

Submetido 31/12/2023. Aprovado 18/03/2025

Avaliação: revisão duplo-anônimo

Estudo para produção de amostras do tipo Argamassa Areia Asfalto¹

PRODUCTION STUDY TO SAND ASPHALT MORTAR (SAM) SAMPLES

ESTUDIO PARA LA PRODUCCIÓN DE MUESTRAS DE MORTERO ARENA ASFALTO

Leonardo Zanelati Alves

Universidade Federal de Goiás (UFG)

leozanelati@gmail.com

Giulia Lobo Furtado

Universidade Federal de Goiás (UFG)

giulialobof@gmail.com

Tallyta da Silva Curado

Instituto Federal de Goiás (IFG)

tallyta.curado@ifg.edu.br

Lilian Ribeiro de Rezende

Universidade Federal de Goiás (UFG)

lrezende@ufg.br

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar alterações no volume de vazios de corpos de prova cilíndricos inteiros e cortados de Argamassa Areia Asfalto (AAA), fabricados com teores de ligante de 6%, 8% e 10%. Para tanto, foram realizados ensaios laboratoriais para avaliar o procedimento de compactação e a tendência de variação de volume de vazios em função do teor de ligante utilizado e da altura definida para a amostra cilíndrica, que foi de 50 mm. Os ensaios realizados foram os de compactação das amostras e os de volumetria. O método Rice foi utilizado para a amostra não compactada e o ensaio com a balança hidrostática para a amostra já compactada. Foram realizados estudos estatísticos com corpos de prova com teores de ligante de 6%, 8% e 10% e percebeu-se, por meio desses testes e de gráficos do tipo *box plot*, que os de 10% apresentaram melhores resultados, ou seja, menores valores de volume de vazios, o que indica melhor compactação. Assim, espera-se contribuir para a metodologia de estudos de fadiga para ligantes asfálticos em que a amostra de AAA utilizada seja obtida de forma simples e econômica, possa ser ensaiada no reômetro de cisalhamento dinâmico e apresente resultados representativos e confiáveis.

Palavras-chave: pavimentos asfálticos; cimento asfáltico de petróleo; AAA; ensaios laboratoriais; testes estatísticos.

¹ Ao LABITECC, pela disponibilização da serra de corte e dos laboratórios; ao Grupo Disbral, pela disponibilização do ligante asfáltico; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela verba para compra de equipamentos; e ao Instituto Federal de Goiás (IFG), pela concessão da licença da professora Tallyta da Silva Curado para a realização de seu doutorado.

Abstract

This study aimed to evaluate changes in the air void volume of entire and cut cylindrical specimens of Sand Asphalt Mortar (SAM), produced with binder contents of 6%, 8%, and 10%. To this end, laboratory tests were conducted to evaluate the compaction procedure and the variation in air void volume as a function of the binder content used and the height of the cylindrical sample, which was 50 mm. The tests conducted were sample compaction and volumetric tests, utilizing the Rice method for the uncompacted sample and the hydrostatic balance test for the compacted sample. Statistical studies were carried out on specimens with binder contents of 6%, 8%, and 10%. Through these tests and box plot graphs, it was found that the 10% specimens showed better results, i.e., lower air void volume values, which indicate better compaction. Thus, it's expected to contribute to the methodology of fatigue studies for asphalt binders, where the SAM sample is obtained simply and economically, allowing for testing in a dynamic shear rheometer and yielding representative and reliable results.

Keywords: asphalt pavements; asphalt binder; SAM; laboratory tests; statistical tests.

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar la evolución del volumen de vacíos en probetas cilíndricas enteras y cortadas de Mortero de Arena Asfáltica (MAA), fabricadas con contenidos de ligante del 6%, 8% y 10%. Para ello, se realizaron ensayos de laboratorio para evaluar el procedimiento de compactación y la tendencia a la variación del volumen de vacíos en función del contenido de ligante utilizado y de la altura definida para la muestra cilíndrica, que fue de 50 mm. Las pruebas realizadas fueron la compactación de la muestra y pruebas volumétricas mediante el método Rice para la muestra no compactada y la prueba de equilibrio hidrostático para la muestra compactada. Se realizaron estudios estadísticos sobre probetas con contenidos de ligante del 6%, 8% y 10% y se observó, mediante esas pruebas y gráficos de caja, que las probetas del 10% mostraban mejores resultados, es decir, valores de volumen de vacíos más bajos, lo que indica una mejor compactación. Por lo tanto, esperamos contribuir a la metodología de los estudios de fatiga de los ligantes asfálticos en los que la muestra MAA utilizada se obtiene de una forma sencilla y económica que puede ensayarse en el reómetro de cizallamiento dinámico y presenta resultados representativos y fiables.

Palabras clave: pavimentos asfálticos; ligante asfáltico; MAA; ensayos de laboratorio; pruebas estadísticas.

Introdução

A pavimentação no Brasil ainda é alvo de inúmeras críticas da população, seja em razão da vida útil reduzida apresentada, seja pela falta de manutenção de estradas e vias urbanas. Parte das críticas está diretamente ligada à última camada do pavimento: o revestimento asfáltico. Este, por sua vez, garante o nível final de conforto e segurança na via para o usuário e deve ser muito bem dosado e projetado antes de executar sua função.

Isso acontece porque essa camada recebe cargas cíclicas, diferentemente da maioria dos materiais de engenharia, que devem suportar cargas monotônicas. Esses carregamentos se diferem ao ponto de o primeiro tipo produzir falha no material para valores de tensões menores do que os apresentados em ensaios estáticos, nos quais o esforço é aplicado apenas uma única vez e de forma permanente.

Dessa forma, as cargas cíclicas no revestimento asfáltico causam danos que aumentam na fase de carregamento e permanecem constantes na fase de descarregamento, diferentemente dos esforços monotônicos, que produzem trincas que crescem

continuamente. Assim, a fadiga de uma mistura asfáltica se dá por meio de trincas que não aparentam ser críticas por si só, pois o pavimento passou por um carregamento menor que o valor máximo de carregamento monotônico, mas que têm influência na vida útil do material (Bernucci *et al.*, 2022).

Assim, a composição do concreto asfáltico também está diretamente ligada à fadiga. Uma mistura asfáltica é composta, principalmente, de agregados e ligante asfáltico, sendo vários ensaios requeridos para que a análise do custo-benefício da pavimentação asfáltica seja a melhor possível. Dessa forma, faz-se importante o estudo do ligante asfáltico, pois esse derivado do petróleo tem especificidades que afetam o desempenho do pavimento. Uma característica relevante no comportamento da mistura asfáltica completa (MAC) está relacionada com a espessura do filme de ligante asfáltico que envolve os agregados e seu comportamento quanto à fadiga, sendo que parâmetros de fadiga podem ser avaliados em várias escalas.

Na escala intermediária da MAC, existem estudos que demonstram o potencial da realização de ensaios em misturas finas de geometria cilíndrica, como a Matriz de Agregados Finos (MAF) (Behbahani; Salehfard, 2021) e a Argamassa de Areia Asfalto (AAA) (Rezende *et al.*, 2021). As MAFs representam a fração fina da MAC composta por seus agregados finos, ligante e volume de vazios. Já as AAAs, ao padronizar a uniformidade do agregado fino, conseguem isolar o efeito do ligante asfáltico existente em uma mistura fina cilíndrica por meio da representação de uma espessura do filme de ligante mais realista em relação à condição encontrada em uma MAC.

Coutinho (2012) utilizou a parte fina da MAC para avaliar o dano por fadiga no pavimento e concluiu que a caracterização de MAFs pode vir a ser utilizada para a previsão do comportamento da MAC numa escala intermediária. Essa conclusão ocorreu porque as MAFs e as suas respectivas MACs apresentaram comportamentos semelhantes em relação à resistência à fadiga nas diferentes misturas estudadas pelo autor.

Já Kim, Little e Lytton (2003) e Kim, Little e Song (2003) utilizaram amostras compostas por areia e asfalto, que podem ser identificadas como AAA, para investigar tanto a fadiga quanto a recuperação nas misturas asfálticas, conseguindo identificar diferenças relativas aos ligantes asfálticos. Underwood (2011) ressaltou que essas diferenças são convergentes aos comportamentos aceitos pela engenharia para os ligantes estudados, o que contribuiu para a realização de outros estudos na escala de misturas finas.

Mais recentemente, Kommidi, Kim e Rezende (2020), Rezende *et al.* (2021), Vieira *et al.* (2021), Curado (2024), Miranda, Curado e Rezende (2024) e Souza *et al.* (2024) analisaram misturas finas, MAFs e AAAs, com o foco na comparação entre as espessuras do filme de ligante existentes nessas amostras com a de 1 mm a 2 mm utilizadas nos ensaios reológicos de placas paralelas normatizados para avaliação de ligantes (DNIT, 2020a). Os autores concluíram que a espessura real encontrada nas MAFs e nas AAAs foi algo em torno de 10 a 100 μm , ou seja, bem menor que a espessura de 1 mm geralmente utilizada. Esses resultados convergem para estudos teóricos como o de Radovskyi (2003), que indicam que a espessura real do filme de ligante existente nas MACs é menor que 100 μm . Tais resultados motivam a realização de estudos envolvendo ligantes em misturas asfálticas finas, em busca de encontrar uma espessura de filme asfáltico que melhor represente a existente no concreto asfáltico que será utilizado na estrutura do pavimento e que possa contribuir para a redução do custo e do tempo de preparação das amostras representativas para serem usadas em ensaios no reômetro de cisalhamento dinâmico ou *Dynamic Shear Rheometer* (DSR).

Para que os resultados sejam considerados confiáveis, é importante garantir a repetibilidade das condições dos corpos de prova (CPs) que devem ser ensaiados.

Assim, este trabalho visa estudar amostras com ligante asfáltico e areia fina padronizada, compondo a mistura denominada AAA ou *Sand Asphalt Mortar* (SAM), de modo a avaliar tanto as características volumétricas dos CPs como a espessura de filme de ligante para possibilitar que, em trabalhos posteriores, se estude parâmetros de fadiga dessas amostras.

Objetivos

Este trabalho visa contribuir para o estudo das amostras do tipo AAA em território brasileiro a serem utilizadas em ensaios reológicos para a determinação da fadiga de ligantes asfálticos. Assim, espera-se que os ensaios feitos com AAA sejam mais representativos da situação encontrada em campo após a aplicação da mistura asfáltica no pavimento. Dessa maneira, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar as alterações no volume de vazios de CPs inteiros e cortados de AAA, fabricados com teores de ligante de 6%, 8% e 10%.

Revisão bibliográfica

Matriz de Agregados Finos (MAF)

A Matriz de Agregados Finos (MAF), identificada também como uma Mistura Asfáltica de Agregados Finos, é um dos componentes responsáveis por parte dos danos que ocorrem na mistura asfáltica dos pavimentos flexíveis (Vieira *et al.*, 2021). A MAF é uma configuração que representa a escala intermediária entre o ligante asfáltico (menor escala) puro e o concreto asfáltico (maior escala), possuindo, portanto, em sua composição agregados finos, ligante asfáltico e uma parcela de ar (Vieira, 2020).

A MAF permite entender o comportamento da mistura asfáltica analisando apenas uma de suas escalas, o que reduz o tempo de ensaio e o volume de material utilizado na produção dos CPs. Além disso, a MAF possui estrutura mais homogênea que toda a porção de mistura asfáltica e tem influência na propagação do fenômeno de trincas (Grasson Filho, 2019). Dessa forma, a MAF serve como parâmetro para identificar a espessura do filme que cobre as partículas de agregados miúdos na prática, o que aproxima os resultados obtidos em laboratório da realidade em campo. Para tal determinação, parte-se do conhecimento de parâmetros volumétricos, como o volume de vazios da amostra, combinados ao teor de ligante, pois a espessura do filme não é medida diretamente por meio de ensaios, em razão de sua variação ao longo da mistura.

Além disso, o estudo da MAF impacta diretamente outras pesquisas que investigam os danos ao pavimento causados por umidade, na própria fadiga do pavimento ou na sua regeneração. Isso ocorre pois a MAF representa de forma uniforme o comportamento do material que está ao redor do agregado graúdo, o que reflete na boa representação do desempenho do pavimento (Vieira, 2020).

Entre os estudos mais recentes, pode-se citar o de Rodrigues (2018), que definiu um método para avaliar o dano por fadiga em MAF utilizando ensaios mecânicos tradicionais para se avaliar a fadiga e ensaios utilizando o DSR. Porém, o autor não conseguiu concluir se a metodologia de cálculo dos parâmetros de fadiga ou a metodologia de dosagem da MAF foi o fator responsável pelos resultados próximos entre seu trabalho e a metodologia mais tradicional.

Ng (2017) avaliou a influência dos ligantes asfálticos modificados e o nível de envelhecimento na vida de fadiga das MAFs, mástiques e ligantes asfálticos, concluindo que tais ligantes melhoram o comportamento das MAFs quanto ao trincamento por fadiga e, em contrapartida, o envelhecimento do ligante é capaz de comprometer o desempenho das MAFs quanto ao dano por fadiga.

Suresha e Ningappa (2018) indicaram vantagens do estudo de MAF como a simplicidade na preparação dos CPs e a facilidade de se avaliar as propriedades de fadiga e regeneração utilizando o DSR. No entanto, Behbahani e Salehfard (2021) apontaram dificuldade na padronização da produção dos CPs de MAF, tanto em relação à sua dosagem quanto na produção dos CPs, uma vez que cada pesquisador emprega seu próprio método de estudo.

Alguns fatores que contribuem para isso incluem os métodos utilizados para produzir os CPs, que possuem limitações para que haja uma reprodutibilidade entre as diferentes pesquisas, como a utilização de equipamentos específicos, podendo demandar um período muito longo para serem produzidos, e outros possuem uma grande interferência do operador (Grasson Filho; Faxina, 2020).

Argamassa Areia Asfalto (AAA)

A AAA é um tipo de mistura fina, constituída de um agregado fino específico. A fim de padronizar o tamanho das partículas e o tipo de agregado, o que tem como consequência a uniformização da espessura do filme ligante entre as partículas do agregado, utilizou-se para a produção de CPs de AAA (Figura 1a) a areia padrão de Ottawa (Figura 1b), cuja distribuição granulométrica e sua mineralogia são conhecidas e normatizadas pela ASTM C778 (ASTM, 2021) (Kommidi; Kim; Rezende, 2020). Ressalta-se que qualquer areia que atenda a essa especificação poderia, teoricamente, ser utilizada na confecção da AAA.

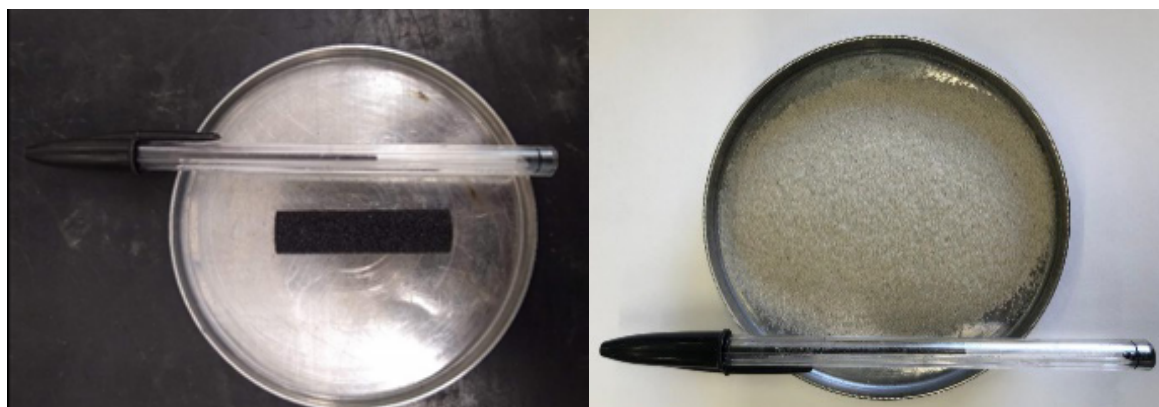


Figura 1 – (a) Corpo de Prova de AAA e (b) Areia de Ottawa

Fonte: Elaborado pelo(as) autores(as).

A MAF, em contrapartida, pode ter agregados finos de diferentes origens, com diferentes granulometrias. De acordo com Underwood e Kim (2013), alguns pesquisadores utilizaram agregados mais finos que 2,36 mm (Dai; You, 2007; Kim; Wagoner; Buttlar, 2008), 2,26 mm (Valenta; Sejnoha; Zeman, 2010) e 2,00 mm (Lackner *et al.* 2005) para a fabricação de CPs de MAF. Kim, Little e Lytton (2003) e Kim, Little e Song (2003) utilizaram como agregado a areia de Ottawa, cujas partículas são menores que 1,18 mm.

Assim, a vantagem de se fazer ensaios com CPs de AAA no lugar da MAF, submetidos à torção, é a possibilidade de replicá-los em qualquer laboratório utilizando-se o mesmo processo de compactação das amostras, mantendo uniforme a distribuição de partículas da mistura (Kommidi; Kim; Rezende, 2020).

Kommidi, Kim e Rezende (2020) e Rezende *et al.* (2021) apresentaram os estudos com AAA utilizando a areia de Ottawa como agregado fino com o objetivo de caracterizar o dano à fadiga nessas amostras. Consideraram que as amostras de AAA representam melhor a espessura do filme do ligante asfáltico existente numa MAC. Os autores concluíram que os ensaios feitos com CPs de AAA conseguem capturar microfissuras e macrofissuras de maneira mais eficaz que ensaios convencionais realizados para caracterização do ligante asfáltico, principalmente quando se considera o envelhecimento do ligante. A utilização de AAA também propicia o estudo de camadas mais finas de filme do que as de 1 a 2 mm, típicas dos ensaios reológicos em placas paralelas realizados para determinar a fadiga dos ligantes (Kommidi; Kim; Rezende, 2020; Rezende *et al.*, 2021).

Materiais e métodos

Neste item apresentam-se quais materiais foram utilizados, os seus ensaios de caracterização e como foram moldadas e avaliadas as amostras no Laboratório de Asfalto da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

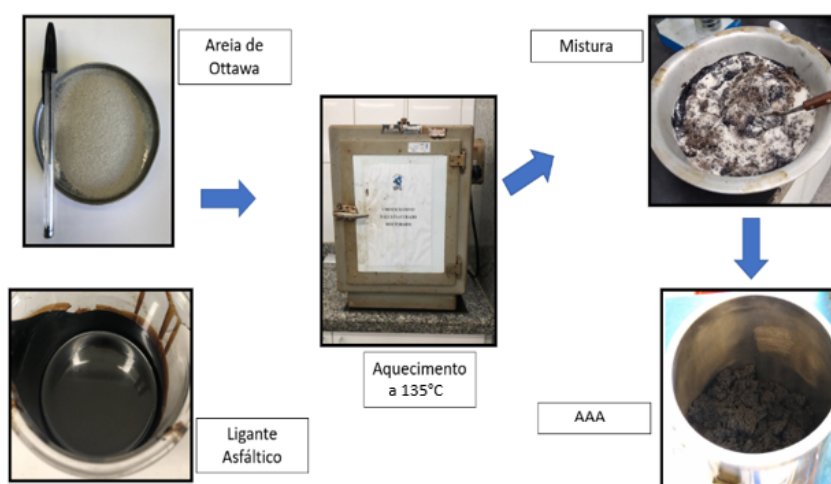
Materiais

Para a pesquisa, foram moldadas amostras de AAA constituídas pelo ligante virgem do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 e pela areia de Ottawa uniformemente graduada, especificada pelo fabricante segundo a ASTM C778 (ASTM, 2021). A areia foi a mesma utilizada por Kommidi, Kim e Rezende (2020), Rezende *et al.* (2021), Curado (2024) e Miranda, Curado e Rezende (2024).

Preparação das amostras

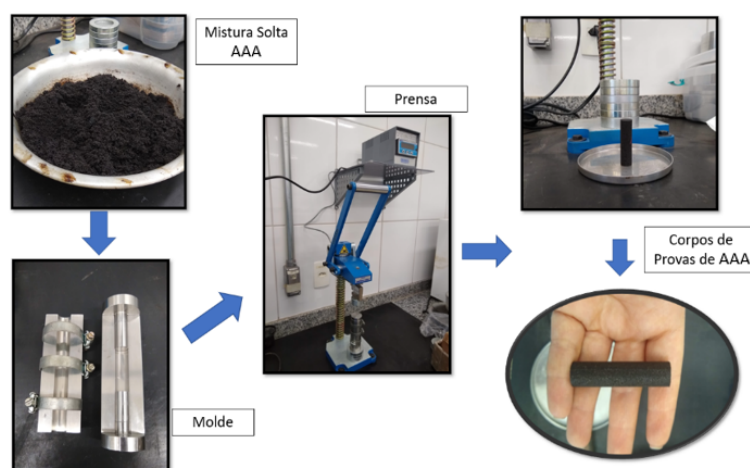
O molde existente no Laboratório de Asfalto da UFG permite a confecção da amostra de AAA de 12,5 mm de diâmetro e em três alturas úteis, sendo elas de 30 mm, 40 mm ou 50 mm. Nesta pesquisa, porém, moldou-se somente amostras de 50 mm, buscando consolidar o método utilizado por Kommidi, Kim e Rezende (2020) para compactação por meio de ensaios com um mesmo modelo CP. Realizou-se três misturas asfálticas de AAA com os teores de ligante asfálticos de 6%, 8% e 10%, em peso da mistura total, assim como realizado por Kommidi, Kim e Rezende (2020) para análise da influência da variação do teor de ligante nos resultados.

Para a moldagem dos CPs, baseou-se na metodologia indicada por Kommidi, Kim e Rezende (2020). Na primeira etapa de produção, a areia e o ligante foram aquecidos separadamente à temperatura de 135°C, sendo, em seguida, misturados até ser detectada a homogeneidade. Posteriormente, essa mistura foi colocada em pequenos recipientes, os quais foram tampados e guardados a uma temperatura de 5°C, evitando o seu envelhecimento possível de ocorrer em temperaturas mais elevadas. A Figura 2 mostra um esquema dessa preparação de AAA.


Figura 2 – Processo de Mistura de AAA

Fonte: Elaborado pelos(as) autores(as).

Na segunda etapa, foi realizada a compactação das amostras em molde metálico cilíndrico. Para isso, conforme a metodologia de Kommidi, Kim e Rezende (2020), esse molde e a mistura de AAA foram levados à estufa à temperatura de 135°C por 20 minutos, para, assim, serem compactadas. A compactação foi feita em 3 etapas pela prensa mostrada na Figura 3, que possibilita a aplicação da carga pré-determinada e a sua leitura. Em cada etapa, aplicou-se uma força por 15 segundos no topo e 15 segundos na base do molde. As forças aplicadas em cada uma das etapas são de 266,88 N, 355,84 N e 444,80 N, respectivamente. Por fim, o molde com a mistura foi colocado na geladeira para que esfriasse e, assim, pudessem ser retiradas as duas partes do molde para se obter o CP de AAA. Ressalta-se que os tempos de aplicação, assim como as forças, foram os mesmos utilizados por Kommidi, Kim e Rezende (2020).


Figura 3 – Processo de moldagem de AAA

Fonte: Elaborado pelos(as) autores(as).

Foram produzidos 4 CPs de cada mistura, totalizando 12 CPs, a fim de comprovar a repetibilidade dos resultados encontrados. Com o objetivo de analisar o processo de compactação de cada amostra, realizou-se a volumetria para confirmar se elas mantiveram o número de vazios ao serem compactadas com a mesma energia e a

mesma quantidade de material. Para isso, fez-se o ensaio com a balança hidrostática, seguindo a norma DNIT 428 (DNIT, 2020b).

Tal ensaio foi realizado para cada CP de AAA inteiro e, posteriormente, o CP foi cortado em três partes iguais para avaliação da variação do volume de vazios ao longo da altura do CP. Antes do corte, os CPs foram congelados para evitar o seu aquecimento e uma consequente alteração na viscosidade do ligante durante o processo. O procedimento foi realizado no Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil (LABITECC) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da UFG, por meio de uma serra de precisão de baixa rotação com disco diamantado (Figura 4).



Figura 4 – (a) Serra de corte, (b) CPs cortados, (c) Pesagem CP cortado

Fonte: Elaborado pelos(as) autores(as).

Segundo DNIT 428 (DNIT, 2020b), o volume de vazios (V_v) de misturas asfálticas é determinado pela Equação 1.

$$V_v = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \times 100 \quad (1)$$

Em que:

V_v = Volume de Vazios, expresso em porcentagem;

G_{mb} = Densidade Aparente do Corpo de Prova, adimensional;

G_{mm} = Densidade Máxima Teórica de Misturas Asfálticas Não Compactadas, adimensional.

Para se obter G_{mb} , o procedimento foi realizado de acordo com a norma ME-428 (DNIT, 2020b). Nesse caso, pesou-se o CP seco, imerso em água pela balança hidrostática e saturado. Para o cálculo efetivo da G_{mb} , seguiu-se o indicado no item 7.1 da referida norma.

A G_{mm} deve ser encontrada por meio do Rice Test, segundo a norma 427 (DNIT, 2020c). Nesse, o método de determinação das massas e dos volumes não é feito com a balança hidrostática, mas sim com um frasco metálico, uma balança e uma mesa vibratória utilizando a mistura não compactada.

Foram feitas duas análises com os resultados encontrados a partir dos ensaios com as amostras. A primeira foi a construção de gráficos *box plot*, que relacionam teor de ligante x densidade aparente; teor de ligante x massa específica; e teor de ligante x volume de vazios. Na segunda análise, foi realizado o teste paramétrico de significância entre médias de dados que seguem a distribuição normal, no qual a variável do teste é a T de Student. Essa variável é encontrada na tabela de distribuição T de Student através do grau de liberdade e do erro α , também chamado de nível de significância (Fonseca; Martins, 2010).

O teste estatístico foi aplicado tanto para os resultados obtidos dos CPs inteiros quanto para esses mesmos CPs em três partes aproximadamente iguais. O objetivo dessa análise foi verificar se há diferença significativa de volume de vazios no topo, no meio e na base de cada amostra, considerando $\alpha = 5\%$.

Ressalta-se que foi utilizado o referido teste em razão do pequeno espaço amostral (menos de 30 dados) e por não se ter conhecimento da média populacional correspondente à amostragem.

Apresentação e análise dos resultados

A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores de volumes de vazios dos corpos de prova inteiros (CP Inteiro) e de suas respectivas partes divididas (CP Cortado). Durante o processo de corte, um CP de cada mistura foi danificado, não sendo possível a produção das partes íntegras. Dessa forma, somente os dados dos 3 CPs referentes a cada teor de ligante, 9 CPs no total, que resultaram em 18 partes cortadas íntegras, foram utilizados para as análises dos dados.

Teor	CP	VV - CP Inteiro	VV - CP Cortado	Parte do CP
6%	1	27,43%	22,16%	Topo
			22,29%	Meio
			19,13%	Base
6%	2	27,68%	22,57%	Topo
			25,74%	Meio
			23,56%	Base
6%	3	27,58%	28,40%	Topo
			22,06%	Meio
			28,42%	Base
8%	1	24,70%	25,83%	Topo
			26,74%	Meio
			26,72%	Base
8%	2	23,91%	22,76%	Topo
			24,07%	Meio
			23,20%	Base
8%	3	23,53%	17,05%	Topo
			24,71%	Meio
			23,10%	Base
10%	1	19,43%	17,46%	Topo
			20,64%	Meio
			20,76%	Base
10%	2	20,44%	18,81%	Topo
			19,54%	Meio
			22,48%	Base
10%	3	20,41%	22,67%	Topo
			24,43%	Meio
			20,79%	Base

Tabela 1 – Volume de Vazios dos Corpos de Prova (CPs)

Fonte: Elaborado pelos(as) autores(as).

Gráficos Box Plot

Após a inserção dos dados em planilhas eletrônicas, construíram-se gráficos no formato *box plot* para a análise dos resultados encontrados. Os Gráficos 1, 2 e 3 relacionam, respectivamente, o teor de ligante asfáltico com a Densidade Relativa Aparente (Gmb), a Massa Específica Aparente (MEa) e o Volume de vazios (Vv) para os CPs inteiros e cortados.

No Gráfico 1 de Teor de ligante x Densidade Relativa Aparente (Gmb) dos CPs inteiros, nota-se o aumento de Gmb com o aumento do teor de ligante. As medianas dos dados foram de 1,748, 1,790 e 1,825 para os teores de 6%, 8% e 10% respectivamente. Além disso, foram identificados intervalos distintos na variação dos vazios em função do teor de ligante, pois os *box plots* dos diferentes teores não apresentaram sobreposição, indicando separação clara entre os grupos.

Ainda relacionado aos CPs inteiros, no Gráfico 2 de Teor de ligante x Massa Específica Aparente (MEa), observa-se também um aumento da MEa com o aumento do teor de ligante, com medianas de 1,742, 1,784 e 1,818 para os teores de 6%, 8% e 10%, respectivamente. Os resultados obtidos não revelaram valores discrepantes.

Em contrapartida, o Gráfico 3 de Teor de ligante x Vv apresenta um decréscimo no volume de vazios, conforme o aumento do teor de ligante. Para o teor de 6%, Vv foi de 27,63%, para 8% foi de 23,72% e para 10% foi de 20,13%. Pode-se notar, ainda, que um aumento de 2% no teor da mistura provoca uma redução de 3,85% no Vv dos CPs inteiros.

Por outro lado, nos gráficos relacionados aos CPs cortados, percebe-se maior variabilidade dos resultados, o que é notável pelas dimensões dos *box plots* comparando com os dos CPs inteiros. Para o teor de 8% de ligante, alguns dados ficaram fora do intervalo dos *box plots* e apresentaram valores discrepantes.

Por fim, os gráficos relacionados às seções dos CPs cortados não apresentaram um padrão de variação das medianas conforme o aumento do teor de ligante. Apesar disso, a dispersão dos resultados foi maior nas amostras de menores teores, diferentemente do observado nos gráficos dos CPs inteiros. Percebe-se, ainda, que um aumento de 2% no teor da mistura provoca uma redução de 1,49% no Vv.

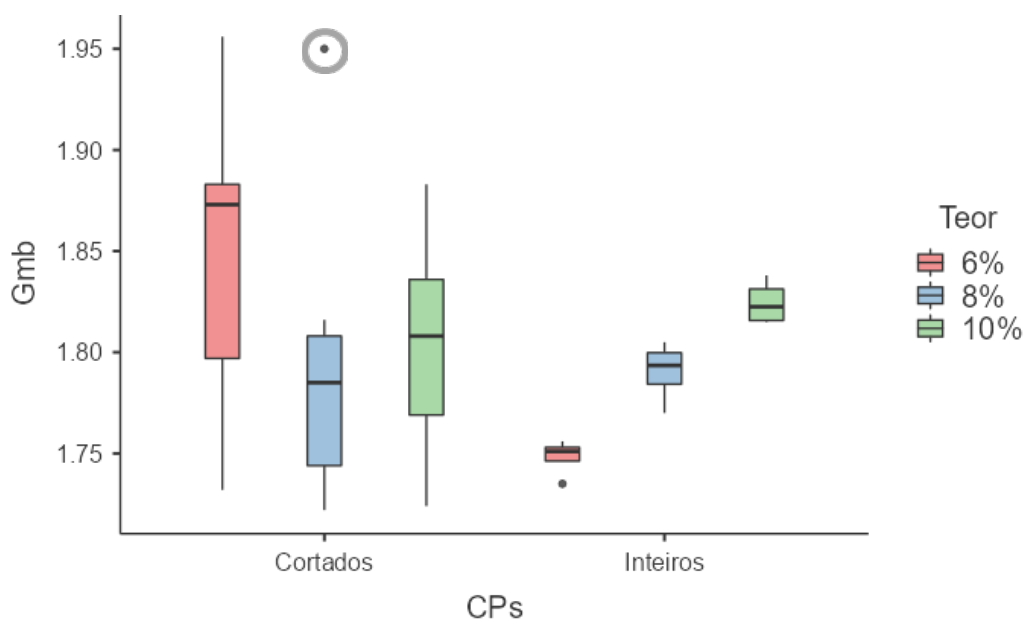


Gráfico 1 - Box Plot Teor de ligante x Gmb
 Fonte: Elaborado pelos(as) autores(as).

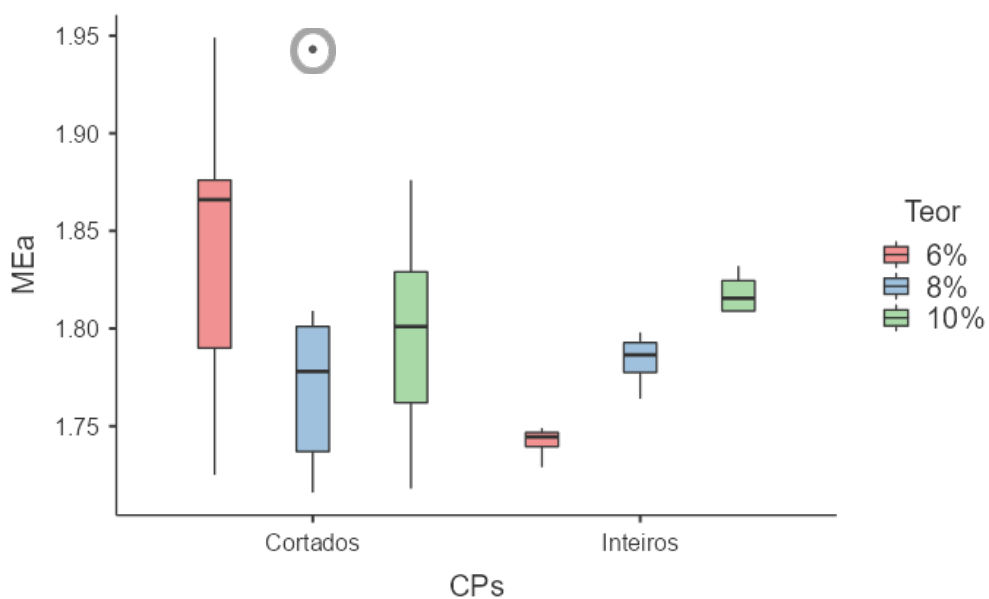


Gráfico 2 - Box Plot Teor de ligante x MEa
 Fonte: Elaborado pelos(as) autores(as).

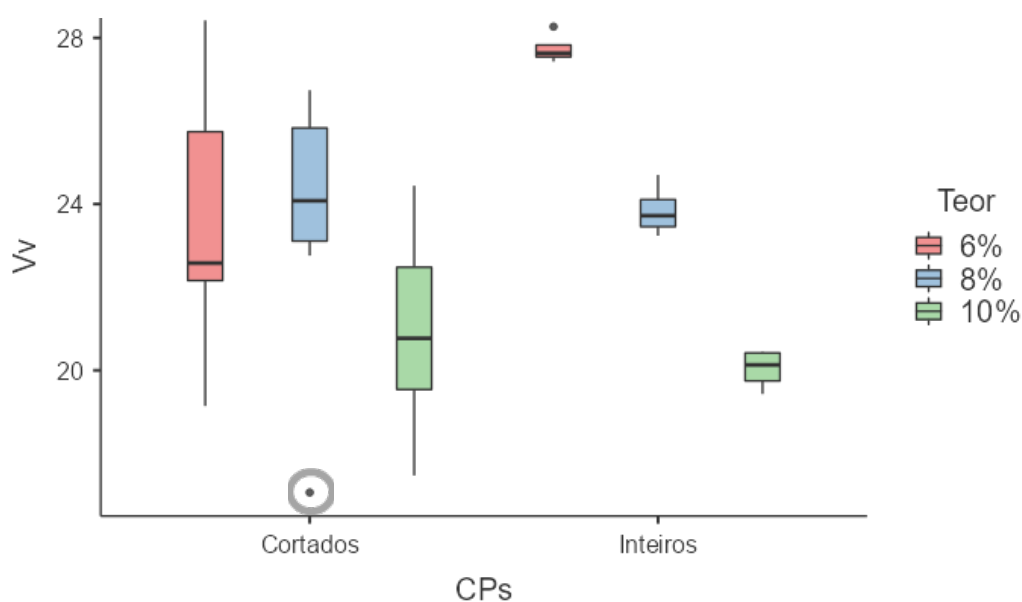


Gráfico 3 - Box Plot Teor de ligante x Vv

Fonte: Elaborado pelos(as) autores(as).

Análise Teste T De Student

Trabalhou-se com três hipóteses para o Test T de Student, a saber:

- Adotou-se como Hipótese Nula (H_0) que a média do Vv das partes (topo, meio e base) de um mesmo CP é igual ao Vv do CP inteiro. Como Hipótese Alternativa (H_1), considerou-se que é diferente. Dessa forma, origina-se um teste bicaudal com grau de liberdade 2, uma vez que estão sendo avaliados os três dados de topo, meio e base, e o módulo de t crítico ($|t_{\text{crít}}| = 4,313$, conforme Tabela 2).

Teor	CP	tcal	tcrít	Resultado
6%	1	-6,050	4,313	Rejeitar
6%	2	-3,981	4,313	Não Rejeitar
6%	3	-0,605	4,313	Não Rejeitar
8%	1	5,746	4,313	Rejeitar
8%	2	-1,454	4,313	Não Rejeitar
8%	3	-0,819	4,313	Não Rejeitar
10%	1	0,178	4,313	Não Rejeitar
10%	2	-0,147	4,313	Não Rejeitar
10%	3	2,115	4,313	Não Rejeitar

Nota: $t_{\text{cal}} = t$ calculado; $t_{\text{crít}} = t$ crítico

Tabela 2 – Comparação da média do Vv das partes de um mesmo CP com o Vv do CP inteiro

Fonte: Elaborado pelos(as) autores(as).

Assim, rejeitou-se o CP1 para o teor de 6% e o CP1 para o teor de 8%, pois apresentam valores de t maiores que o tcrít, ou seja, foram os dois CPs que apresentaram diferença significativa entre os valores para Vv de topo, meio e base com relação ao

Vv do próprio CP. Vale ressaltar que o erro cometido ao tomar essa decisão é menor que $\alpha = 5,0\%$.

Casos notáveis a serem observados estão na comparação dos dados para os CPs 1 dos teores 6% e 8%: enquanto a média do Vv das partes do CP1 para o teor de 6% (21,20%) é menor que o valor de Vv para esse mesmo CP inteiro (27,43%), para o teor de 8% acontece o contrário: a média das partes foi de 26,43% e a do CP inteiro foi de 24,70%. Os dados observados podem indicar que o corte no CP está provocando uma compactação não desejada ou que se está perdendo material também de maneira não desejada.

- Na segunda análise estatística, adotou-se como H_0 que o Vv do CP de um mesmo teor é igual aos Vv das partes desse mesmo CP. Como Hipótese Alternativa (H_1), adotou-se que é diferente. Dessa forma, origina-se um teste bicaudal com grau de liberdade 8 (neste caso, estão sendo avaliados os 3 CPs em que foram efetuados os cortes em topo, meio e base, resultando em 9 valores) e $|t_{crít}| = 2,3060$. Ressalta-se aqui que foi utilizado o Test T Emparelhado, pois as amostras são dependentes (Tabela 3).

Teor	d	sd	tobs	Análise
6%	-0,037	0,031	-3,662	Rejeitar
8%	-0,002	0,026	-0,284	Não Rejeitar
10%	0,008	0,020	1,142	Não Rejeitar
Nota: d=média amostral das diferenças; sd=variância amostral das diferenças; tobs=t observado				

Tabela 3 – Resultados do Test T Emparelhado

Fonte: Elaborado pelos(as) autores(as).

Observa-se que apenas a amostra AAA com teor de 6% de ligante apresentou diferença significativa entre as partes cortadas em relação aos CPs inteiros. A variabilidade dos dados, observada por meio da média e da variância amostral das diferenças, contribui para essa diferença. Entretanto, ressalta-se também a diferença entre as médias já indicadas previamente.

- Na terceira análise, adotou-se como H_0 que o Vv das partes dentro de um mesmo CP devem ser iguais entre si. Dessa forma, origina-se um teste bicaudal com grau de liberdade 4, $(3+3-2 = 4)$ e $|t_{crít}| = 2,7764$. Ressalta-se aqui que foi utilizado o Test T para amostras independentes, conforme apresentado na Tabela 4.

Test T	Topo	Meio	Base	Análise	Topo	Meio	Base
ANÁLISE TEOR 6%							
Topo	-	0,5031	0,2322	Topo	-	Não Rejeitar	Não Rejeitar
Meio	-0,5031	-	-0,1359	Meio	Não Rejeitar	-	Não Rejeitar
Base	-0,2322	0,1359	-	Base	Não Rejeitar	Não Rejeitar	-
ANÁLISE TEOR 8%							
Topo	-	-1,4120	-1,0037	Topo	-	Não Rejeitar	Não Rejeitar
Meio	-1,4120	-	0,6698	Meio	Não Rejeitar	-	Não Rejeitar
Base	1,0037	-0,6698	-	Base	Não Rejeitar	Não Rejeitar	-
ANÁLISE TEOR 10%							
Topo	-	-1,0125	-1,1792	Topo	-	Não Rejeitar	Não Rejeitar

Meio	1,0125	-	0,1402	Meio	Não Rejeitar	-	Não Rejeitar
Base	1,1792	-0,1402	-	Base	Não Rejeitar	Não Rejeitar	-

Tabela 4 – Resultados considerando que os Vv's das partes dentro de um mesmo corpo de prova devem ser iguais entre si.

Fonte: Elaborado pelos(as) autores(as).

Os resultados apresentados na Tabela 4 indicam que não houve variação significativa entre os dados obtidos para cada parte dos CPs de um mesmo teor, podendo-se trabalhar com todas as partes. No entanto, é válido ressaltar que, devido ao CP ser muito pequeno, foi possível cortá-lo em apenas três partes, o que diminui o espaço amostral e os graus de liberdade e aumenta o tcrít, tornando esse parâmetro de comparação mais flexível.

Considerações finais

Este trabalho teve como objetivo avaliar as variações nos vazios de amostras de AAA com a variação dos teores de ligante (6%, 8% e 10%). Para tal, foram realizadas análises volumétricas dos CPs tanto para amostras inteiras quanto para as cortadas, para se detectar diferenças de vazios ao longo da altura dos CPs.

Dos resultados obtidos, pode-se concluir, dos gráficos tipo *box plot*, que há um padrão de variação dos resultados dos ensaios realizados com os CPs de AAA inteiros: à medida que se tem maior quantidade de ligante na amostra, há melhor compactação, pois o volume de vazios é menor. Isso também se confirma pela tendência apresentada nos gráficos do tipo *box plot* para as densidades apresentadas e ainda pela pequena dispersão nos resultados demonstrados, ficando os limites superior e inferior próximos ao limite interquartil.

Em contrapartida, a mesma tendência de variação das características físicas determinadas (Gmb, Mea e Vv) em relação ao teor de ligante não foi observada nos CPs cortados, pois a dispersão foi consideravelmente maior do que aquela observada nas amostras inteiras. Tal fato pode ser justificado por duas razões no processo de corte: a ocorrência de amolgamento ou a perda indesejada de material, o que pode alterar o volume de vazios da parte estudada. No entanto, os testes estatísticos de hipóteses mostraram que, na comparação do Vv de cada parte do CP com a respectiva parte de outro CP de mesmo teor e na comparação do Vv de cada parte com o CP inteiro, essa dispersão é aceitável para a confiabilidade no uso dos dados obtidos nos casos de maiores teores de ligante, considerando o intervalo de confiança de 95% ($\alpha=5\%$).

Dessa forma, é possível concluir que corpos de prova de AAA com teores de ligante mais elevados tendem a apresentar resultados mais confiáveis no estudo de AAA, pois são misturas menos rígidas e, conseqüentemente, mais elásticas ao corte para análise do volume de vazios. No entanto, recomenda-se utilizar um espaço amostral maior do que o utilizado neste estudo, a fim de reduzir o valor de tcrít, o que possibilitará maior precisão nas análises e maior confiabilidade nos resultados obtidos para amostras de misturas asfálticas finas.

Diante do exposto, foi possível avaliar que os vazios das amostras de AAA indicam tendência de homogeneidade dos CPs e que essas amostras podem ser utilizadas em ensaios reológicos de forma segura. Assim, têm-se como sugestões para trabalhos futuros os seguintes pontos: estudar a utilização de areias nacionais em substituição à areia de Ottawa; verificar a espessura do filme ligante existente nas amostras de AAA; replicar o estudo para outros tipos de ligantes asfálticos; estudar

a influência do envelhecimento do ligante asfáltico; e realizar ensaios no reômetro de cisalhamento direto para avaliar a influência dos diferentes tipos de amostras nos parâmetros de fadiga de ligantes asfálticos.

Referências

ASTM (American Society for Testing and Materials). *C778: Standard Specification for Standard Sand*. West Conshohocken: ASMT, 2021.

BEHBAHANI, H.; SALEHFARD, R. A Review of Studies on Asphalt Fine Aggregate Matrix. *Arabian Journal for Science and Engineering*, [s. l.], v. 46, n. 11, p. 10289-10312, 2021.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. 2. ed. Rio de Janeiro, Petrobras: ABEDA, 2022.

COUTINHO, R. P. *Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

CURADO, T. S. *Avaliação das características microestruturais e reológicas de amostras de Argamassa Areia Asfalto (AAA)*. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2024.

DAI, Q.; YOU, Z. Prediction of creep stiffness of asphalt mixture with micromechanical finite-element and discrete-element models. *Journal of Engineering Mechanics*, [s. l.], v. 133, n. 2, feb. 2007.

DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). *ME423: Pavimentação: Ligante Asfáltico: Fluência e Recuperação de Ligante Asfáltico Determinados Sob Tensões Múltiplas (MSCR): Método de Ensaio*. Brasília, DF: DNIT, 2020a. p. 11.

DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). *ME 428: Pavimentação: misturas asfálticas: determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados: método de ensaio*. Brasília, DF: DNIT, 2020b.

DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). *ME 427: Pavimentação: misturas asfálticas: determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica medida em amostras não compactadas: método de ensaio*. Brasília, DF: DNIT, 2020c.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. *Curso de Estatística*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GRASSON FILHO, A. G. *Evaluation of the specific surface method as a tool to determine the asphalt content of fine aggregate matrices (FAM)*. 2019. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2019.

GRASSON FILHO, A.; FAXINA, A. L. Evaluation of the specific surface method as a tool to determine the binder content of fine-aggregate matrices. *Journal of Engineering Mechanics*, Reston, v. 33, n. 1, 2020.

KIM, H.; WAGONER, M. P.; BUTTLAR, W. G. Simulation of fracture behavior in asphalt concrete using a heterogeneous cohesive zone discrete element model. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Reston, v. 20, n. 8, 2008.

KIM, Y.-R.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Reston, v. 15, n. 1, p. 75-83, 2003.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N.; SONG, I. Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation. *Transportation Research Record*, [s. l.], n. 1832, p. 1-8, 2003.

KOMMIDI, S. R.; KIM Y.-R.; REZENDE, L. R. Fatigue characterization of binder with aging in two length scales: sand asphalt mortar and parallel plate binder film. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 237, p. 11, 2020.

LACKNER, R.; SPIEGL, M.; BLAB, R., EBERHARDSTEINER, J. Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? arguments from multiscale analysis. *Journal Of Materials In Civil Engineering*; Reston, v. 17, n. 5, 2005.

MIRANDA, P. P.; CURADO, T. S.; REZENDE, L. R. Avaliação laboratorial e estatística das características microestruturais da Argamassa Areia Asfalto. *TRANSPORTES*, v. 32, n. 3, p. e3014, 2024.

NG, A. K. Y. *Evaluation of the fatigue damage behavior of fine aggregate matrices prepared with modified asphalt binders*. 2017. Tese (Doutorado em Infraestrutura de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos; Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2017.

RADOVSKYI, B. Analytical formulas for film thickness in compacted asphalt mixture. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, DC, n. 1829, 2003.

REZENDE, L. R.; KOMMIDI, S. R.; KIM, Y. R.; KHEDMATI, M. Strain sweep fatigue testing of sand asphalt mortar to investigate the effects of sample geometry, binder film thickness, and testing temperature. *Transportation Research Record*, [s. l.], v. 2675, n. 10, p. 516-529, 2021.

RODRIGUES, I. A. *Análise do dano em Mistura de Agregados Finos (MAF)*. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

SOUZA, T. D.; ENRÍQUEZ-LEÓN, A. J.; MESQUITA, A. R.; GOMES, O. da F. M.; ULSEN, C.; UNDERWOOD, B. S.; ARAGÃO, F. T. S. Characterization of binder, mastic, and FAM film thickness within asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 421, 135595, mar. 2024.

SURESHA, S. N.; NINGAPPA, A. Recent trends and laboratory performance studies on FAM mixtures: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 174, p. 496-506, jun. 2018.

UNDERWOOD, B. S. *Multiscale constitutive modeling of asphalt concrete*. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – North Carolina State University, Raleigh, 2011.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. *Microstructural investigation of asphalt concrete for performing multiscale experimental studies*. Raleigh: North Carolina State University, 2013

VALENTA, R.; SEJNOHA, M.; ZEMAN, J. Macroscopic constitutive law for mastic asphalt mixtures from multiscale modeling. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, v. 8, n. 1, p. 131-149, jan. 2010.

VIEIRA, L. H. *Procedimento experimental para a determinação da espessura do filme de ligante e de mástique em matriz de agregado fino*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

VIEIRA, L. H.; SOUZA, T. D.; ENRÍQUEZ-LEÓN, A. J.; ARAGÃO, F. T. S.; GOMES, O. da F. M.; LEITE, L. F. M.; REZENDE, L. R. Experimental testing and analysis procedure to determine the apparent film thickness of asphalt binder in fine aggregate matrix mixtures. *Transportation Research Record*, [s. l.], v. 2675, n. 7, p. 166-179, 2021.