na obra.

Para o dimensionamento por este novo método, foram implementados critérios de parada como o de afundamento de trilha de roda total (em mm) da estrutura, correspondente a todas as camadas, incluindo o subleito, e porcentagem limite de aceitação de deformação permanente por camada. O afundamento de trilha de roda foi definido de acordo com o tipo de via pela hierarquia dos sistemas do DNIT, permitindo o máximo de 10 mm a 20 mm, de acordo com os seis tipos de via implementados no programa. Já quanto ao critério por camada, estas não podem apresentar DP acima de 5% e o subleito não pode deformar mais de 5 mm.

4.1. Trabalhos brasileiros realizados

Como comentado, os ensaios de deformação permanente estão ganhando destaque recentemente visando à previsão do desempenho dos materiais em campo. Pesquisas vêm sendo desenvolvidas no Brasil nos últimos anos a fim de avaliar o comportamento dos materiais asfálticos e das camadas geotécnicas, ou seja, analisar o pavimento como um todo.

Nos últimos anos, houve um crescente número de pesquisas utilizando ensaios para prever o comportamento de misturas asfálticas quanto à deformação permanente. Em uma busca a literatura, foram encontrados mais de 15 trabalhos publicados, tais como: Nascimento (2008), Moura (2010), Borges (2014), Bastos *et al.* (2016), Barros (2017) e Faccin (2018). Entre esses, constata-se que o ensaio mais utilizado é o EUCR, pois é de fácil realização e análise. Já os ensaios mais complexos, que permitem a avaliação durante a vida útil do pavimento, ainda têm aplicação muito restrita, necessitando de mais pesquisas nesse contexto, não havendo referência de pesquisa com o ensaio SSR no Brasil.

Ensaio de deformação permanente em materiais granulares e solos têm sido realizados principalmente nos equipamentos triaxiais de cargas repetidas próprios para este fim. Diferentes trabalhos nesta linha foram realizados após o ano de 2000, mas, ainda assim, poucos foram encontrados na literatura. Entre estes, destacam-se: Guimarães (2001, 2009) com solos e britas, desenvolvendo o modelo que vem sendo utilizado no MeDiNa; Malysz (2004) e Lima *et al.* (2017), que trabalharam com britas graduadas e focaram no efeito da

granulometria; Ribeiro (2013) e Lima *et al.* (2019), que focaram na influência da umidade; entre outros que abordam outros materiais e outros fatores influenciadores.

Já os simuladores de tráfego vêm sendo usados desde a década de 1990 e, para pesquisa, destacam-se o da UFRGS, incluído em um trabalho em rede em andamento envolvendo também a COPPE/UFRJ, o CENPES e o IME, visando melhorar o entendimento do mecanismo de acúmulo da DP em materiais granulares e solos quando aplicados na estrutura pavimento. Vale ainda ressaltar que há inúmeras pistas sendo monitoradas pelo Brasil, por diferentes instituições como COPPE/UFRJ, UFC, UFG, UFRGS, UFSC, UFSM, USP, entre outras, com o objetivo de aprimorar modelos de DP.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi discutido o defeito de deformação permanente e apresentada uma revisão dos ensaios existentes e implantados no Brasil. Pesquisadores brasileiros têm trabalhado conjuntamente, em rede, na elaboração e no aprimoramento do método mecânico-empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis, o MeDiNa, para substituir o método vigente, que tem embasamento empírico, e considera a capacidade estrutural plástica dos materiais de maneira não otimizada, a partir do parâmetro CBR, só fornecendo coeficientes por tipo de mistura ou agregado das camadas subjacentes ao revestimento. Apesar de ter sido lançado recentemente, em 2018, o MeDiNa ainda não é exigido pelo DNIT e continua o hábito de considerar apenas o CBR para o dimensionamento, sendo que, como mostrado neste trabalho, o defeito do afundamento de trilha de roda precisa claramente de ensaios de carregamento cíclico que possam caracterizar mecanicamente o surgimento destas deformações permanentes. Dos ensaios mostrados, para misturas asfálticas, têm sido realizados com mais frequência os do tipo EUCR, e para as camadas de materiais não cimentados (granulares e solos), o triaxial de cargas repetidas com estágio único. Espera-se que a adoção destes ensaios mecânicos permita a caracterização de maneira mais representativa do comportamento dos materiais quanto à resistência ao acúmulo de DP e resulte em previsões mais acuradas do desempenho dos materiais em campo e, conseqüentemente, no dimensionamento mais otimizado dos pavimentos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do CENPES/PETROBRAS. As autoras 1 e 2 agradecem as bolsas fornecidas pela CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adorjányi, K. e Füleki, P. (2013) Correlation between permanent deformation-related performance parameters of asphalt concrete mixes and binders. *Central European Journal of Engineering*, v. 3, n. 3, p. 534 - 540.
- ABNT (2016) NBR 16505: *Misturas Asfálticas – Resistência à Deformação Permanente Utilizando o Ensaio Uniaxial de Carga Repetida*. Rio de Janeiro, 2016.
- Barros, L. M. (2017) *Deformação Permanente de Misturas Asfálticas: Avaliação do Desempenho Conforme Critério de Flow Number De Misturas Quentes e Mornas*. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 179 p.
- Bastos, J. B. S.; Borges, R. L.; Soares, J. B. e Klinsky, L. M. G. (2015) Avaliação em Laboratório e em Campo da Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos do Ceará e de São Paulo. *Revista Transportes*, v. 23, n. 2, p.44-55.
- Bastos, J. B. S.; Silva, S. A. T; S. A.; Soares, J. B.; Nascimento, L. A. H. e Kim, Y. R. (2016) Triaxial stress sweep test protocol considerations for permanent deformation characterisation of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. v. 19, n. 2, p 431 - 444.
- Bastos, J. B. S.; Soares, J. B. e Nascimento, L. A. H. (2017) Critérios para os Resultados do Ensaio Uniaxial de Carga Repetida de Misturas Asfálticas em Laboratório a Partir do Desempenho em Campo. *Revista Transportes*, v. 25, n. 2.
- Borges, R. L. (2014) *Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do shift model viscoplástico e ensaios*

- triaxiais de carga repetida*. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Choi, Y. (2013) *Development of a Mechanistic Prediction Model and Test Protocol for the Permanent Deformation of Asphalt Concrete*. Tese de Doutorado. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Cooley, L. A. J.; Kandhal, P. S.; Buchanan, M. S.; Fee, F.; e Epps, A. (2000) *Loaded Wheel Testers in the United States: State of the Practice*. National Center for Asphalt Technology. REPORT 00-04. Auburn, AL.
- DNIT (2018) *DNIT 179/2018-IE Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasil.
- Elnasri, M. M. H. (2015) *From Binder to Mixture: Experimental Programme on Permanent Deformation Behaviour*. Tese de Doutorado. University of Nottingham, Reino Unido.
- Faccin, C. (2018) *Concretos Asfálticos em Utilização no Rio Grande do Sul: Comportamento Mecânico e Desempenho em Campo Quanto à Deformação Permanente*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Fritzen, M. A. (2005) *Avaliação de soluções de reforço de pavimento asfáltico com simulador de tráfego na rodovia Rio Teresópolis*. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, RJ.
- Fritzen, M. A.; Franco, F. A. C. P.; Motta, L.M.G.; e Ubaldo, M. O. (2019) Atualização da Função de Transferência do Dano de Fadiga para a Área Trincada do Programa MeDiNa - Método de Dimensionamento Nacional Brasileiro. *9º Congresso Rodoviário Português (CRP)*, Lisboa, v. 1.
- Guimarães, A. C. R. (2001) *Estudo de Deformação Permanente em Solos e Teoria do Shakedown Aplicada a Pavimentos Flexíveis*. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- Kim, D. Modulus and permanent deformation characterization of asphalt mixtures and pavements. Dissertation (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, NC, 2015.
- Kim, D. e Kim, Y. R. (2017) Development of Stress Sweep Rutting (SSR) Test for Permanent Deformation Characterization of Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 373-383.
- Kutay, E. M.; Jamrah, A. e Bayraktaroglu, H. (2017) Analysis of Flow Number Test Data on Asphalt Mixtures from Michigan for Use in Pavement ME. *96th Annual Meeting TRB Committee*. Washington, D. C. United States.
- Lekarp, F., Isacsson, U., e Dawson, A. (2000) State of the Art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, v. 126, n. 1, p. 76-83.
- Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G. e Guimarães, A. C. R. (2017) Estudo da Deformação Permanente de Britas Granito-Gnaiss para Uso em Base e Sub-Base de Pavimentos. *Transportes*, v. 25, n. 2, p. 41-52.
- Lima, C. D. A.; Motta L. M. G. e Aragão F. T. S. (2019) Effects of Compaction Moisture Content on Permanent Deformation of Soils Subjected to Repeated Triaxial Load Tests. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2673, n. 2, p. 466-476
- Malysz, R. (2004) *Comportamento Mecânico de Britas Empregadas em Pavimentação*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, RS, Brasil.
- Mirzahosseini, M.; Najjar, Y. M.; Alavi, A. H. e Gandomi, A. H. (2015) Next-Generation Models for Evaluation of the Flow Number of Asphalt Mixtures. *International Journal of Geomechanics*, v. 15, n.6.
- Moura, E. (2010) *Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Nascimento, L. A. H. do. (2008) *Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente*. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- Partl, M. N.; Bahia, H. U.; Canestrari, F.; La Roche, C. De.; Di Benedetto, H.; Piber, H. e Sybilski, D. (2013) *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials*. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB. RILEM.
- Ribeiro, M. M. P. (2013) *Contribuição ao Estudo da Deformação Permanente dos Solos de Subleito*. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil.
- Sá, M. F. P. (1996) *Estudo da Deformação Permanente de Misturas Betuminosas Através de Ensaios Estáticos e Dinâmicos*. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- Sousa, J. B.; Craus, J. e Monismith, C. L. (1991) *Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete*. SHRP-A/IR-91-104. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D. C.
- Subramanian, V. A. A. (2011) *Viscoplastic Model with Rate-Dependent Hardening for Asphalt Concrete in Compression*. Tese de Doutorado. Civil Engineering. Raleigh, North Carolina.
- Ubaldo, M. O.; Motta, L.M.G.; Fritzen, M. A.; Franco, F. A. C. P. (2018) Comparação entre Avaliação de Campo e o Método de Dimensionamento Nacional em Relação à Deformação Permanente. *Revista Estradas*, v. 23, p. 29-37.
- Werkmeister, S.; Ralf, N.; Dawson, A. R. e Wellner F. (2002) Deformation Behavior of Granular Materials Under Repeated Dynamic Load. *Journal of Environmental Geomechanics - Monte Verità*. p. 215-223.