

Dosagem de misturas asfálticas relacionada com o desempenho: uma revisão da literatura

Asphalt mixture design related to performance: a literature review

Marcos Lamha Rocha¹, Francisco Thiago Sacramento Aragão¹, Luís Alberto Hermann do Nascimento²

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

²Petrobras, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Contato: marcoslr94@gmail.com,  (MLR); fthiago@coc.ufrrj.br,  (FTSA); luisnascimento@petrobras.com.br (LAHN)

Recebido:

28 de março de 2023

Revisado:

8 de julho de 2024

Aceito para publicação:

9 de julho de 2024

Publicado:

27 de setembro de 2024

Editor de Área

Jorge Barbosa Soares, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Palavras-chave:

Dosagem.

Mistura asfáltica.

Dosagem balanceada.

Desempenho.

Keywords:

Design.

Asphalt mixture.

Balanced mix design.

Performance.

DOI: 10.58922/transportes.v32i3.2905



RESUMO

Desde as primeiras aplicações de misturas asfálticas como materiais constituintes de camadas de pavimentos, no final do século XIX, surgiu a necessidade da adoção de uma metodologia para definir as proporções adequadas de cada componente da mistura, em um processo conhecido como dosagem. Atualmente, as metodologias de dosagem são, em geral, baseadas unicamente em parâmetros volumétricos, o que não permite avaliar o desempenho do material. Este artigo apresenta uma revisão das tendências passadas, presentes e futuras no projeto de misturas asfálticas, considerando diferentes métodos desenvolvidos na busca pela geração de misturas mais resistentes às demandas cada vez maiores do tráfego. São avaliados aspectos relacionados às metodologias atuais de dosagem e suas limitações, o conceito e trabalhos atuais sobre mistura balanceada, assim como um resumo dos principais ensaios de desempenho de misturas asfálticas. Os resultados da revisão indicam uma clara evolução para procedimentos de dosagem que combinam volumetria e desempenho, promovendo a seleção mais adequada de materiais e suas combinações, além de otimizar a vida útil das misturas asfálticas no campo. No entanto, a pesquisa destaca lacunas significativas, como a necessidade de estudos experimentais que validem novos métodos de dosagem e a integração de ensaios de desempenho mais avançados. Essas lacunas representam oportunidades importantes para futuras pesquisas experimentais que podem contribuir para a inovação e a eficiência no projeto de misturas asfálticas.

ABSTRACT

Since the first applications of asphalt mixtures as constituent materials for pavement layers in the late 19th century, there has been a need to adopt a methodology to define the appropriate proportions of each component in the mixture, in a process known as mix design. Currently, design methodologies are generally based solely on volumetric parameters, which does not allow for the evaluation of material performance. This paper presents a review of past, present, and future trends in asphalt mixture design, considering different methods developed in the pursuit of generating mixtures that are more resistant to the ever-increasing demands of traffic. Aspects related to current design methodologies and their limitations, the concept and current work on balanced mixtures, as well as a summary of the main performance tests for asphalt mixtures are evaluated. The review results indicate a clear evolution towards design procedures that combine volumetrics and performance, promoting the most suitable selection of materials and their combinations, as well as optimizing the service life of asphalt mixtures in the field. However, the research highlights significant gaps, such as the need for experimental studies to validate new design methods and the integration of more advanced performance tests. These gaps represent important opportunities for future experimental research that can contribute to innovation and efficiency in asphalt mixture design.

1. INTRODUÇÃO

As misturas asfálticas são projetadas para serem usadas em pavimentos para resistir a cargas do tráfego sob diferentes condições climáticas, sendo a dosagem uma parte essencial da construção

e da reabilitação de pavimentos asfálticos. O principal objetivo da dosagem de misturas asfálticas é determinar uma proporção otimizada entre as quantidades de agregados e ligante asfáltico que resultará em propriedades desejáveis, tais como durabilidade, estabilidade, trabalhabilidade, impermeabilidade, flexibilidade, resistência ao trincamento, à deformação permanente (DP) e à derrapagem.

Metodologias de dosagem de misturas asfálticas convencionais (Superpave, Marshall e Hveem, por exemplo) são usadas para determinar a quantidade ótima de ligante asfáltico por meio de medidas empíricas de laboratório. Os procedimentos de dosagem Marshall e Hveem usam medidas de cálculo volumétrico e de estabilidade, enquanto que a dosagem Superpave requer uma avaliação de critérios volumétricos e de densificação da mistura (Zhou, Hu e Scullion, 2006).

A metodologia Superpave foi implementada para resolver as inadequações dos procedimentos Marshall e Hveem. O objetivo original era desenvolver uma dosagem baseada no desempenho. Embora os ensaios de desempenho para misturas asfálticas fizessem parte do processo de projeto da mistura Superpave e vários procedimentos tenham sido desenvolvidos para estimar e avaliar o desempenho da mistura, todo o processo acabou se tornando muito complexo e caro e nunca foi implementado por departamentos de transporte estaduais norte-americanos (*Departments of Transportation, DOT*, em inglês).

O procedimento atual de dosagem de misturas asfálticas Superpave envolve a seleção das proporções dos agregados e do ligante asfáltico com base nas propriedades empíricas dos agregados e em propriedades volumétricas. No entanto, a maioria das agências e empreiteiras não acreditam que este método pode garantir que as misturas dosadas terão desempenho a longo prazo satisfatório no pavimento (West et al., 2018).

Além disso, existem hoje vários novos tipos de misturas asfálticas, com utilização de aditivos, polímeros, borracha triturada, ligantes de alta qualidade, misturas recicladas, etc. Entretanto, tais métodos volumétricos de dosagem não permitem distinguir os benefícios provenientes do uso dessas novas tecnologias no desempenho de misturas asfálticas.

Por estas razões, observa-se a necessidade da incorporação de ensaios de desempenho aos métodos atuais de dosagem de misturas asfálticas para validar ou revisar o teor de projeto de ligante determinado pelo método volumétrico atual.

Um fator importante para uma dosagem bem-sucedida da mistura é o equilíbrio entre a composição volumétrica e a resistência do material aos danos. Assim, ensaios de laboratório adotados na caracterização do material a danos como a fadiga e a deformação permanente são necessários para complementar as metodologias atuais de dosagem (Pellinen, 2004).

Deste modo, o objetivo deste artigo é revisar as tendências passadas, presentes e futuras no projeto de misturas asfálticas, com foco na evolução dos métodos de dosagem que buscam equilibrar volumetria e desempenho. Além disso, o artigo propõe um caminho a seguir para a integração de novas metodologias de projeto brasileiras com as estratégias de dosagem de misturas asfálticas, visando a melhoria contínua na seleção e combinação de materiais para otimização da vida útil das misturas asfálticas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Metodologias de dosagem de misturas asfálticas

As primeiras metodologias de dosagem de misturas asfálticas foram baseadas principalmente em análises empíricas para a seleção da quantidade de ligante a ser adotado. As indústrias e

agências confiaram fortemente na experiência anterior para avaliar e determinar o tipo de mistura apropriado para seções selecionadas em diferentes locais com temperaturas variáveis. Uma boa mistura seria identificada com base no desempenho da estrutura do pavimento existente, mas a mecânica do material não foi levada em consideração diretamente (Roberts, Mohammad e Wang, 2002; Hajj, Sebaaly e Weitzel, 2005).

O uso de concreto asfáltico (*Asphalt Concrete, AC*, em inglês) aumentou significativamente ao longo dos anos, e a necessidade de ensaios padronizados passou a ser essencial para o processo de dosagem. Na década de 1920, o método mais popular de dosagem de misturas asfálticas era o Hubbard-Field (Figura 1a). Mais tarde, este influenciou os métodos Marshall e Hveem, dos anos 1940 até os anos 1960 (Alshamsi, 2006).

Em 1938, Bruce Marshall desenvolveu o método Marshall para dosagem de mistura asfáltica. A filosofia de projeto da mistura Marshall envolve a seleção de uma granulometria de agregado e de um nível de compactação. O agregado é misturado com porcentagens variáveis de ligante asfáltico e depois compactado usando um soquete de impacto. Os volumes de vazios (V_v) das amostras compactadas são, então, determinados e comparados com os valores de especificação. Além disso, é determinada a estabilidade Marshall e a fluência (Figura 1b) para avaliação do desempenho à deformação permanente e à fadiga. Um projeto é selecionado quando a granulometria está dentro de uma faixa especificada e a volumetria atende aos critérios (Asphalt Institute, 1997; Siddiqui, Trethewey e Anderson, 1988; Kandhal e Koehler, 1985; White, 1985).

Também, na década de 1930, Francis Hveem, do Departamento de Estradas da Califórnia, desenvolveu um método de dosagem de mistura que contabilizava a absorção do asfalto e empregava um ensaio triaxial que media a resistência e o deslocamento volumétrico. O objetivo de todo o processo é determinar o teor ótimo de asfalto, considerado dependente da área de superfície e da absorção de agregados. Além disso, este método assume que a estabilidade da mistura é uma função do atrito entre partículas de agregados e da coesão da mistura. A estabilidade é medida usando um estabilizômetro Hveem (Figura 1c), que aplica uma carga crescente à amostra de asfalto compactado em uma taxa pré-determinada (Vallerga e Lovering, 1985).

Em 1987, o Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária (*Strategic Highway Research Program, SHRP*, em inglês) começou a desenvolver, nos Estados Unidos, o *Superior Performing Asphalt Pavements, Superpave*, que incluiu um sistema de classificação de ligantes baseado no seu desempenho sistema, a definição de ensaios para a caracterização de agregados e um projeto de misturas, cuja fabricação de amostras se dá por amassamento em um molde que gira (Figura 1d). Em 2008, a maioria dos estados americanos tinha adotado este método de projeto (Prowell e Brown, 2007).

Quando o programa SHRP foi concluído, em 1992, o novo sistema Superpave de projeto de misturas asfálticas teria três níveis com base no tráfego previsto para o pavimento. O nível I seria adotado para pavimentos de baixo tráfego e os requisitos de projeto da mistura seriam baseados principalmente nas propriedades volumétricas tradicionais. O nível II seria usado para a maioria das rodovias por onde passavam níveis moderados de tráfego e incluiria requisitos volumétricos mais um conjunto limitado de ensaios de desempenho. O nível III seria para pavimentos de alto tráfego e também começaria com um projeto de mistura com base volumétrica seguido por um conjunto expandido de ensaios de desempenho avançados. Entretanto, os ensaios de desempenho nunca foram implementados, exceto para alguns projetos especiais, principalmente porque não foram considerados práticos para uso rotineiro para os milhares de projetos produzidos a cada ano, com exceção do ensaio de dano por umidade induzida (Clyne et al., 2001; West et al., 2018)

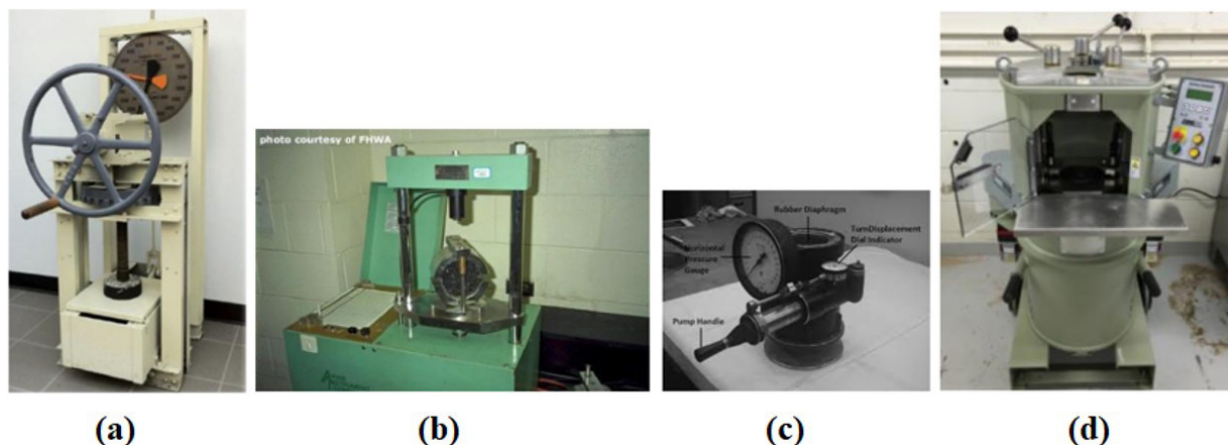


Figura 1. Exemplos de equipamentos para dosagem de mistura asfáltica: (a) Hubbard-Field; (b) Marshall; (c) Hveem; (d) Superpave (Bennert, 2021).

Uma comparação entre as diferentes metodologias de dosagem indica que embora o método Hveem seja interessante para a simulação da compactação de campo, só foi adotado na parte ocidental dos EUA e geralmente não é recomendado para uso fora dessa região, uma vez que a calibração dos resultados foi feita com base em poucas pistas experimentais. Além disso, o dispositivo de compactação por amassamento é caro e não portátil e, portanto, não é amplamente implementado (Huang, Polaczyk e Hu, 2020).

Alternativamente, o método Marshall utiliza um procedimento de projeto mais barato e um dispositivo simples de compactação. Ambos os métodos, Hveem e Marshall, focam nos vazios, na resistência e na durabilidade da mistura.

Atualmente, o método Superpave é o mais utilizado em projeto e análise de misturas asfálticas a quente. Em termos de métodos de compactação, a principal diferença entre o Superpave e os métodos Marshall e Hveem é a capacidade do Compactador Giratório Superpave (CGS) de monitorar a mudança de altura durante o processo de compactação e o fato de a compactação por amassamento ocorrer em amostras que são rotacionadas. O uso do compactador giratório reduziu o VMA e a quantidade de ligante em comparação com o sistema Marshall (Park, Chowdhury e Button, 2001).

Os três métodos de dosagem explicados anteriormente são os mais adotados no mundo. No entanto, cada agência de transporte customizou a implementação do projeto de mistura para atender às suas necessidades específicas. Por exemplo, a maioria dos países europeus usa o método de dosagem de misturas asfálticas Marshall, especificado na norma EN-13108-1 (EN, 2016). No entanto, várias agências complementaram seu projeto de mistura com ensaios de desempenho para quantificar a suscetibilidade da mistura asfáltica a danos por umidade e por deformação permanente.

A França se desviou do projeto típico de misturas asfálticas europeu. Primeiro, começou a usar o compactador giratório em vez do compactador Marshall e introduziu o ensaio de Duriez (EN 12697-12) para analisar o dano por umidade (EN, 2018). Em segundo lugar, adotou um projeto de mistura asfáltica baseado em sua localização no pavimento e no volume de tráfego projetado. Os projetos de mistura asfáltica foram divididos em níveis que variam do Nível 0 ao Nível 4, dependendo do volume de tráfego. Ensaios de desempenho foram adicionados a cada nível: o Nível 0 não requer ensaios de desempenho, mas somente o monitoramento da granulometria dos agregados e do teor de ligante; o Nível 1 deve satisfazer os requisitos do Nível 0, além das propriedades volumétricas e especificações de dano por umidade; o Nível 2 deve atender aos requisitos do Nível 1, além de exigir a realização de um ensaio de trilha de roda; o Nível 3 deve atender aos requisitos do Nível

2, além das especificações de rigidez; e o Nível 4 deve atender aos requisitos do Nível 3 e avaliar características de fadiga a partir do ensaio de flexão em dois pontos em amostras trapezoidais (Delorme, De la Roche e Wendling, 2007).

Por outro lado, na Austrália, a implementação dos procedimentos de dosagem de misturas asfálticas é baseada na compactação giratória, bem como em uma série de ensaios relacionados ao desempenho. A principal diferença entre o procedimento desenvolvido na Austrália e o Superpave é a adoção de equipamentos desenvolvidos localmente, mais acessíveis. Os ensaios mecânicos utilizados para a determinação das propriedades relacionadas ao desempenho e empíricas incluem fadiga por tração indireta, deformação permanente, resistência à tração e à flexão, estabilidade e fluidez (procedimento Marshall (Grobler, Rebbechi e Denneman, 2018)).

2.1.1. Limitações das dosagens volumétricas

Na metodologia Superpave, a dosagem depende principalmente de propriedades volumétricas. Em essência, a diferença entre duas propriedades volumétricas, volume de vazios e VMA, estabelece o volume mínimo de ligante efetivo (*Effective Asphalt Binder Content, Vbe*, em inglês) para a mistura. Entretanto, o cálculo do VMA é altamente dependente de uma determinação precisa da massa específica total do agregado (*Bulk Specific Gravity, Gsb*, em inglês). Às vezes, há variabilidade associada às determinações da massa específica da mistura de agregados, o que impacta na determinação da quantidade de asfalto no projeto e esta quantidade de ligante na mistura impacta significativamente o desempenho do pavimento asfáltico. As misturas com ligante em excesso são suscetíveis à deformação permanente, enquanto aquelas com baixo teor de ligante são propensas aos trincamentos por fadiga.

Além da quantidade, a qualidade do ligante asfáltico adotado na composição das misturas também é fundamental. Neste sentido, é importante avaliar as características do material considerando condições específicas a que será submetido no campo. Como exemplo, a classificação por desempenho de ligantes (*Performance Grade, PG*, em inglês) adotada pelo Superpave, avalia o material nos estados virgem e envelhecido a curto e a longo prazos, já que as respostas do ligante ao carregamento imposto pelo tráfego variam de acordo com o seu nível de envelhecimento.

Em muitos casos, ligantes modificados com polímeros são necessários para atender às exigências do projeto da mistura. Nas últimas décadas, outros aditivos também têm sido usados, incluindo o ácido polifosfórico e os resíduos de óleo de motor refinado. Ressalta-se que o ganho em desempenho advindo da adição destes produtos não é identificado por um projeto puramente volumétrico das misturas.

Também se destaca o uso crescente de material fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement, RAP*, em inglês) e de telhas asfálticas recicladas (*Reclaimed Asphalt Shingles, RAS*, em inglês), que requer avaliações adicionais como a interação entre o ligante reciclado e o virgem, e a previsão de como esses materiais combinados afetam o desempenho da mistura. Além disso, há o uso de aditivos de misturas asfálticas mornas (*Warm Mixture Asphalt, WMA*, em inglês), polímeros e fibras. As misturas asfálticas contendo esses produtos provavelmente terão propriedades mecânicas e reológicas diferentes, que não podem ser avaliadas somente no projeto volumétrico. Portanto, ensaios de desempenho precisam ser incluídos como parte do procedimento de projeto da mistura para ajudar a garantir o desempenho desejável do pavimento no campo.

No início da implementação do projeto da mistura Superpave, foi dado um foco maior à melhoria da resistência à DP. Para isso, misturas para pavimentos de tráfego moderado e alto foram projetadas

utilizando agregados mais angulares, além de adotarem ligantes com PG apropriados e maiores energias de compactação. Muitos DOTs acrescentaram requisitos de ensaios de DP aos projetos de mistura.

À medida que os primeiros projetos construídos considerando a metodologia Superpave foram aplicados no campo, a maioria dos DOTs observou que os problemas com deformação permanente foram mitigados. Por outro lado, muitos observaram que o trincamento se tornou o principal tipo de dano. Há uma variedade de possíveis fatores que contribuem para que as misturas apresentem altos níveis de trincamento, incluindo práticas construtivas e problemas de dosagem. Assim, a maioria dos DOTs ajustou seus requisitos de dosagem de mistura em relação aos padrões Superpave, em uma tentativa de melhorar a durabilidade de suas misturas. Porém, pequenos ajustes no projeto Superpave não foram suficientes para resolver alguns dos problemas observados em campo, o que levou à busca por uma nova abordagem para o projeto da mistura asfáltica.

West et al. (2018) elaboraram e enviaram um formulário para 47 DOTs de estados americanos para identificar as práticas correntes no processo de dosagem de misturas asfálticas. Os DOTs foram solicitados a fornecer uma lista de mudanças nas especificações das dosagens das misturas que estavam sendo implementadas em seus respectivos estados. Diversas agências rodoviárias norte-americanas começaram a explorar ou a adotar modificações com o objetivo de refinar o procedimento de projeto da mistura para melhorar o seu desempenho, especialmente com relação à resistência ao trincamento por fadiga. A maioria dessas modificações visa aumentar o teor de ligante durante o projeto da mistura. As principais modificações propostas foram o uso de materiais reciclados (RAP e RAS), a diminuição do Nprojeto, a diminuição do volume de vazios e o aumento do VMA mínimo.

No Brasil, onde são utilizadas bases granulares, o principal problema dos pavimentos de concreto asfáltico é o trincamento por fadiga, conforme comenta Nascimento (2015). A adoção do método Superpave pode resultar em misturas mais secas, agravando o problema de trincamento por fadiga (Almeida Jr. et al., 2018).

2.2. Dosagem de misturas balanceadas (BMD)

O conceito de projeto de mistura balanceada para garantir a sua estabilidade e durabilidade já foi considerado nos projetos de mistura Marshall e Hveem, como ilustrado na Figura 2. Como destaca a figura, a quantidade ideal de asfalto não é meramente uma função do volume de vazios para um determinado nível de compactação, mas essencialmente uma otimização do teor de projeto para atingir o desempenho desejado quanto à DP e à fadiga. Do ponto de vista da construção, também são necessárias considerações quanto à trabalhabilidade para atingir a densidade desejada na pista (Cooper III et al., 2014).

A filosofia de projeto de mistura de Hveem considerava um teor suficiente de asfalto para permitir a absorção por parte dos agregados e fornecer uma espessura mínima de película asfáltica na superfície de todos os agregados. As misturas deveriam fornecer uma resistência mínima ao cisalhamento (medida pelo estabilômetro Hveem) e uma resistência mínima à tração para resistir à fissuração (medida pelo coesímetro). A estabilidade e a coesão são influenciadas pelas propriedades dos agregados e pela quantidade de ligante asfáltico. Com relação à durabilidade, Hveem desenvolveu os ensaios de dilatação e de sensibilidade à umidade para medir a reação da mistura à água.

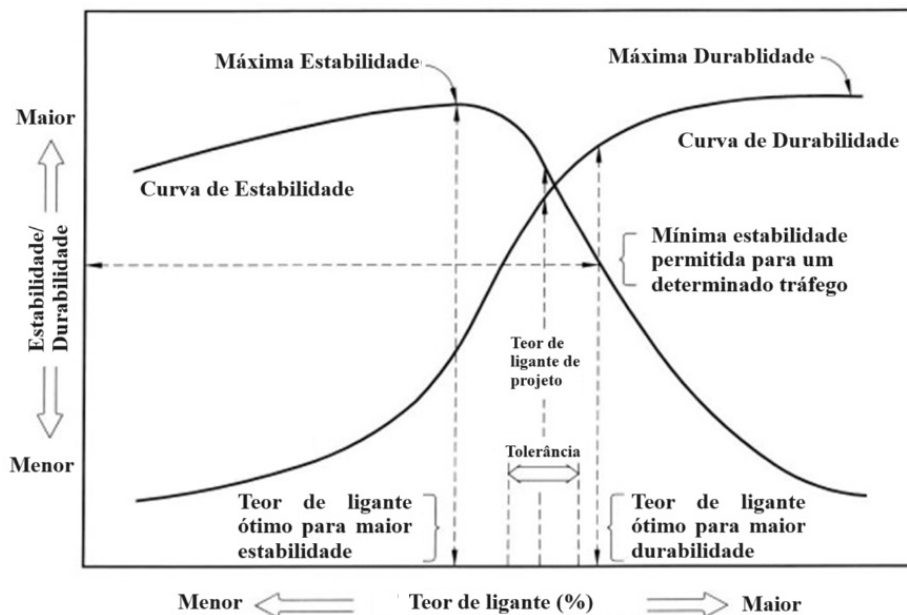


Figura 2. Relação estabilidade-durabilidade da mistura asfáltica para a seleção do teor de projeto (FAA, 2013).

A intenção original do projeto de mistura Superpave era incorporar ensaios de desempenho para verificar a resistência à DP e à fadiga de misturas asfálticas. Entretanto, devido à complexidade dos procedimentos e dos dispositivos de ensaio que foram recomendados, a avaliação por estes ensaios foi considerada impraticável e não foi implementada em nível nacional nos EUA.

O conceito de projeto de mistura balanceada foi inicialmente desenvolvido por pesquisadores do Texas Transportation Institute/Texas A&M University (TTI/TAMU), que adotaram o ensaio Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT) para avaliar a resistência à deformação permanente e o ensaio Overlay Test (OT) para avaliar a resistência à fissuração (Zhou, Hu e Scullion, 2006). Esta abordagem utilizava ensaios de desempenho para determinar o teor de projeto e a classe de ligante que fornecia resistência adequada à mistura quanto à deformação permanente e à fissuração associada à carga. Em uma avaliação recente das seções de campo utilizando a abordagem de projeto de mistura balanceada, os pesquisadores do TTI concluíram que é necessário variar os critérios de desempenho dependendo do clima no local do projeto (Zhou et al., 2014).

Em setembro de 2015, o grupo de trabalho de especialistas (*Expert Task Group*, ETG, em inglês) em misturas e construção do *Federal Highway Administration* (FHWA) formou uma força-tarefa para o desenvolvimento de um projeto de mistura balanceada (*Balanced Mix Design*, BMD, em inglês), cujo objetivo foi estabelecer um projeto de mistura asfáltica utilizando ensaios de desempenho em amostras adequadamente condicionadas, considerando múltiplos modos de danos, o envelhecimento da mistura, o tráfego, o clima e a localização dentro da estrutura do pavimento. Em resumo, o BMD incorpora dois ou mais ensaios de desempenho, como um de fadiga e um de deformação permanente, por exemplo, para avaliar quão bem a mistura resiste aos danos mais comuns. Em alguns trabalhos, é possível encontrar o termo *performance-engineered mixture design* (PEMD) como sinônimo do BMD (Elias, 2020).

O ETG identificou quatro potenciais abordagens para o uso do BMD, como descrito a seguir. Os fluxogramas de cada abordagem podem ser encontrados na Figura 3.

- a) Dosagem volumétrica com verificação do desempenho: esta abordagem começa com o atual método de projeto Superpave para determinar o teor de ligante asfáltico (*Optimum Binder*

Content, OBC, em inglês). A mistura é, então, submetida a ensaios de desempenho selecionados para avaliar sua resistência à deformação permanente, à fadiga e ao dano por umidade. Se o projeto da mistura atender aos critérios de desempenho, o traço (*Job Mix Formula*, JMF, em inglês) é estabelecido e a produção é iniciada. Caso contrário, todo o processo de projeto da mistura é repetido usando diferentes materiais (agregados e/ou ligante asfáltico) ou novas proporções de mistura até que todos os critérios de desempenho sejam satisfeitos. Esta é a abordagem mais adotada atualmente pelas agências rodoviárias norte americanas;

- b) Dosagem volumétrica com otimização do desempenho: similar à anterior, esta abordagem começa pela escolha do teor de projeto de acordo com a metodologia Superpave, e depois são realizados ensaios de desempenho no teor de projeto OBC e em mais alguns teores de ligante até atingir o desempenho exigido;
- c) Dosagem volumétrica modificada pelo desempenho: a dosagem Superpave é usada para estabelecer uma estrutura preliminar de agregados e a quantidade de ligante para esta composição (*Percent Binder Content*, PBC, em inglês). Os ensaios de desempenho são, então, usados para ajustar as propriedades ou proporções preliminares da proporção de ligante ou da mistura, a fim de atender aos critérios de desempenho. Nesta abordagem, o projeto final da mistura asfáltica é focado principalmente no cumprimento dos critérios de desempenho e pode não ter que cumprir todos os critérios volumétricos;
- d) Dosagem focada somente no desempenho: os componentes e as suas proporções na mistura asfáltica são estabelecidos e ajustados com base na análise de desempenho, sem exigências de propriedades volumétricas. Podem ser estabelecidos requisitos mínimos para propriedades do ligante e dos agregados. Uma vez que as propriedades da mistura asfáltica medidas usando ensaios de desempenho em laboratório satisfaçam aos critérios, a volumetria da mistura asfáltica pode ser somente verificada para uso na produção.

Uma implementação bem-sucedida de um processo BMD envolve a realização de ensaios de desempenho em laboratório com critérios bem estabelecidos. Também envolve o desenvolvimento e a validação de correlações entre os resultados dos ensaios e o desempenho do pavimento no campo. Os critérios de desempenho devem ser estabelecidos para materiais disponíveis (locais) com base nas características do projeto, incluindo a aplicação da mistura asfáltica, o clima e o nível de tráfego no local do pavimento. Também deve ser considerada a localização da mistura asfáltica dentro da estrutura do pavimento, a sua condição de envelhecimento e o tipo de amostra da mistura asfáltica (misturada em laboratório e compactada em laboratório, misturada em campo e compactada em laboratório, ou misturada, compactada e extraída em campo).

Para maximizar a eficácia da BMD, é fundamental integrá-la com as especificações relacionadas ao desempenho (*performance-related specifications*, PRS, em inglês). As PRS utilizam características de qualidade para prever propriedades fundamentais das misturas, permitindo que sejam projetadas não apenas para atender aos requisitos volumétricos, mas também para garantir um desempenho superior em condições reais de serviço. Esta integração cria um sistema robusto que cobre desde o projeto da mistura até a aceitação em campo. Utilizando ensaios de desempenho para verificar, por exemplo, a resistência a trincas e à deformação permanente, as PRS asseguram que as misturas atendam aos critérios volumétricos e sejam capazes de suportar as condições de tráfego e climáticas esperadas. Além disso, a combinação de BMD e PRS permite ajustes rápidos e eficazes durante a produção, garantindo que a mistura final atenda aos requisitos de desempenho estabelecidos, promovendo uma maior durabilidade e um melhor desempenho dos pavimentos (Wang, Liu e Liu, 2023).

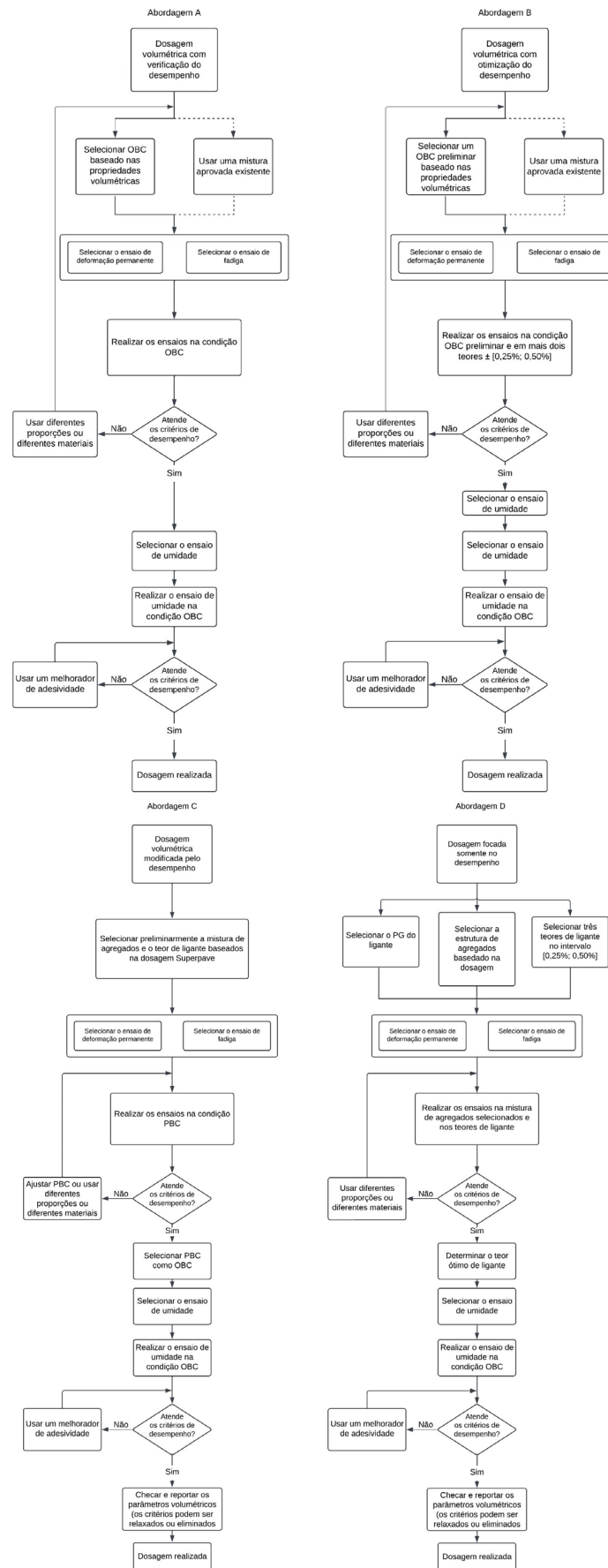


Figura 3. Fluxograma das abordagens A, B, C e D de BMD [adaptado de: Newcomb e Zhou, 2018].

2.2.1. Ensaios de desempenho

Os ensaios de desempenho são a base para o processo BMD. Dependendo do procedimento e da sua configuração, um ensaio pode resultar em um índice, em um parâmetro mecanicista, em um modelo de desempenho desenvolvido em laboratório ou em uma combinação destes.

Os parâmetros, tais como índices provenientes do ensaio HWTT para deformação permanente e do OT para fadiga, precisam ser correlacionados com os danos do pavimento em campo e são geralmente adotados por agências como critérios de aceitação. Por outro lado, propriedades fundamentais como o *creep compliance* ou a curva característica de dano de ensaio cíclico de fadiga podem ser combinados com modelos mecanicistas a fim de avaliar a resistência da mistura asfáltica aos danos individuais. Além disso, índices obtidos a partir de resultados de ensaios de desempenho e seus respectivos limites podem ser utilizados como parâmetros na dosagem balanceada.

Já os modelos de desempenho de laboratório são desenvolvidos com base em resultados de ensaios de desempenho e medições, tais como a relação de deformação plástica incluída no projeto e método de análise do programa AASHTOWare™ Pavement ME. Eles são tipicamente calibrados com dados de campo e usados para prever os danos em uma estrutura de pavimento sob determinadas condições de tráfego e clima. A Tabela 1 resume os principais ensaios de desempenho utilizados para analisar misturas asfálticas à fadiga e à DP.

Elias (2020) recomenda cinco passos para a seleção dos ensaios de desempenho adequados para uso na metodologia BMD:

- 1) Determinar os mecanismos de falha mais críticos a serem considerados;
- 2) Definir ensaios de desempenho adequados, que possam avaliar adequadamente os danos identificado na Etapa 1;
- 3) Avaliar a aplicabilidade geral dos ensaios de desempenho da Etapa 2;
- 4) Analisar se o ensaio de desempenho selecionado está pronto para ser totalmente implementado, com base nos nove passos essenciais recomendados pelo Projeto NCHRP20-07/Task 406;
- 5) Avaliar o impacto da implementação dos ensaios de desempenho para a agência e para o empreiteiro, considerando o risco associado ao BMD durante a aprovação do projeto de mistura.

Nota-se que a dosagem de misturas balanceadas objetiva a determinação do teor de projeto de ligante com base nos resultados de ensaios de desempenho, que são, em sua maioria, de fadiga e de deformação permanente. Para tal “balanço”, utilizam-se muitas vezes índices ou parâmetros provenientes destes ensaios, assim como limites máximos e mínimos para a faixa ideal e a obtenção do teor de projeto. Assim, devido à vasta quantidade de ensaios de desempenho, cada agência ou empreiteira adota os parâmetros de acordo com os ensaios correntes utilizados. Por exemplo, agências que adotam o ensaio SCB para fadiga utilizam, em geral, o parâmetro energia de fratura (Louisiana, Dakota do Sul e Wisconsin), enquanto o parâmetro Sapp é calculado para o ensaio de fadiga por tração direta (Carolina do Norte) e a vida de fadiga final é identificada a partir de resultados do ensaio OT (Flórida, Texas e Nova Jersey) ou de flexão a quatro pontos (Califórnia, Iowa, Ohio, Utah e Nova Jersey). Já para a deformação permanente, em geral, considera-se o valor da deformação plástica final e, neste caso, as agências estipulam um valor máximo permitido (Califórnia, Louisiana, Dakota do Sul e Wisconsin, Florida, Texas, Nova Jersey, Oklahoma, Geórgia, Iowa, Ohio, Utah, Nova Jersey, Illinois, Alabana, Carolina do Sul e Carolina do Norte).

Tabela 1: Resumo dos principais ensaios utilizados para caracterização de misturas asfálticas.

Ensaio	Análise	Dimensões do CP	Resultado	Ensaio	Análise	Dimensões do CP	Resultado
Asphalt Pavement Analyzer (APA)	Resistencia à deformação permanente	D - 150 mm H - 75 mm	Deformação permanente final após 8.000 ciclos	Semi-circular Bending (SCB)	Resistência ao trincamento	D - 150 mm H - 75 mm E - 50 mm	Energia de fratura, deslocamento crítico
Hamburg Wheel-Tracking Test (HWTT)	Resistência à deformação permanente e sensibilidade à umidade	D - 150 mm H - 62 mm	Profundidade da deformação plástica e número de ciclos da máxima deformação	Disk-shaped Compact Tension Test (DCT)	Resistência ao trincamento	D - 150 mm H - 142,5 mm E - 50 mm	Energia de fratura, carregamento máximo, deslocamento crítico
Superpave Shear Test (STT)	Resistencia à deformação permanente	D - 150 mm H - 50 mm	Deformação permanente final, módulo dinâmico cisalhante	Compressão Diametral (IDT)	Resistência ao trincamento	D - 150 mm H - 50 mm	Deformação específica x número de ciclos
French Rutting Tester (FRT)	Resistencia à deformação permanente	L - 180 mm C - 50 mm H- 20-100 mm	Deformação permanente final após 30.000 ciclos	Tensão Direta (TD)	Resistência ao trincamento	D - 100 mm H - 130 mm	Caracterização viscoelástica, modelo S-VECD, curva C-S, envoltória de ruptura (Gr),
Ensaio Uniaxial de Carga Repetida	Resistência à deformação permanente	D - 100 mm H - 150 mm	<i>Flow Number</i> (FN)	Flexão a Quatro Pontos	Resistência ao trincamento	B - 380 mm H - 50 mm E - 63mm	Tensão de tração e deformação de tração versus número de ciclos
Stress Sweep Rting (SSR)	Resistência à deformação permanente	D - 100 mm H - 150 mm	Parâmetros do <i>shift model</i>	Texas Overlay (TO)	Resistência ao trincamento por reflexão	D - 150 mm H - 76 mm E - 38 mm	Índice de resistência ao trincamento
IDEAL-Rutting Test	Resistência à deformação permanente	D - 150 mm H - 62 mm	Resistência ao cisalhamento	IDEAL-Cracking Test	Resistência ao trincamento	D - 150 mm H - 62 mm	<i>Cracking Tolerance Index</i>

Fonte: Salehiashani (2021), Zhou, Steger e Mogawer (2021), Hajj et al. (2019).

2.3. Trabalhos recentes

Walubita, Hoeffner e Scullion (2013) introduziram recomendações para as metodologias de dosagem aplicadas pela agência do estado do Texas, assim como especificações para um novo método de dosagem. O método foi baseado nos ensaios de OT e HWTT. Bennert, Hass e Wass (2017) avaliaram uma metodologia de projeto de mistura balanceada para determinar sua aplicabilidade às misturas asfálticas de Nova Jersey. A abordagem utilizou os ensaios APA e OT para avaliar a resistência da mistura à deformação permanente e à fadiga. Foi observada uma tendência consistente de aumento da resistência à fadiga, mas redução da resistência à deformação permanente, com o aumento do teor de asfalto. Foram feitas recomendações para a abordagem balanceada da mistura

para identificar o teor de projeto como o ponto médio da faixa de teor de ligante onde tanto a deformação permanente quanto os requisitos de fadiga foram satisfeitos.

O Departamento de Transportes de Minnesota (MnDOT) desenvolveu recentemente uma estrutura de dosagem BMD. Com base nos resultados e critérios de ensaios de desempenho, a quantidade de ligante selecionada é definida como o ligante balanceado (*Balanced Asphalt Content*, BAC, em inglês) com as tolerâncias de construção permitidas. O estudo verificou que a abordagem BMD permitiu determinar a influência do teor de ligante na durabilidade e na estabilidade de quatro misturas avaliadas. A pesquisa sugeriu a redefinição dos critérios de desempenho à fadiga e à deformação permanente para diversas aplicações, considerando diferentes cargas de tráfego, projeto de misturas, propriedades do solo e condições climáticas. Também recomendou que o MnDOT introduzisse ensaios de trincamento no controle de qualidade e de aceitação da agência enquanto monitora as seções de campo para validar a correlação entre os critérios de BMD e o desempenho de campo (Newcomb e Zhou, 2018). Em um estudo posterior, Al-Khayat et al. (2021) aplicaram a metodologia B em misturas do estado com uso de três ensaios de fadiga e um de DP, e observaram que o teor de ligante era diferente de quando eram utilizados apenas parâmetros volumétricos.

Zhou et al. (2022) aplicaram a metodologia de BMD para misturas em aeroporto utilizando ensaios que avaliam o pavimento em altas temperaturas. Zhang, Sias e Dave (2022) desenvolveram modelos de previsão de módulo dinâmico e ângulo de fase que podem ser incorporados em um projeto de BMD. Veeraragavan et al. (2022), com dados de mais de 40 misturas de Maine, criaram um planejamento de BMD para o estado baseado nos ensaios de IDEAL-CT, fadiga por tração direta, SSR e HWTT. Zhou et al. (2021) desenvolveram um delineamento da aplicação de BMD com base em ensaios mais rápidos e baratos (IDEAL-CT e RT) e com boas correlações com outros ensaios e com o campo.

Rath et al. (2021) aplicaram uma analogia do PG de ligantes em misturas asfálticas (mix PG) baseado em ensaios de fadiga e deformação permanente. Os autores viram que apenas o PG do ligante não é capaz de prever o comportamento da mistura asfáltica, uma vez que esse não leva em conta o comportamento do agregado. Diante dos resultados de oito misturas, viu-se que a temperatura alta (que reflete mais a deformação permanente) foi aumentada e que a temperatura baixa (que reflete mais a fadiga) piorou, quando se comparou o PG das misturas com os respectivos ligantes.

Yin et al. (2023) avaliaram o uso da técnica de dosagem balanceada para misturas mornas (WMAs). Duas modificações foram testadas: adição de ligante asfáltico e uso de WMA com aditivo surfactante. Os resultados indicaram melhorias na resistência ao trincamento e no desempenho à DP. Tong et al. (2023) analisaram a deformação permanente em misturas asfálticas com alta quantidade de RAP, usando BMD e ensaios acelerados. Observou-se que misturas BMD exibiram maior DP devido ao alto teor de ligante. Análises de correlação entre ensaios de laboratório e de desempenho de pavimentos indicaram uma forte relação. O estudo ainda sugere reduzir o limite de deflexão permanente de 8 mm para 7 mm no BMD para melhorar o desempenho.

Mogawer et al. (2023) desenvolveram um protocolo abrangente de BMD para agências estaduais de rodovias, utilizando uma das quatro abordagens da AASHTO PP 105 (2020). O protocolo visa manter o equilíbrio da mistura até a fase da produção, incluindo um novo critério de aprovação/reprovação para trincamento à fadiga e recomendações para estudos futuros. Elnaml et al. (2023) avaliaram o uso de catalisador ácido para melhorar a resistência ao trincamento de misturas asfálticas com alto conteúdo RAP, visando atender aos critérios de dosagem BMD da Louisiana e reduzir o carbono incorporado na mistura. Majidifard et al. (2023) aprimoraram misturas asfálticas

densas com RAP em Missouri usando a abordagem BMD, que inclui ensaios para controlar as principais falhas.

Por fim, o aprimoramento de técnicas de BMD pode ser feito com base em experiências de aplicação. Como exemplo, Hajj, Aschenbrener e Nener-Plante (2022) analisaram trabalhos que relatam casos de sucesso na implementação da metodologia BMD em diferentes estados americanos. Com o avanço no tema, uma norma provisória foi publicada em 2020 (AASHTO, 2020, p. 105-20) visando descrever os procedimentos e abordagens de BMD ao redor dos EUA.

Em uma outra linha de pesquisa, estudos recentes têm focado no desempenho final e na previsão de comportamento de pavimentos para desenvolver estratégias de dosagem de misturas asfálticas. Wang et al. (2021) propuseram um procedimento de dosagem balanceada fundamentado na relação entre parâmetros volumétricos (VMA e VFA) e desempenho do pavimento simulado (fadiga e DP), que denominaram PVR (*performance-volumetric relationship*, em inglês). Em estudos posteriores, Jeong, Underwood e Kim (2021, 2022) propuseram uma nova relação levando em consideração também índices (*index-volumetric relationship*, IVR, em inglês). Em um estudo similar, Rocha et al. (2023) desenvolveram uma estrutura de BMD utilizando a metodologia PVR e os limites estipulados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Seittlari et al. (2023) estabeleceram um passo a passo para o estabelecimento de limites para ensaios de desempenho para deformação permanente usando simulações no AASHTOWare Pavement ME.

Zhang et al. (2022) desenvolveram modelos que podem ser usados como ferramentas de pré-projeto de BMD para avaliar o desempenho de trincas e deformações permanentes das misturas. Estas ferramentas podem ser incorporadas em programas avançados de simulação para prever o desempenho das misturas no campo, considerando a estrutura do pavimento, o tráfego e as condições climáticas. Boz et al. (2023) propuseram valores limites de desempenho baseados em simulações do Pavement ME Design. O Departamento de Transporte da Califórnia tem implementado ensaios de desempenho em especificações de desempenho considerando resultados de simulação no California Mechanistic-Empirical Analysis and Design (CalME).

3. DISCUSSÕES

Para que o pavimento tenha um bom desempenho no campo, é necessário um equilíbrio entre as resistências à deformação permanente e à fadiga em resposta às cargas do tráfego e às condições ambientais. O controle das propriedades volumétricas da mistura asfáltica não é suficiente para garantir o bom desempenho do pavimento, visto que há interações entre as camadas e as relações de deformabilidade entre os materiais selecionados para cada camada precisam ser compatibilizadas. Assim, é necessário selecionar uma mistura asfáltica levando em conta sua rigidez, resistência à fadiga, à deformação permanente e à umidade para otimizar as espessuras no dimensionamento.

A necessidade de ensaios de desempenho em projetos de misturas asfálticas e a garantia de qualidade receberam mais atenção nos últimos anos com o uso crescente de materiais inovadores e reciclados, como fresado, misturas mornas, plásticos e polímeros diversos, resultando, em geral, em benefícios econômicos e ambientais oferecidos por estes materiais. O projeto tradicional de misturas com base volumétrica pode não proporcionar um desempenho ideal para misturas asfálticas, em particular para aquelas que incluem materiais como estes. Também não proporciona um processo de otimização de desempenho para aplicações específicas de projeto de misturas, considerando outros fatores além do tráfego e do clima. Os ensaios de desempenho devem ser realizados para definir os limites da quantidade aceitável de ligante asfáltico que resultam em

um desempenho final adequado, considerando especialmente durabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente.

Em diversos lugares, há um movimento para atualizar especificações e incluir exigências relacionadas ao desempenho no projeto e na aceitação da construção. Buscam-se ensaios adequados para caracterizar com mais precisão o desempenho esperado do pavimento no campo do que apenas a volumetria. Assim, muitos esforços recentes de pesquisa se voltam para o desenvolvimento e avanço dos ensaios de desempenho de misturas asfálticas implementáveis e confiáveis, que possam ser adotados para uso mais rotineiro, dependendo do porte do projeto e das características das rodovias. A disponibilidade de tais ensaios de desempenho em muitos laboratórios em todo o país também é importante para empreiteiras de pavimentação asfáltica envolvidas em métodos alternativos de entrega de projetos (projeto de manutenção ou parceria público-privada, por exemplo) e para a construção de rodovias. Nesses casos, as empreiteiras poderiam se beneficiar da capacidade de previsão de desempenho confiável realizando os ensaios mecânicos.

Nota-se que há na literatura e na prática diferentes metodologias adotadas para a dosagem balanceada de misturas e especificações relacionadas ao desempenho, que diferem nos detalhes dos ensaios e nos controles volumétricos e de desempenho. Percebe-se que as agências americanas se encontram em um processo de transição, começando a adotar ensaios de desempenho para especificações da mistura final. Diante disso, para agências ainda sem essa metodologia, como é o caso brasileiro, a implantação das novas exigências tem sido feita aos poucos. Como exemplo, para os trechos que estão sendo implantados com a denominação “Pro-MeDiNa”, já estão sendo realizados ensaios de desempenho, tanto das misturas asfálticas quanto dos materiais das outras camadas e do subleito. Como são ensaios que demandam tempo e recursos, mas também, e principalmente, interpretação, um período de transição é necessário para que a filosofia se torne em breve corrente tanto para as agências quanto para as empreiteiras.

Um segundo passo para a aplicação de misturas balanceadas e de especificações de desempenho é a escolha dos ensaios de desempenho que irão compor a metodologia. Percebe-se que os ensaios selecionados pelas agências norte-americanas são os correntes, não havendo um padrão único entre os adotados em todas as regiões. No Brasil, para implementação da metodologia, é recomendável um estudo, com a coleta de respostas a um questionário, por exemplo, para analisar os principais ensaios mecânicos atualmente utilizados no país, para que a aplicação do método seja o mais razoável possível. Como ideia inicial, percebe-se na literatura que os ensaios de tração indireta para fadiga e Flow Number para deformação permanente são os mais utilizados atualmente no país e podem ser bons candidatos a futuros ensaios na metodologia nacional de BMD. Ensaios como de tração direta para fadiga e TSS e SSR para DP já se mostraram mais adequados para a previsão do desempenho das misturas, mas ainda são realizados por poucos grupos de pesquisa de universidades brasileiras e menos ainda por empresas de pavimentação.

O programa Pro-MeDiNa, ao incorporar ensaios de desempenho, representa um avanço significativo no desenvolvimento de misturas asfálticas mais duráveis e resistentes. A integração dessa metodologia com estratégias de dosagem exige a definição clara dos parâmetros de desempenho que serão avaliados e a padronização dos ensaios a serem adotados. No futuro, o Pro-MeDiNa pode se relacionar com as estratégias de dosagem a partir da criação de um protocolo nacional que combine ensaios volumétricos tradicionais com novos ensaios de desempenho, oferecendo um modelo híbrido e mais robusto de dosagem. Para concretizar essa integração, este artigo propõe um caminho a seguir:

1. Desenvolvimento de Normas e Guias Técnicos: Elaborar normas e guias técnicos detalhados que orientem a aplicação do Pro-MeDiNa em conjunto com as metodologias de dosagem atuais;
2. Capacitação e Treinamento: Implementar programas de capacitação para engenheiros e técnicos, focados na aplicação dos novos ensaios de desempenho e na interpretação dos resultados obtidos;
3. Estudos de Validação: Realizar estudos de validação em diversas regiões do país, utilizando misturas locais e diferentes condições climáticas para ajustar e validar os parâmetros de dosagem balanceada. Neste ponto, a aplicação do MeDiNa com funções de calibração bem definidas por ser uma ferramenta estratégica;
4. Parcerias Público-Privadas: Estimular parcerias entre agências de transporte, universidades e o setor privado para fomentar a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias de pavimentação;
5. Monitoramento e Avaliação Contínua: Implementar um sistema de monitoramento e avaliação contínua das misturas asfálticas no campo, coletando dados de desempenho a longo prazo para retroalimentar e ajustar a metodologia.

Diante dessas observações, fica claro que o Brasil está em uma fase de transição para a adoção sistemática de ensaios de desempenho, tanto para as misturas asfálticas quanto para solos e britas, motivados pela implantação do método MeDiNa. Nesse momento de transição, nota-se que estão sendo feitas atualizações ou proposições de normas, como as de módulo dinâmico, ensaios de desempenho de ligante, mudança da densidade máxima teórica para a densidade máxima medida, além da revisão de especificações. Com a atualização do método de dimensionamento e com a realização dos ensaios de desempenho durante a construção, espera-se que os novos pavimentos sejam mais duráveis e resistentes ao longo da sua vida de serviço. Este artigo propõe um caminho para a integração de metodologias brasileiras com estratégias de dosagem que incorporem ensaios de desempenho, promovendo a seleção mais adequada de materiais e a otimização da vida útil das misturas asfálticas no campo.

4. CONCLUSÕES

Com a pesquisa visando o uso do BMD e especificações de desempenho crescendo a cada dia, a indústria deve procurar implementar esta abordagem em breve. Os empreiteiros precisam de opções para inovar e permanecer competitivos, o que é oferecido por abordagens baseadas no desempenho. Ao rever limitações volumétricas e permitir a inovação nas especificações de serviço, o pavimento pode ser projetado para durar mais, ser mais sustentável e até mesmo custar menos. A utilização de especificações voltadas ao desempenho permite que o projeto dos pavimentos gere estruturas com vida útil prolongada das estruturas.

A implementação de ensaios de desempenho adequados nos procedimentos de dosagem e nas atividades de garantia de qualidade pode ajudar a superar as limitações da dosagem volumétrica a partir da consideração da resistência do material a danos como os por trincamento e por deformação permanente. No entanto, desafios como a definição de limites de desempenho adequados, a variabilidade dos resultados dos ensaios e a necessidade de validação em diferentes condições ainda precisam ser abordados.

Parcerias e colaborações entre departamentos de transporte, indústria e academia são essenciais para uma implementação bem-sucedida do BMD. Isso envolve comunicação com a indústria e

transferência de conhecimento contínuas. A implementação incremental ao longo de vários anos também permite que os empreiteiros ganhem experiência e se familiarizem com o processo.

Por fim, a melhoria contínua e a atualização de procedimentos de ensaio e de análise são cruciais para garantir a precisão e a repetibilidade dos resultados dos ensaios de desempenho. Estabelecer um banco de dados abrangente com estes resultados ajudará a entender o desempenho das misturas asfálticas e a ajustar os critérios de desempenho. A realização de estudos interlaboratoriais também é desejável, pois aumenta a confiança nos ensaios de desempenho e permite a identificação de ajustes necessários. Com uma abordagem colaborativa e incremental, o BMD pode gerar pavimentos mais duráveis, sustentáveis e econômicos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do CENPES/PETROBRAS, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

REFERÊNCIAS

- AASHTO (2020) *PP 105 Standard Practice for Balanced Design of Asphalt Mixtures*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Al-Khayat, H.; D.E. Newcomb; F. Zhou et al. (2021) Evaluation of the minnesota asphalt mixtures based on balanced mix-design approach. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, v. 147, n. 3, p. 04021045. DOI: 10.1061/JPEODX.0000298.
- Almeida Jr., P.O.; F.D. Boeira; L.P. Specht et al. (2018) Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas. *Transportes*, v. 26, n. 2, p. 1-15. DOI: 10.14295/transportes.v26i2.1407.
- Alshamsi, K.S. (2006) *Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures*. Tese (doutorado). Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College. Baton Rouge, LA.
- Asphalt Institute (1997) *Mix Design Methods for Asphalt. Manual Series No. 2 (MS-02)*. Lexington, KY: Asphalt Institute.
- Bennert, T. (2021) *Performance Evaluation of Asphalt Mixtures Statewide*. New York: University Transportation Research Center, n. C-19-03.
- Bennert, T.; E. Hass e E. Wass (2017) *Round Robin Testing Program for the Overlay Tester. NJDOT B-10*. Piscataway, NJ: Rutgers Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT).
- Boz, I.; J. Habbouche; S.D. Diefenderfer et al. (2023) Evaluating the rutting potential of asphalt mixtures with simple and practical tests. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. No prelo. DOI: 10.1177/03611981231207089.
- Clyne, T.R.; M.P. Hanson; B.A. Chadbourn et al. (2001) *Superpave Level One Mix Design at the Local Government Level*. Minneapolis: University of Minnesota. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/11299/761>> (acesso em 28/03/2023).
- Cooper III, S.B.; L.N. Mohammad; S. Kabir et al. (2014) Balanced asphalt mixture design through specification modification: Louisiana's experience. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2447, n. 1, p. 92-100. DOI: 10.3141/2447-10.
- Delorme, J.L.; C. De la Roche e L. Wendling (2007) *LPC Bituminous Mixtures Design Guide*. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Elias, N. (2020) *Local Agency Balanced Mix Design with Superpave Volumetric Foundation*. Tese (doutorado). University of Nevada. Reno.
- Elnaml, I.; H. Dylla; J. Liu et al. (2023) Incorporating environmental impact analysis into Louisiana's balanced asphalt mixture design. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. No prelo. DOI: 10.1177/03611981231214231.
- EN 13108-1 (2016) *Bituminous Mixtures - Material Specifications - Part 1: Asphalt Concrete*. Brussels.
- EN 12697-12 (2018) *Bituminous Mixtures - Test Methods Determination of the Water Sensitivity of Bituminous Specimens*. Brussels.
- FAA (2013) *Hot Mix Asphalt Paving Handbook. Advisory Circular 150/5370-14B*. Washington, D.C.: FAA.
- Grobler, J.; J. Rebbechi e E. Denneman (2018) *National Performance-Based Asphalt Specification Framework*. Sydney: Austroads, n. AP-T331-18.
- Hajj, E.Y.; P.E. Sebaaly e D. Weitzel (2005) Fatigue characteristics of Superpave and Hveem mixtures. *Journal of Transportation Engineering*, v. 131, n. 4, p. 302-310. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:4(302).
- Hajj, E.Y.; A.J. Hand; R. Chkaiban et al. (2019) *Index-Based Tests for Performance Engineered Mixture Designs for Asphalt Pavements*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.

- Hajj, E.Y.; T. Aschenbrener e D. Nener-Plante (2022) Examples of successful practices with state implementation of balanced design of asphalt mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2676, n. 5, p. 44. DOI: 10.1177/03611981221084696.
- Huang, B.; P.A. Polaczyk e W. Hu (2020) *Asphalt Mixture Design and Performance Properties by Using a Gyrotory Compactor*. University of Tennessee, Knoxville; Department of Transportation. Federal Highway Administration, n. RES2016-02.
- Jeong, J.; B.S. Underwood e Y.R. Kim (2021) Rutting performance prediction using index volumetrics relationships with stress sweep rutting test and Hamburg wheel-track test. *Construction & Building Materials*, v. 295, p. 123664. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123664.
- Jeong, J.; B.S. Underwood e Y.R. Kim (2022) Cracking performance predictions using index-volumetrics relationships with direct tension cyclic fatigue test and Illinois Flexibility Index Test (I-FIT). *Construction & Building Materials*, v. 315, p. 125631. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125631.
- Kandhal, P.S. e W.S. Koehler (1985) Marshall mix design method: current practices. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* St Paul, MN: AAPT, v. 54.
- Majidifard, H.; P. Rath; B. Jahangiri et al. (2023) Application of balanced mix design strategies to Missouri dense-graded asphalt mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2677, n. 2, p. 910-923. DOI: 10.1177/03611981221110219.
- Mogawer, W.S.; A.J. Austerman; K.D. Stuart et al. (2023) Comprehensive balanced mixture design protocol: design phase through production quality assurance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. No prelo. DOI: 10.1177/03611981231186422.
- Nascimento, L.A.H. (2015) *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. Tese (doutorado). North Carolina State University. North Carolina, USA.
- Newcomb, D. e F. Zhou (2018) *Balanced Design of Asphalt Mixtures*. Minnesota: Department of Transportation, n. MN/RC 2018-22.
- Park, D.W.; A. Chowdhury e J.W. Button (2001) *Effects of Aggregate Gradation and Angularity on VMA and Rutting Resistance*. College Station, TX: Texas A&M University.
- Pellinen, T.K. (2004) Conceptual performance criteria for asphalt mixtures. *Electronic Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 73, p. 337-366.
- Prowell, B.D. e R. Brown (2007) *Superpave Mix Design: Verifying Gyration Levels in the Ndesign Table*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Rath, P.; L.U. Urrea Contreras; B. Jahangiri et al. (2021) Performance grade of asphalt mixtures based on mixture performance test thresholds. *Construction & Building Materials*, v. 302, p. 124357. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124357.
- Roberts, F.L.; L.N. Mohammad e L.B. Wang (2002) History of hot mix asphalt mixture design in the United States. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 14, n. 4, p. 279-293. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:4(279).
- Rocha, M.L.; F.T.S. Aragão; L.A.H.D. Nascimento et al. (2023) Balanced mixture design framework for asphalt mixtures based on index-and performance-volumetrics relationships. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2677, n. 10, p. 233-245. DOI: 10.1177/03611981231161063.
- Salehiashani, S. (2021) *Development of Performance-Related Specifications for Asphalt Mixtures in Ontario*. Dissertação (mestrado). University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada.
- Seitllari, A.; I. Boz; J. Habbouche et al. (2023) Using mechanistic-empirical based analysis to evaluate rutting performance thresholds for balanced mix design tests. *Construction & Building Materials*, v. 400, p. 132762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132762.
- Siddiqui, Z.; M.W. Trethewey e D.A. Anderson (1988) Variables affecting Marshall test results. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1171, p. 139-148.
- Tong, B.; J. Habbouche; G.W. Flintsch et al. (2023) Rutting performance evaluation of BMD surface mixtures with conventional and high RAP contents under full-scale accelerated testing. *Materials*, v. 16, n. 24, p. 7611. DOI: 10.3390/ma16247611.
- Vallerga, B.A. e W.R. Lovering (1985) Evolution of the Hveem stabilometer method of designing asphalt paving mixtures. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* St Paul, MN: AAPT, v. 54.
- Veeraragavan, R.K.; D. Nener-Plante; L. Myers et al. (2022) Balanced mix design benchmarking of field-produced asphalt mixtures in Maine, US. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2676, n. 5, p. 263-276. DOI: 10.1177/03611981211061552.
- Walubita, L.F.; J. Hoeffner e T. Scullion (2013) *New Generation Mix Designs: Laboratory-Field Testing and Modifications to Texas HMA Mix-Design Procedures*. San Antonio: Texas A&M Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station, and University of Texas, Report 0-6132-3.
- Wang, Y.D.; A. Ghanbari; B.S. Underwood et al. (2021) Development of preliminary transfer functions for performance predictions in FlexPAVE™. *Construction & Building Materials*, v. 266, p. 121182. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121182.
- Wang, Y.D.; J. Liu e J. Liu (2023) Integrating quality assurance in balance mix designs for durable asphalt mixtures: state-of-the-art literature review. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, v. 149, n. 1, p. 03122004. DOI: 10.1061/JPEODX.PVENG-957.
- West, R.C.; F. Rodezno; F. Leiva et al. (2018) *NCHRP Project 20-07/Task 406 Development of a Framework for Balanced Mix Design*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

- White, T.D. (1985) Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* St Paul, MN: AAPT, v. 54.
- Yin, F.; N. Moore; C. Chen et al. (2023) Case study on using warm mix asphalt at reduced production temperatures for balanced mix design. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. No prelo. DOI: 10.1177/03611981231214230.
- Zhang, R.; J.E. Sias e E.V. Dave (2022) Using mix design information for modelling of fundamental viscoelasticity of asphalt mixtures. *Construction & Building Materials*, v. 329, p. 127029. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127029.
- Zhou, F.; S. Hu e T. Scullion (2006) *Integrated Asphalt (Overlay) Mixture Design, Balancing Rutting and Cracking Requirements*. College Station: Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, n. FHWA/TX-06/0-5123-1.
- Zhou, F.; T. Scullion; L. Walubita et al. (2014) Implementation of a performance-based mix design system in Texas. *Application of Asphalt Mix Performance-Based Specifications*, v. 32, p. 32-50.
- Zhou, F.; R. Steger e W. Mogawer (2021) Development of a coherent framework for balanced mix design and production quality control and quality acceptance. *Construction & Building Materials*, v. 287, p. 123020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123020.
- Zhou, J.; Z. Dong; L. Cao et al. (2022) Design parameter and method for airport asphalt mixture based on high-temperature performance. *Construction & Building Materials*, v. 326, p. 126802. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126802.