

REVISTA

DESAFIOS

ISSN: 2359-3652

V.12, n.4, julho/2025 - DOI: 10.20873/2025_jul_18498

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) COMO PARTE DO AGREGADO FINO em MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO SMA

STUDY OF THE TECHNICAL FEASIBILITY OF USING POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) WASTE AS PART OF THE FINE AGGREGATE IN SMA ASPHALT MIXTURES

ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DEL USO DE RESIDUOS DE POLIETILENO TEREFATALATO (PET) COMO PARTE DEL AGREGADO FINO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS TUPO SMA

Fernando Albino Botelho

Graduado em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Maringá (UEM). E-mail: fer_abotelho@hotmail.com | Orcid.org/0009-0008-1050-4751

Jesner Sereni Ildefonso

Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Maringá (UEM). E-mail: jsildefonso@uem.br | Orcid.org/ 0000-0003-2799-8600

RESUMO:

As misturas asfálticas do tipo SMA – *Stone Matrix Asphalt* possuem bom desempenho para pavimentos de tráfego pesado, sendo boa alternativa para os pavimentos rodoviários com volume de tráfego crescente. Entretanto, essas misturas utilizam grandes quantidades de agregados miúdos que são utilizados para preencher os vazios deixados pelos agregados graúdos. Dessa forma, uma opção para substituir parte do agregado miúdo é a sua substituição por resíduos de PET (politereftalato de etileno), sendo também uma alternativa para a reciclagem. Assim, esta pesquisa teve o objetivo de estudar o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo SMA com substituição de parte do agregado miúdo por PET. As misturas asfálticas foram enquadradas na faixa 19,0 mm da norma AASHTO MP8-02, compostas por ligante asfáltico CAP 50/70, britas 1 e 0, pó de brita e resíduos de PET. Foram moldados corpos de prova cilíndricos no teor de projeto de ligante asfáltico pelo método Marshall, e então ensaiados para os parâmetros de módulo de resiliência e resistência à tração. Os resultados dos ensaios apresentaram a resistência à tração com valores semelhantes para ambas misturas, enquanto que para o módulo de resiliência as misturas com PET obtiveram valores 36% inferiores do que as misturas convencionais.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação. Mistura asfáltica. Politereftalato de etileno. Stone matrix asphalt. Resistência. Tração. Resiliência.

ABSTRACT:

Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures, known for their good performance in heavy traffic pavements, present a viable alternative for road pavements experiencing increasing traffic volumes. However, these mixtures use large amounts of fine aggregates to fill the voids left by coarse aggregates. Therefore, one option for replacing part of the fine aggregate is to use polyethylene terephthalate (PET) waste, which also serves as a recycling alternative. Thus, this research aimed to study the mechanical behavior of SMA type asphalt mixtures with partial substitution of fine aggregate with PET. The asphalt mixtures conformed to the 19.0 mm specification of the AASHTO MP8-02 standard, consisting of CAP 50/70 asphalt binder; crushed stones 1 and 0, stone dust, and PET waste. Cylindrical test specimens were molded at the design asphalt binder content using the Marshall method, and then tested for resilience modulus and tensile strength parameters. The test results showed that the tensile strength values were similar for both mixtures, while for the resilience modulus, the mixtures with PET showed values 36% lower than the standard mixtures.

KEYWORDS: *Paving. Asphalt mixture. Polyethylene terephthalate. Stone Matrix Asphalt. Strength. Tensile. Resilience.*

RESUMEN:

Las mezclas asfálticas tipo SMA – Stone Matrix Asphalt presentan un buen desempeño en pavimentos de tráfico pesado, lo que las convierte en una alternativa viable para carreteras con un volumen de tráfico en aumento. Sin embargo, estas mezclas requieren grandes cantidades de agregados finos para llenar los vacíos dejados por los agregados gruesos. En este sentido, una opción para sustituir parcialmente el agregado fino es el uso de residuos de PET (politereftalato de etileno), lo que también representa una alternativa para el reciclaje. Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo estudiar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas tipo SMA con la sustitución parcial del agregado fino por PET. Las mezclas asfálticas fueron diseñadas de acuerdo con la fracción 19,0 mm de la norma AASHTO MP8-02 y estuvieron compuestas por ligante asfáltico CAP 50/70, agregados brita 1 y 0, polvo de piedra y residuos de PET. Se moldearon probetas cilíndricas utilizando el contenido óptimo de ligante asfáltico determinado por el método Marshall y se realizaron ensayos para evaluar los parámetros de módulo de resiliencia y resistencia a la tracción. Los resultados de los ensayos mostraron que la resistencia a la tracción presentó valores similares en ambas mezclas, mientras que el módulo de resiliencia en las mezclas con PET fue 36% inferior en comparación con las mezclas convencionales.

Palabras clave: *Pavimentación. Mezcla asfáltica. Politereftalato de etileno. Stone Matrix Asphalt. Resistencia. Tracción. Resiliencia.*

INTRODUÇÃO

A mistura asfáltica *Stone Matrix Asphalt* (SMA) teve sua origem em meados dos anos 1960 na Alemanha, quando surgiu a necessidade de reestruturar alguns pavimentos de concreto de cimento ou de concreto asfáltico convencional. Esses dois tipos de pavimentos se apresentavam com reflexão de trincas e deformações permanentes, e o SMA veio como uma solução a esses problemas. Então, depois dos anos 1980, esse tipo de mistura se difundiu pelo restante da Europa e, a partir dos anos 1990, começou a ser introduzido em outras partes do mundo, como Américas e Ásia (Blazejowski, 2011).

A principal diferença entre um concreto asfáltico usinado a quente convencional e o SMA (também usinado a quente) está na granulometria e nas quantidades e tipos de ligante asfáltico. No SMA são utilizadas grandes quantidades de agregados graúdos para aumentar a interação entre grãos, e consequentemente, fortalecer o intertravamento do esqueleto mineral, por isso forma-se um alto volume de vazios que é preenchido por agregados finos e pelo ligante asfáltico (Bernucci et al., 2008). Por

conta dessas características, o SMA é considerado ótimo para pavimentos de tráfegos pesados, os quais exigem elevada resistência. Pode-se citar vantagens como: vida útil prolongada; alta resistência à deformação, à fadiga e ao desgaste; boa rugosidade da superfície e diminuição do ruído causado entre o contato dos pneus com os pavimentos (Blazejowski, 2011).

Assim, sabe-se que a mistura asfáltica do tipo SMA utiliza grandes quantidades de agregados graúdos e finos, sem faixa intermediária. Por conta disso, esse tipo de mistura asfáltica tem um custo elevado dada a grande utilização de agregados finos, sobretudo em locais que a rocha britada não gera essa fração do material e há demanda por matéria prima complementar. Dessa forma, uma maneira de suprir essa grande necessidade de agregados finos é a substituição de parte desses, por resíduos de politereftalato de etileno (PET). Ressalta-se que o custo inicial da mistura asfáltica do tipo SMA também é elevado devido à indicação de uso de ligante asfáltico modificado, bem como maior teor de ligante asfáltico em comparação com o concreto asfáltico usinado a quente.

O PET é um plástico amplamente utilizado por possuir baixo custo, ser resistente às deformações, à umidade e ao ataque de substâncias. Ele pode ser aquecido e se tornar fluido, e depois do resfriamento ao retornar ao estado inicial, manter suas propriedades iniciais (Giraldi, 2008). Dessa forma, por conta de sua grande utilização, altos volumes de lixo plástico e poluição são produzidos ao redor do mundo, gerando a necessidade de um correto descarte, reciclagem e reutilização desse material.

De acordo com o estudo realizado pelo Fundo Mundial Para a Natureza (WWF, 2022), o Brasil é o quarto maior produtor de lixo plástico no Mundo, com 11,3 milhões de toneladas. Esse levantamento do WWF, que se baseou nos dados do Banco Mundial, analisou o lixo plástico de mais de 200 países. Os resultados mostraram que o brasileiro produz em média 1 kg de plástico por semana, e desses, 0,9 kg é coletado, mas apenas 0,1 kg é reciclado. Assim, o Brasil recicla efetivamente apenas 1,28% do lixo plástico, ficando bem abaixo da média global que é de 9%.

É fato que a humanidade busca formas de solucionar o problema do lixo, inclusive do lixo plástico, e isso é necessário. Há ainda, uma busca por sempre reciclar e reutilizar o máximo possível de resíduos, e também, utilizar o mínimo possível de recursos naturais, já que existem formas de se utilizar recursos provenientes do descarte. Assim, caso um estudo aplicando resíduos de PET em misturas asfálticas do tipo SMA

traga bons resultados, será uma forma de reduzir parte do impacto ambiental causado pelo resíduo plástico, bem como o da extração de recursos naturais.

Portanto, essa pesquisa teve como objetivo analisar e avaliar a viabilidade mecânica por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência em corpos de prova, traçando um comparativo entre as misturas SMA e misturas SMA com incorporação parcial de PET nos agregados finos.

STONE MATRIX ASPHALT

A *National Asphalt Pavement Association* (NAPA, 2002) afirma que o uso de misturas SMA em pavimentos de tráfego intenso e com transporte de cargas pesadas é uma de suas grandes vantagens. A mistura é capaz de aumentar a vida útil e compensar o custo adicional, comparando com misturas asfálticas convencionais. Isso é possível por conta da maior concentração de agregados graúdos que gera um grande contato entre grãos e além disso, essa maior concentração gera elevado índice de vazios que é preenchido também por quantidades superiores de agregados finos e ligante asfáltico que aumenta a durabilidade da mistura.

Entretanto, esse tipo de mistura tem um custo bem mais alto ao se comparar com misturas asfálticas convencionais, devido à elevada quantidade de agregados graúdos, de agregados finos (principalmente o filer que possui custo elevado) e altos teores de ligante asfáltico. Assim, em alguns casos, pode se tornar financeiramente inviável a utilização das misturas SMA ao se analisar somente o custo inicial.

As vantagens das misturas asfálticas SMA podem ser verificadas e avaliadas por meio de ensaios laboratoriais, de forma com que seja possível estudar a viabilidade da implantação de misturas desse tipo nas rodovias brasileiras. Dentre os ensaios de caracterização mecânica da mistura asfáltica existem dois importantes ensaios, que são o de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência.

O ensaio de tração por compressão diametral, normatizado pelo método de ensaio DNIT 136/2018 tem o objetivo de determinar o valor máximo de um carregamento até a ruptura do corpo de prova, ou seja, sua resistência. Esse valor é importante para outros ensaios e algumas relações na avaliação de misturas asfálticas, como em fadiga e módulo de resiliência e, além disso, é um dos critérios estabelecidos para misturas asfálticas pela norma DNIT 031/2006.

O método de ensaio DNIT-135/2018 define o módulo de resiliência como a “relação entre a tensão horizontal resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável (resiliente), por ciclo.”

De acordo com Bernucci et al. (2022), conforme as misturas asfálticas envelhecem no pavimento, a resistência à tração aumenta, porém isso não necessariamente é uma vantagem, visto que o revestimento perde sua flexibilidade (aumenta o módulo de resiliência). Assim, existe uma correlação entre MR e RT para cada tipo de mistura (variando os tipos de agregado e ligante asfáltico) que permanece constante apesar do envelhecimento.

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados respectivamente resultados de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência encontrados por autores que pesquisaram misturas asfálticas do tipo SMA ou misturas asfálticas convencionais com incorporação de PET.

Tabela 1 – Resistência à tração por compressão diametral

Fonte	Tipo de mistura	RT (MPa)
Grabowski (2019)	SMA com 0,3% de fibra de têxtil	0,81
Grabowski (2019)	SMA com 0,3% de fibra de celulose	0,72
Kök, Yilmaz e Akpolat (2016)	SMA com 0,3% de fibra de celulose	0,76
Manosalvas-paredes et al. (2016)	SMA com 0,3% de fibra de celulose	1,83
Silva (2015)	CAP com 5% de PET	1,34
Arao (2016)	Convencional com 3% de PET	1,78
Räder (2018)	Convencional com 1,5% de PET	1,55

Tabela 2 – Módulo de resiliência

Fonte	Tipo de mistura	MR (MPa)
Grabowski (2019)	SMA com 0,3% de fibra de têxtil	2601
Grabowski (2019)	SMA com 0,3% de fibra de celulose	2525
Mokhtari e Najad (2012)	SMA com 0,3% de fibra de celulose	2150
Vale, Casagrande e Soares (2014)	SMA com 0,3% de fibra de celulose	2628
Silva (2015)	CAP com 5% de PET	10704
Arao (2016)	Convencional com 3% de PET	6289
Räder (2018)	Convencional com 1,5% de PET	8738

Percebe-se que os valores de resistência à tração para as misturas SMA estão em torno de 0,7 a 0,8 MPa e de módulo de resiliência entre 2100 e 2700 MPa.

Para misturas convencionais com PET ambos parâmetros possuem resultados mais altos, entre 1,3 e 1,8 MPa para resistência à tração e de 6200 a 10700 MPa para o módulo de resiliência. Esses valores se mostram importantes para utilizar como comparação com os resultados dessa pesquisa.

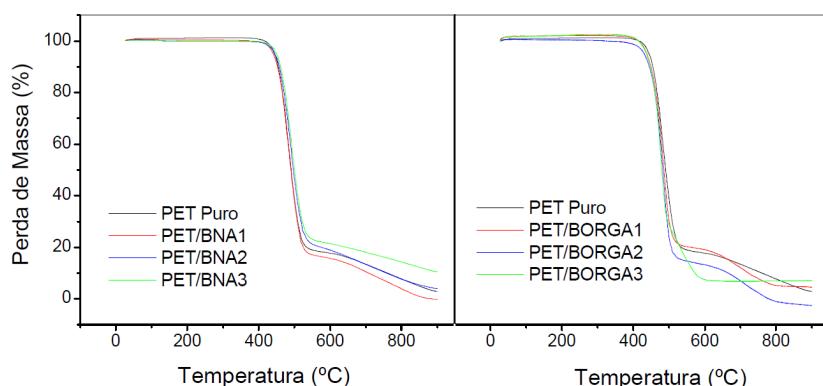
ANÁLISE TÉRMICA DE POLÍMEROS - PET

De acordo com Cavalheiro e Denari (2012), a análise térmica de polímeros são métodos para medir alguma propriedade física específica. Para o PET, e sua aplicação diversa, é comumente utilizada a análise termogravimétrica (TGA), que acompanha a variação da massa do polímero em função da programação de temperatura. Na Figura 1 são apresentados os resultados de análises termogravimétricas de PET puro e de compostos de PET.

Ao se analisar a Figura 1 é possível perceber que a degradação do PET por perda de massa se dá a partir de 400 °C, valor este que é muito maior que as temperaturas usadas em pavimentação, as quais normalmente ficam na faixa de 140 °C a 160 °C.

Na Figura 2 são apresentadas as amostras de PET triturada em granulometria fina, para se utilizar nas misturas asfálticas dessa pesquisa.

Figura 1 – Análises termogravimétricas de PET e compostos de PET



Fonte: Silva, Raposo e Leite (2005)

Figura 2: Amostras de PET



Importante ressaltar a homogeneidade da Trituração, de modo a trabalhar com tamanho uniforme de resíduo, com o intuito de minimizar possível variação de resultados em função da granulometria. No entanto, o resíduo de PET se apresenta com formas lamelares.

METODOLOGIA

MATERIAIS UTILIZADOS NA MISTURA ASFÁLTICA

Os agregados e o ligante asfáltico para a mistura asfáltica foram fornecidos pela empresa Extracon Mineração e Obras, localizada na cidade de Maringá/PR. Foram escolhidos os seguintes agregados: brita 1, brita 0 e pó de brita. O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70.

Por se tratar de misturas SMA é necessário utilizar fibra para conter o escorramento do ligante asfáltico. Assim, utilizou-se fibra têxtil que possui ótimos resultados para essas misturas (Grabowski, 2019).

Por fim, o laboratório de pavimentação da Universidade Estadual de Maringá já possuía amostras de resíduos de politereftalato de etileno, que também foram utilizados na mistura. Essas amostras já estavam trituradas em granulometria fina e foram obtidas de uma empresa que recicla lixo plástico para produzir vassouras, nesse processo de produção é gerado mais lixo plástico que é o PET já triturado. Essas amostras estavam em boas condições para serem utilizadas.

CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Foi feito o ensaio de granulometria para todos os agregados (exceto para fibra têxtil) conforme a DNER-ME 083/98. Os resultados de granulometria obtidos são mostrados na Tabela 3.

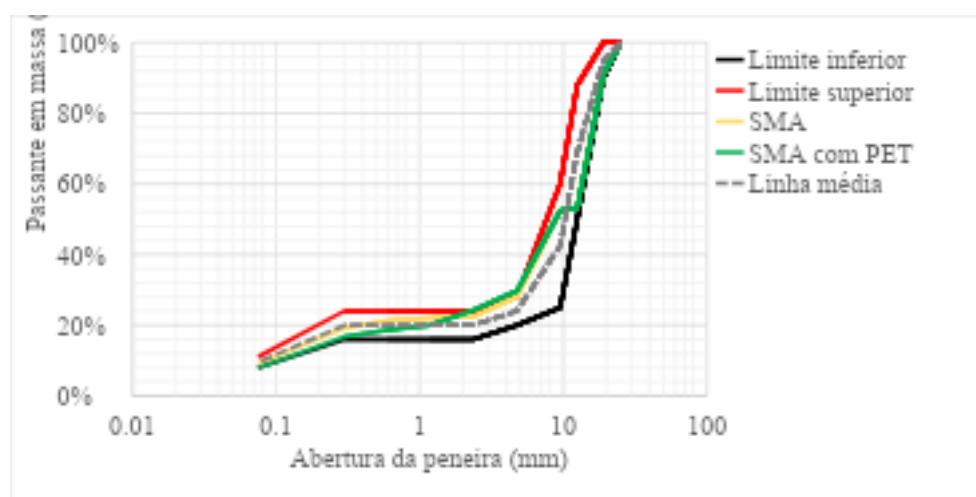
Dessa forma, foi selecionada a quantidade de cada material para se obter misturas asfálticas SMA (com e sem PET) que se enquadram na faixa de 19,0 mm da norma AASHTO MP8-02. Essa faixa foi escolhida por utilizar maiores quantidade de agregados graúdos (retidos nas primeiras peneiras), então melhores para misturas SMA, e também para utilizar resultados da literatura como comparação, que também utilizaram essa faixa da AASHTO. Assim, definiu-se as porcentagens de acordo com o apresentado na Tabela 3, de forma se compor a curva granulométrica.

Tabela 3 – Granulometria dos agregados da mistura

Abertura da peneira (mm)	Material passante (%)			
	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	PET
25	100	100	100	100
19	81	100	100	100
12,5	3	100	100	100
9,5	1	100	100	100
4,75	0	19	100	100
2,36	0	1	100	97
1,18	0	1	99	17
0,6	0	1	95	3
0,3	0	1	86	1
0,075	0	1	40	0

A porcentagem de PET foi escolhida e definida para toda a faixa granulométrica, e assim variou-se as quantidades dos outros agregados. Na Figura 3, mostra-se a curva granulométrica final da mistura de agregados sem e com PET, bem como os limites da faixa de 19,0 mm da AASHTO MP8-02.

Figura 3 – Curva granulométrica da mistura asfáltica sem e com PET, os limites da faixa 19,0 mm da AASHTO MP8-02 e a média dos limites



Em se tratando das densidades, para os agregados brita 1 e brita 0 foi realizado o ensaio DNIT 413/2021 para determinar a densidade do agregado graúdo. A densidade relativa real encontrada foi de 2,930 para a brita 1 e 2,936 para a brita 0. Já por meio da DNER 084/95 foi realizado o ensaio de determinação da densidade relativa real do agregado miúdo (pó de brita), com um resultado encontrado de 2,933. A absorção encontrada foi de 1,634 para a brita 1 e 2,847 para a brita 0.

Segundo Koschevic e Bittencourt (2016) e Mano e Mendes (2004) a densidade do politereftalato de etileno (PET) está entre 1,33 e 1,45, dessa forma optou-se por utilizar a média, 1,39 para os cálculos.

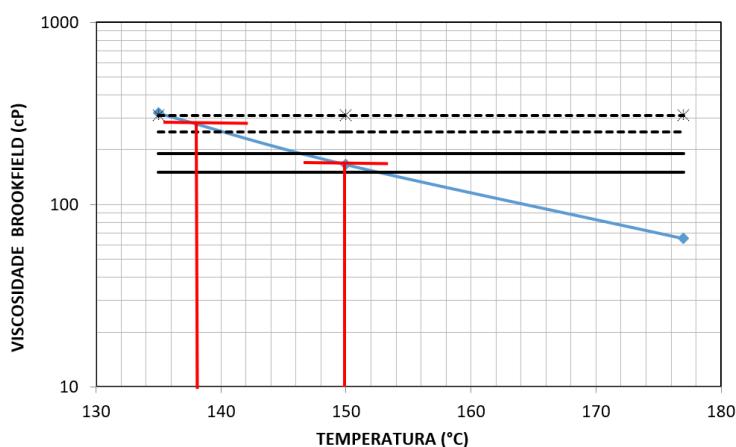
VISCOSIDADE DO LIGANTE ASFÁLTICO

O conhecimento da viscosidade do ligante asfáltico é importante para realizar o processo de dosagem em temperatura adequada. Assim, na Tabela 4 e no Figura 4 são apresentados os resultados do ensaio de viscosidade Brookfield do ligante asfáltico (CAP 50/70), realizado de acordo com a norma NBR 15184.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de viscosidade Brookfield

Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)
135	318
155	166
177	65

Figura 4 – Limites de temperatura de usinagem e compactação, bem como a curva dos resultados do ensaio de viscosidade



Dado que a viscosidade de usinagem deve estar entre 150 e 190 cP e de compactação entre 250 e 310 cP, as temperaturas usadas para aquecimento do CAP para usinagem e para compactação da mistura foram de 150 °C e 138 °C respectivamente, e o agregado foi aquecido à temperatura de 150 °C para a usinagem.

TEOR DE LIGANTE ASFÁLTICO DE PROJETO

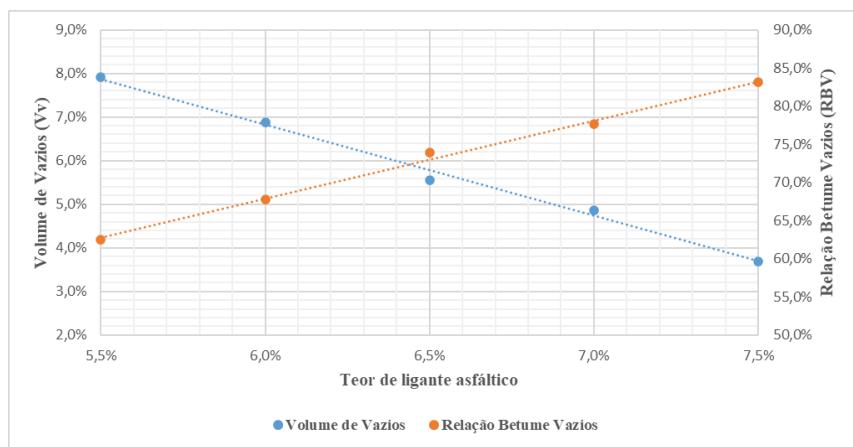
De acordo com a norma DNER-ME 043/95 que descreve o método Marshall, foram moldados 3 corpos de prova para cada teor de ligante asfáltico, com a finalidade de se definir o teor de projeto. Dessa forma, foram realizados os ensaios com teores de 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0% e 7,5%, para as misturas SMA comuns e para as misturas SMA com incorporação parcial de PET.

Seguindo as especificações de serviço da DNIT 031/2006, a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico deve atender as restrições de: volume de vazios (V_v) entre 3% e 5% e a relação betume-vazios (RBV) entre 75% e 82%. Assim, para essa pesquisa definiu-se um teor de projeto de ligante asfáltico necessário para se obter 5% de volume de vazios e 77% de relação betume-vazios. Esse valor foi definido porque para utilizar 4% de volume de vazios seria necessário um elevado teor de ligante asfáltico, maior que o usual da literatura e que poderia influenciar nos parâmetros analisados (resistência à tração e módulo de resiliência). Dessa forma utilizou-se de 5% de volume de vazios (que está de acordo com as especificações de serviço) para as duas misturas e foi alterado o teor de ligante asfáltico entre as misturas asfálticas.

Portanto, o teor de projeto de ligante asfáltico adotado para as misturas SMA convencionais foi de 6,9% e para as misturas SMA com incorporação de PET de

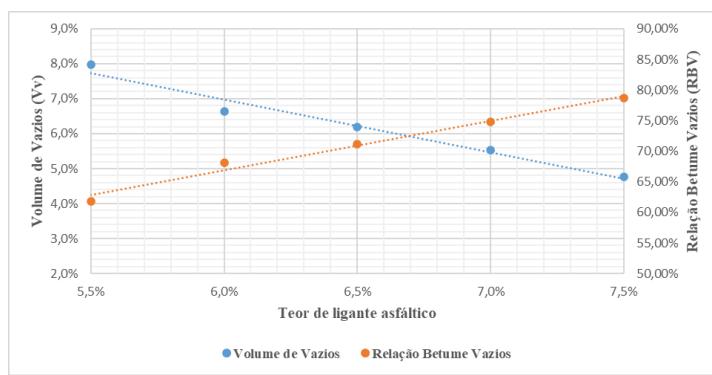
7,3%. Nos Figuras 5 e 6 são apresentados os resultados de Vv e RBV das misturas sem e com PET respectivamente.

Figura 5 – Relação betume-vazios e volume de vazios em função do teor de ligante asfáltico das misturas SMA comuns



As diferenças encontradas entre o volume de vazios e a relação betume vazios das duas misturas deve-se provavelmente às diferenças de forma dos materiais, uma vez que materiais lamelares tem maior área superficial que materiais cúbicos para mesmos volumes.

Figura 6 – Relação betume-vazios e volume de vazios em função do teor de ligante asfáltico das misturas SMA com incorporação de PET



Entende-se, também, que a absorção de asfalto pelo basalto e a densidade mais baixa do PET podem influenciar no teor de asfalto.

ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL

Após a dosagem Marshall e definição do teor de projeto de ligante asfáltico, foi feito o ensaio para determinar a estabilidade e a fluênciа dos corpos de prova de cada teor de

ligante asfáltico. Os resultados dos valores médios, por teor de asfalto, para estabilidade e fluência para ambas condições experimentais estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores de estabilidade e fluência Marshall

Mistura asfáltica	Teor asfalto (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
SMA convencional	5,5	995	4,75
	6,0	942	5,12
	6,5	817	6,96
	7,0	867	6,81
	7,5	825	6,87
SMA com PET	5,5	1132	5,87
	6,0	1172	6,02
	6,5	994	5,99
	7,0	892	5,01
	7,5	932	8,42

A partir dos dados contidos na Tabela 5 é possível perceber que, conforme aumenta-se o teor de asfalto, a estabilidade cai e a fluência aumenta, tanto nos corpos de prova comuns, quanto nos corpos de prova com PET.

Com o objetivo de quantificar essa variação de estabilidade, que é a resistência oferecida pelo corpo de prova, entre as duas diferentes condições experimentais, criou-se a Tabela 6, na qual há a diferença relativa entre as condições estudadas, em função do teor de asfalto.

Tabela 6 – Diferença relativa de estabilidade entre os corpos de prova com e sem PET

Teor de asfalto (%)	Variação da estabilidade (%)
5,5	12,12
6,0	19,66
6,5	17,73
7,0	2,84
7,5	11,49

Os valores de estabilidade dos corpos de prova com PET são maiores para todos os teores de asfalto utilizados, mostrando-se com menor diferença mais próximo ao teor de projeto.

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Nessa seção estão descritos os métodos para realizar os ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral e resistência à tração por compressão diametral.

Para o ensaio de módulo de resiliência, foram utilizados 6 corpos de prova, dos quais 3 foram de misturas SMA convencionais com o teor de projeto de ligante asfáltico de 6,9%, e 3 de misturas SMA com incorporação de PET com o teor de projeto de ligante asfáltico de 7,3%.

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral utilizou-se dos mesmos corpos de prova, visto que o ensaio de módulo de resiliência foi feito por um método não destrutivo. Ambos os ensaios foram realizados na mesma direção de cada corpo de prova. Já para o método Marshall foram moldados 30 corpos de prova com 1200 g e aplicados 50 golpes do compactador por face do corpo de prova.

MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Para o ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral, utilizou-se um equipamento composto por sistema pneumático de aplicação de carga com regulador de pressão, pistão de carga, válvula de transmissão de carga vertical e cilindro de pressão. Todos esses dispositivos bem como as coletas dos dados foram configurados e coletados por meio de programa computacional.

O preparo dos corpos de prova foi feito deixando-os acondicionados 24 horas em uma temperatura de 25 °C para a estabilização. Depois disso, foram posicionados em um suporte, centralizados e levados para uma câmara de temperatura, conforme mostrado na Figura 7.

Foram fixados dois transdutores mecânicos-eletromagnéticos do tipo *Linear Variable Differential Transformers* (LVDT), com precisão de 0,001 mm que são ligados ao sistema eletrônico para a aquisição de dados e medição do deslocamento relativo do corpo de prova durante o ensaio.

Figura 7 – Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral



Dessa forma, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio com ciclos de carregamento de 1,0 segundo, sendo 0,1 segundo de aplicação de carga e 0,9 segundo de recuperação. A tensão aplicada foi de 50 kPa, de forma a se obter valores de deslocamento entre 0,002 mm e 0,003 mm, evitando a fadiga dos corpos de prova.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para determinar a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova, seguiu-se o método descrito pela normativa DNIT-ME 136/2018. Dessa forma, primeiro foram feitas quatro medidas de altura e de diâmetro, utilizando um paquímetro, dos corpos de prova, para então ser adotada a média dessas quatro medidas como a altura e diâmetro dos corpos de prova. Após isso, manteve-se os corpos de prova em ambiente por 24 horas com temperatura controlada à 25 °C.

Cada um dos corpos de prova foi posicionado no dispositivo centralizador com a superfície cilíndrica entre os dois frisos metálicos. Assim, são levados à prensa mecânica (Figura 8) e aplica-se uma carga vertical de compressão com velocidade constante de 0,8 mm/s até a ruptura do corpo de prova.

Figura 8 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Por fim, para calcular o valor de resistência à tração, utilizou-se a Equação 1.

$$\sigma_R = (2*F)/(\pi DH) \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: σ_R é a resistência à tração (MPa), F é a carga de ruptura (N), D é o diâmetro de corpo de prova (mm) e H é a altura do corpo de prova (mm).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Com os dados coletados pelo sistema computacional para o ensaio de módulo de resiliência (MR), encontrou-se os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados de módulo de resiliência

Mistura asfáltica	MR (MPa)	Desv. Pad. (MPa)	Coef. Var. (%)	Diferença relativa entre as misturas
SMA convencional	3695	8	0,22	-35,7%
SMA com PET	2723	95	3,49	

Percebe-se que os resultados de módulo de resiliência entre os dois tipos de misturas asfálticas tiveram uma variação de aproximadamente 36%. Como essa variação é maior que o desvio padrão do ensaio, conclui-se que misturas asfálticas do tipo SMA com incorporação de PET nos agregados finos, possuem um valor de módulo de resiliência menor do que misturas SMA comuns, o que significa uma mistura mais flexível comparada com as misturas convencionais que se apresentam mais rígidas. Essa variação entre os dois tipos de mistura pode ter ocorrido por conta da utilização de 5% de PET em uma delas, também devido à diferença de quantidade de alguns agregados utilizados e dos diferentes teores de ligantes asfáltico (6,9% para SMA convencional e 7,3% para SMA com PET).

Importante ressaltar que, no momento da mistura dos agregados com o ligante asfáltico para a moldagem dos corpos de prova, foi observado um comportamento de agregado entre o PET e o ligante asfáltico, ou seja, não houve a incorporação do polímero no ligante asfáltico.

Entretanto, para essa pesquisa, as misturas SMA convencionais (de controle) tiveram resultados de módulo um pouco mais altos do que os encontrados na literatura (por volta de 2500 MPa), que pode ser por conta de um teor de ligante asfáltico mais alto que o usual ou devido às características dos agregados basálticos utilizados e, assim, os resultados para os corpos de prova de SMA com PET ficaram bem próximos aos da literatura, que são bons valores para misturas asfálticas do tipo SMA.

RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Com os dados de carga obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT), e com as medidas de diâmetro e altura dos corpos de prova, por meio da Equação 1, encontrou-se os resultados de resistência à tração em MPa (Tabela 8).

Tabela 8 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral

Mistura asfáltica	RT (MPa)	Desv. Pad. (MPa)	Coef. Var. (%)	Diferença relativa entre as misturas
SMA convencional	0,70	0,05	7,14	
SMA com PET	0,66	0,00	0,00	-6,1%

Observa-se que a variação entre os resultados dos corpos de prova convencionais para os com PET foi de 6,1%, valor esse que é menor do que o coeficiente de variação, assim não se pode afirmar que houve variação no resultado de resistência à tração com o uso do PET nas misturas. Ambas misturas chegaram em resultados próximos aos da literatura para esse parâmetro em misturas asfálticas SMA, como pode-se perceber analisando-se os resultados da Tabela 1.

Apesar dos valores para os corpos de prova com PET terem ficado aproximadamente 6,1% abaixo dos corpos de prova de controle, ambos resultados estão de acordo com a DNIT 031/2006, que rege a especificação de serviço para misturas asfálticas convencionais, a qual recomenda resultados de resistência à tração por compressão diametral maiores do que 0,6 MPa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos por esse trabalho auxiliaram na avaliação da viabilidade mecânica ao se utilizar resíduos de politereftalato de etileno (PET) em parte do agregado fino de misturas asfálticas do tipo SMA, comparando os parâmetros com misturas SMA convencionais, ou seja, sem a substituição de parte do agregado fino.

Em relação à estabilidade Marshall, os dois tipos de misturas apresentaram valores superiores ao mínimo indicado para todos os teores de ligante asfáltico ensaiados, ressaltando que as misturas com incorporação de PET esses resultados foram maiores. Quanto ao ensaio de módulo de resiliência, a variação entre os dois tipos de mistura foi elevada, em torno de 36%, concluindo que para esse parâmetro a utilização de PET resulta num valor menor de módulo, ou seja, uma mistura mais flexível, porém ainda

de acordo com misturas asfálticas SMA convencionais quando comparado com resultados da literatura.

Já para a resistência à tração por compressão diametral, os valores das misturas com PET foram menores (em torno de 6% de variação), porém para as duas misturas esse parâmetro atende as recomendações de especificação de serviço.

Analizando os resultados dos ensaios mecânicos avaliados nesse trabalho, bem como o parâmetro de estabilidade Marshall, percebe-se que existe uma diferença entre os dois tipos de mistura. Para a estabilidade Marshall os resultados da mistura com incorporação de PET foram maiores, porém para os ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração os valores da mistura asfáltica do tipo SMA convencional foram maiores. Entretanto, todos os parâmetros avaliados, para as duas misturas asfálticas, estão de acordo com as especificações de serviço DNIT-ES 031/2006, com a NAPA (2002) e com a literatura. Dessa forma, mesmo com resultados de caracterização mecânica um pouco menores quando comparado com misturas SMA comuns, conclui-se que é possível utilizar resíduos de polietereftalato de etileno (PET) como substituição de parte do agregado fino de misturas asfálticas do tipo SMA.

Não foi possível observar elevação na resistência à tração e nem módulo de resiliência na mistura com incorporação de PET, porém houve melhoria na estabilidade Marshall. Assim, no uso de PET em misturas SMA como agregado fino, tem-se as vantagens na economia agregados finos e na utilização desses resíduos de PET que seriam descartados e ainda ser viável tecnicamente.

Referências Bibliográficas

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **AASHTO MP 8:** Stone Matrix Asphalt (SMA). Estados Unidos, 2001.

ARAO, M. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de polietileno tereftalato (PET) triturado. 2016. **Dissertação de mestrado** – Departamento de Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184:** Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2005.

BLAZEJOWSKI, K. **Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice.** Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2011. 295p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

CAVALHEIRO, E. T. G.; DENARI, G. B. **Princípios e aplicações de análise térmica.** São Carlos, 2012. p. 3-9.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043/95:** Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083/98:** Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084/95:** Agregado miúdo - determinação de densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 031/2006:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 135/2018:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 136/2018:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 413/2021:** Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas. Rio de Janeiro, 2021.

GIRALDI, A. L. F. de M. Compósitos híbridos de Poli (Tereftalato de Etileno) (PET) / fibra de vidro (FV) modificador de impacto (E-MA-GMA). 2008. **Tese de doutorado** – Faculdade de Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

GRABOWSKI, G. N. Estudo da viabilidade de uso de fibras provenientes de resíduos da indústria têxtil em mistura SMA. 2019. **Dissertação de mestrado** – Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.

KÖK, B. V.; YILMAZ, M.; AKPOLAT, M. Performance evaluation of crumb rubber and paraffin modified stone mastic asphalt. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s.l.], v. 43, n. 5, p.402-410, maio 2016. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2015-0365>.

KOSCHEVIC, M. T; BITTENCOURT, P. R. S. Meio ambiente e materiais poliméricos: Breves considerações com ênfase ao Politemaleftalato de Etileno (PET) e processos de degradação. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**. Medianeira, v. 2, n. 14, p. 60-80, jul./dez. 2016. <https://periodicos.utfpr.edu.br/recit>

MANOSALVAS-PAREDES, M. et al. Rubber modified binders as an alternative to cellulose fiber – SBS polymers in Stone Matrix Asphalt. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 121, p.727-732, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.028>.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros.** 2. ed. rev. E ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

MOKHTARI, A.; NEJAD, F. M. Mechanistic approach for fiber and polymer modified SMA mixtures. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 36, p.381-390, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.032>.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION – NAPA. **Design and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice.** Quality Improvement Series 122. Lanham, 2002.

RÄDER, A. R. D. S. Estudo da adição de resíduos de garrafas PET pós-consumo em misturas asfálticas à quente. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação) – Engenharia Civil, 99 f. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, Ijuí, 2018.

SILVA, J. D. A. A. Utilização do politereftalato de etileno (PET) em misturas asfálticas. 2015. **Tese de doutorado** – Centro de Ciências e Tecnologia – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SILVA, S. M. L.; RAPOSO, C. M. O.; LEITE, I. F. Propriedades térmicas de compostos de PET/BETONINA, 2005. **Anais**. 8º Congresso Brasileiro de Polímeros (8ºCBPol), Vol. 1, pp.1-1, Águas de Lindóia, SP, Brasil, 2005.

VALE, A. C.; CASAGRANDE, M. T.; SOARES, J. B.. Behavior of Natural Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Two Design Methods. **Journal Of Materials In. Civil Engineering**, [s.l.], v. 26, n. 3, p.457-465, mar. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000815](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000815).

WORLD WILDLIFE FUND – WWF. **Solucionar a Poluição Plástica: Transparência e Responsabilização**. Suíça, 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em: 08 out. 2022.