

## AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR POLÍMERO PET A PARTIR DA METODOLOGIA MEDINA

LUCAS SANTOS FELICETTI<sup>1</sup>, ANTÔNIO CARLOS RODRIGUES GUIMARÃES<sup>2</sup>, FILIPE ALMEIDA CÔRREA DO NASCIMENTO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mestrando em Engenharia de Transportes, IME, Rio de Janeiro-RJ, lucas.felicetti@ime.eb.br;

<sup>2</sup>Dr. em Engenharia Civil, Prof. do IME, Rio de Janeiro-RJ, guimaraes@ime.eb.br;

<sup>3</sup>Dr. em Engenharia de Transportes, Prof. do IME, Rio de Janeiro-RJ, filipe.nascimento@ime.eb.br

**RESUMO:** Diante da necessidade de pavimentos que atendam às condições de volume e carga de tráfego cada vez maiores, novos materiais têm sido pesquisados em busca de melhorias no seu desempenho mecânico. Por outro lado, há uma grande preocupação ambiental em relação ao descarte de resíduos plásticos que se acumulam em lixões e aterros sanitários, o que impacta negativamente o meio ambiente. Diante disso, este estudo investiga o comportamento mecânico de diferentes misturas asfálticas modificadas por polímero PET, por meio de uma avaliação estrutural do desempenho à fadiga do pavimento, a partir do novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Os resultados mostraram que a incorporação de PET aumentou em até 2,77 vezes a vida útil do pavimento, permitindo reduzir 11,5 cm da espessura da camada de revestimento asfáltico. Dessa forma, esta pesquisa busca contribuir para melhorar o desempenho mecânico dos pavimentos e, simultaneamente, promover a reciclagem de resíduos PET.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dimensionamento de pavimentos, análise mecanística-empírica, resíduos Polietileno Tereftalato.

### STRUCTURAL EVALUATION OF PET POLYMER MODIFIED ASPHALT PAVEMENTS BASED ON THE MEDINA METHODOLOGY

**ABSTRACT:** Due to the demand for stronger pavements that meet the increasing volume and traffic load requirements, new materials have been researched to find ways to improve their mechanical performance. On the other hand, there is a great environmental concern about the disposal of plastic waste that accumulates in dumps and landfills, which negatively impacts the environment. For this reason, this research investigates the mechanical behavior of different PET polymer modified asphalt mixtures, using the new MeDiNa design method, as a tool to evaluate the fatigue performance of pavements. The results showed that the incorporation of PET increased the service life of the pavement by up to 2.77 times, allowing a reduction of 11.5 cm in the thickness of the asphalt surface layer. Thus, this investigation aims to contribute to the improvement of the mechanical performance of pavements and to promote the recycling of PET waste.

**KEYWORDS:** Pavement design, mechanistic-empirical analysis, waste Polyethylene Terephthalate.

### INTRODUÇÃO

Segundo a Organização das Nações Unidas para o Meio Ambiente, o mundo produz cerca de 300 milhões de toneladas de resíduos plásticos anualmente, porém apenas 14% são recolhidos para reciclagem e 9% são reciclados (Silva et al., 2021). Uma das formas de permitir a maior reintegração desses resíduos é através da sua inclusão como material alternativo no setor da construção civil e da pavimentação. Estes setores são responsáveis pelo consumo de grande quantidade de recursos naturais e pela geração de resíduos sólidos, o que justifica o interesse dos pesquisadores em buscar materiais alternativos, assim como reaproveitar resíduos para a construção.

Dentre os principais resíduos plásticos gerados mundialmente, esta pesquisa avalia o Polietileno Tereftalato (PET), um polímero muito utilizado na fabricação de garrafas de bebidas, devido à segurança e eficiência que o material oferece. Esse plástico é considerado uma das principais invenções industriais, devido às propriedades de leveza, alta resistência, flexibilidade na transformação em diferentes formas, resistência à ação de bactérias, baixo custo e alta durabilidade (Bajracharya et al., 2014).

O uso de resíduos reciclados, como borracha de pneu triturado, na modificação de ligantes asfálticos é uma prática comumente empregada na pavimentação (Bernucci et al., 2022), porém a incorporação de resíduos PET em misturas asfálticas ainda não foi muito estudada e pode ser promissora, uma vez que são materiais inertes, resistentes, possuem boa estabilidade química e característica termoplástica compatível com o ligante asfáltico, permitindo então ser aquecido e resfriado (Silva et al., 2021).

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento mecânico de diferentes misturas asfálticas modificadas por resíduos poliméricos PET. É realizada uma simulação do desempenho desses pavimentos por meio da nova metodologia MeDiNa, com o intuito de prever os danos por fadiga ao longo do seu tempo de vida útil. Dessa forma, este estudo busca contribuir para melhorar a performance de pavimentos asfálticos e, simultaneamente, mitigar os impactos ambientais causados pela disposição final inadequada dos resíduos plásticos.

## MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica realizada a partir do banco de dados de publicações acadêmicas da Scopus, de forma a selecionar os principais estudos existentes na literatura, que investigaram a adição de PET em misturas asfálticas usinadas à quente (CBUQ), com base em ensaios de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral.
- Adoção dos parâmetros de deformabilidade de diferentes misturas, relatados em estudos consagrados da literatura, para variados tipos de ligantes asfálticos e diferentes teores, granulometrias e métodos de incorporação de PET. O módulo de resiliência e o modelo de fadiga desses materiais foram, então, utilizados como dados de entrada no software MeDiNa.
- Comparação das misturas, por meio da simulação da vida útil à fadiga pelo software MeDiNa, considerando a estrutura hipotética de pavimento indicada na Figura 1, substituindo apenas o material do revestimento em cada caso. Os materiais selecionados para a composição das demais camadas do pavimento são tradicionalmente adotados em pavimentos e seus parâmetros de resistência tiveram como referência os valores mencionados por Balbo et al. (2007) e Bernucci et al. (2022).
- Determinação da espessura da camada de revestimento necessária para cada tipo de mistura, por meio do método de dimensionamento MeDiNa, considerando um período de vida útil do projeto de 10 anos para um tráfego pesado com  $N = 2 \times 10^7$ , numa via classificada em Sistema Arterial Primário, onde adota-se o nível de confiabilidade de 85% e o limite da área trincada de 30%.

Figura 1: Estrutura do pavimento utilizado na simulação do software MeDiNa



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao efetuar uma busca na base de dados de publicações acadêmicas da Scopus, utilizando o argumento booleano de pesquisa ((HMA OR "hot mix asphalt" OR "asphalt mix" OR "asphalt mixtures") AND (PET OR "Polyethylene Terephthalate")), foram encontrados apenas 107 artigos relacionados, dos quais 101 foram publicados a partir de 2014. Isso indica que a pavimentação asfáltica com a utilização de PET é um assunto pouco pesquisado e relativamente novo.

A maioria destes estudos, no entanto, realizou apenas ensaios convencionais para análise de misturas, tais como: resistência à tração, estabilidade e fluência Marshall. Somente os estudos de Arao et al. (2016), Moghaddam et al. (2012), Rahman e Omardin (2016) e Silva et al. (2018) determinaram o módulo de resiliência e o modelo de previsão da vida de fadiga, que são os dois principais parâmetros de entrada necessários para o dimensionamento de pavimentos a partir do software MeDiNa. O resumo dos resultados obtidos por esses autores é apresentado na Tabela 1.

No estudo de Arao et al. (2016), foi analisada a adição de flakes de PET nos diâmetros 2 mm e 10 mm e nos teores de 0,5% e 1,0%, em relação ao peso total da mistura, utilizando o ligante CAP 30/45. Testaram também a adição de 2,5% de PET em pó. A incorporação desse polímero nas misturas foi realizada pelo método seco, ou seja, substituindo parte dos agregados. A composição granulométrica adotada enquadrou-se na Faixa C do DNIT 031/2006.

Moghaddam et al. (2012) analisaram a incorporação de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1% de PET (por peso de agregado) com tamanho máximo de 2,36 mm. O PET também foi testado pelo método seco, porém em misturas com faixa granulométrica aberta, do tipo *Stone Matrix Asphalt* e utilizando CAP 80/100.

Silva et al. (2018) testaram a adição de PET por meio de outro método: pelo processo úmido, no qual é misturado no estado líquido ao betume, criando um ligante modificado. Avaliaram nas quantidades 4%, 5% e 6% por peso de ligante, misturando por meio de 60 rpm à 165°C por 2 h ao ligante CAP FLEX 50/70. A composição granulométrica utilizada se enquadrou na Faixa B do DNIT.

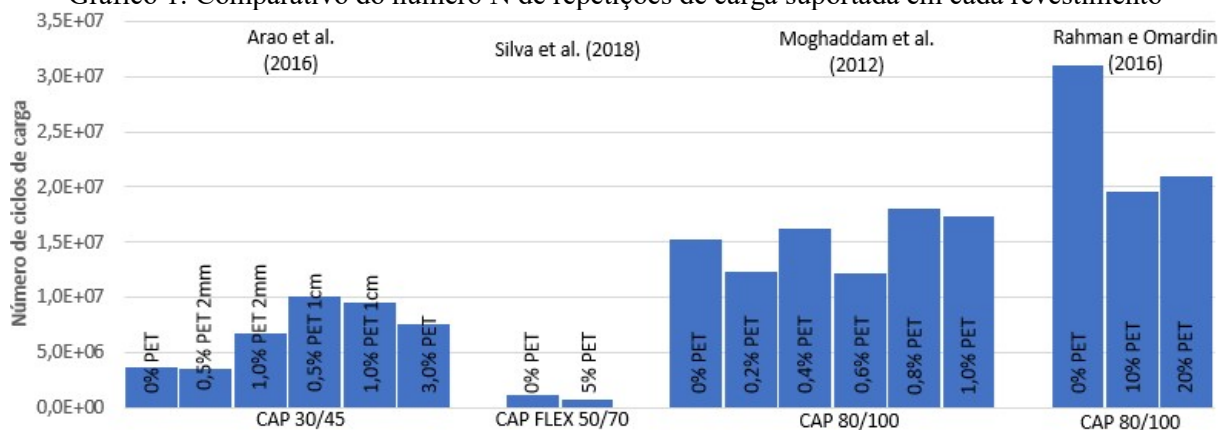
Rahman e Omardin (2016) investigaram a viabilidade do PET peletizado, com diâmetro 2 cm, substituindo 5%, 10%, 15%, 20% e 25% do agregado miúdo contido entre as peneiras 1,18 e 3,36 mm. A mistura asfáltica empregou CAP 80/100 e composição granulométrica contida na Faixa 14 do PWD (2008) da Malásia.

Tabela 1: Referências bibliográficas do uso de PET em misturas asfálticas

Referências	Descrição da Mistura	Teor de ligante	Módulo Resiliente	Modelo de Fadiga
Arao et al. (2016)	CAP 30/45 - Faixa C DNIT	5,50%	6278	$N = 8 \times 10^{-11} \cdot (1/\epsilon)^{3,112}$
	CAP 30/45 - 0,5% PET 2mm - Faixa C DNIT	5,50%	7251	$N = 4 \times 10^{-11} \cdot (1/\epsilon)^{3,142}$
	CAP 30/45 - 1,0% PET 2mm - Faixa C DNIT	5,40%	5160	$N = 2 \times 10^{-7} \cdot (1/\epsilon)^{2,408}$
	CAP 30/45 - 0,5% PET 1cm - Faixa C DNIT	5,50%	5466	$N = 5 \times 10^{-7} \cdot (1/\epsilon)^{2,413}$
	CAP 30/45 - 1,0% PET 1cm - Faixa C DNIT	5,40%	5624	$N = 5 \times 10^{-6} \cdot (1/\epsilon)^{2,121}$
	CAP 30/45 - 0,5% PET 1cm e 2,5% PET em pó - Faixa C DNIT	5,50%	6289	$N = 7 \times 10^{-9} \cdot (1/\epsilon)^{2,803}$
Silva et al. (2018)	CAP 50/70 - Faixa B DNIT	4,25%	8158	$N = 2 \times 10^{-14} \cdot (1/\epsilon)^{3,664}$
	CAP FLEX 50/70 modif. por 5% PET em pó - Faixa B DNIT	4,0%	14216	$N = 2 \times 10^{-18} \cdot (1/\epsilon)^{4,413}$
Moghaddam et al. (2012)	CAP 80/100 - SMA	6,77%	3983	$N = 4,68 \times 10^{-13} \cdot (1/\epsilon)^{4,251}$
	CAP 80/100 - 0,2% PET <2,36mm - SMA	6,45%	4157	$N = 1,62 \times 10^{-14} \cdot (1/\epsilon)^{4,624}$
	CAP 80/100 - 0,4% PET <2,36mm - SMA	6,43%	4027	$N = 1,4 \times 10^{-15} \cdot (1/\epsilon)^{4,968}$
	CAP 80/100 - 0,6% PET <2,36mm - SMA	6,29%	3980	$N = 1,64 \times 10^{-16} \cdot (1/\epsilon)^{5,197}$
	CAP 80/100 - 0,8% PET <2,36mm - SMA	6,36%	3973	$N = 3,48 \times 10^{-16} \cdot (1/\epsilon)^{5,156}$
	CAP 80/100 - 1% PET <2,36mm - SMA	6,51%	3727	$N = 3,3 \times 10^{-18} \cdot (1/\epsilon)^{5,747}$
Rahman e Omardin (2016)	CAP 80/100 - Faixa AC 14 PWD	5,50%	3200	$N = 1,19 \times 10^{-7} \cdot (1/\epsilon)^{2,857}$
	CAP 80/100 - 10% PET 2cm - Faixa AC 14 PWD	5,50%	2100	$N = 4,8 \times 10^{-23} \cdot (1/\epsilon)^{7,407}$
	CAP 80/100 - 20% PET 2cm - Faixa AC 14 PWD	5,50%	1800	$N = 9,36 \times 10^{-11} \cdot (1/\epsilon)^{3,831}$

A partir dos parâmetros de módulo de resiliência e fadiga das misturas elaboradas por estes autores, foi realizada uma simulação pelo software MeDiNa do número N de eixo-padrão rodoviário que a mistura asfáltica pode suportar. O Gráfico 1 apresenta os resultados obtidos.

Gráfico 1: Comparativo do número N de repetições de carga suportada em cada revestimento



Pode-se observar que as misturas produzidas por Rahman e Omardin (2016) apresentaram maior vida de fadiga, seguidas pelas misturas elaboradas por Moghaddam et al. (2012), Arao et al. (2016) e Silva et al. (2018). Isso pode ser explicado devido ao tipo de CAP utilizado por cada estudo, mostrando exercer maior influência que o teor, granulometria e método de mistura do PET. Segundo o NCHRP (2011), o emprego de ligantes menos consistente, isto é, com menor dureza e rigidez, aumenta a resistência à fadiga do revestimento, o que foi verificado comparando estes estudos.

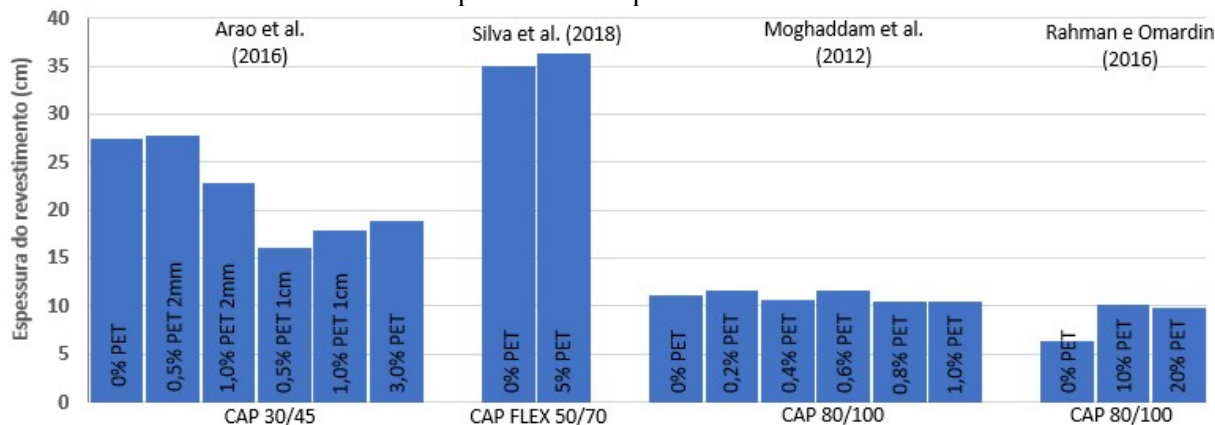
Nas misturas de Rahman e Omardin (2016), a adição PET em altas proporções reduziu significativamente a vida de fadiga do revestimento. Enquanto a mistura sem polímero pode suportar um volume de tráfego de  $N = 3,1 \times 10^7$ , as misturas com 10% e 20% de PET podem resistir cerca de  $2 \times 10^7$  repetições de eixo padrão rodoviário, o que indica uma redução de 35% do desempenho.

No entanto, quando o PET é aplicado em baixos teores, pode melhorar consideravelmente o desempenho do revestimento. Isso pode ser verificado nos estudos de Arao et al. (2016), em que a adição de 0,5% e 1% de PET em misturas com CAP mais rígido levou à uma melhora de 177% da resistência à fadiga, aumentando de cerca de  $3,6 \times 10^6$  para  $1 \times 10^7$  ciclos de carregamento. Nos estudos de Moghaddam et al. (2012), também houve um acréscimo da resistência, porém ocorreu de forma menos significativa, possivelmente pelo fato de empregar um ligante menos rígido.

Além disso, pode-se verificar que a incorporação do PET pelo processo úmido, conforme realizado por Silva et al. (2018) não resultou no aumento da vida útil. Isso talvez ocorreu devido ao emprego do CAP FLEX 50/70 modificado, resultando em uma mistura com alto módulo de resiliência. Além disso, o teor ótimo de ligante adotado nesta mistura foi menor quando comparado aos outros estudos, o que também pode ter influenciado. Segundo o NCHRP (2011), o emprego de baixos teores de ligante torna a mistura mais rígida, o que reduz a sua resistência à fadiga.

O Gráfico 2 apresenta, para cada tipo de mistura, os resultados do dimensionamento da camada de revestimento pelo software MeDiNa considerando a mesma estrutura hipotética da Figura 1 e um tráfego pesado equivalente à  $N = 2 \times 10^7$ .

Gráfico 2: Comparativo das espessuras dos revestimentos



A análise mecânica pelo software MeDiNa mostrou que para um tráfego pesado estimado para um período de projeto de  $2 \times 10^7$  repetições de eixo padrão rodoviário e considerando os valores adotados para a estrutura do pavimento desta pesquisa, seria necessária uma espessura de revestimento entre 10 e 12 cm para as misturas com PET produzidas por Moghaddam et al. (2012) e Rahman e Omardin (2016). Por outro lado, para as misturas elaboradas por Silva et al. (2018), obteve-se valores de espessuras inviáveis, com cerca de 35 cm. Pode-se verificar também que para as misturas realizadas por Arao et al. (2016), adicionando 0,5% e 1% de PET com granulometria de 1 cm, houve uma redução considerável da espessura necessária para a camada de revestimento, de 27,5 cm para 16 cm.

## CONCLUSÃO

Conclui-se que adição de baixos teores de PET pelo método seco em misturas que empregam ligantes mais rígidos, como o CAP 30/45, pode contribuir significativamente para o aumento do desempenho à fadiga do revestimento e para uma possível redução da espessura desta camada. No entanto, quando empregados em misturas com ligante do tipo 80/100 mostrou-se pouco efetivo.

Observou-se que a maior parte das pesquisas sobre misturas asfálticas com PET presentes no banco de dados da Scopus não as analisa por meio do ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, adotado pelo método MeDiNa. Além disso, identificou-se que a literatura carece de pesquisas avaliando a incorporação de variados teores de PET pelo método úmido.

Tendo em vista os elevados custos de implantação de obras de infraestrutura rodoviária, o meio técnico-científico vem buscando alternativas para baratear a construção e a manutenção de rodovias com maior qualidade e durabilidade. Concomitantemente, a geração de elevados volumes de resíduos plásticos e o resultante impacto ambiental negativo fomentam o desenvolvimento de pesquisas à procura de possíveis soluções para uma adequada destinação destes resíduos.

Neste cenário, a pesquisa de novos materiais que possibilitam um melhor desempenho de pavimentos, o reaproveitamento de resíduos, a racionalização dos procedimentos de dimensionamento do pavimento, a disseminação do conhecimento e, conseqüentemente, a formação de um meio técnico de alto nível são elementos fundamentais para o sistema construtivo de infraestrutura rodoviária.

## REFERÊNCIAS

- Arao, M.; Casagrande, M. D. T.; Guimarães, A. C. R. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de polietileno tereftalato (pet) triturado. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, PUC. Rio de Janeiro, 2016.
- Bajracharya, R. M.; Manalo, A. C.; Karunasena, W.; LAU, K. tak. An overview of mechanical properties and durability of glass-fibre reinforced recycled mixed plastic waste composites. *Materials Design (1980-2015)*, v. 62, p. 98–112, 2014.
- Balbo, T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. [S.l.: s.n.], 2007. JT Balbo. Oficina de Textos, 463p, São Paulo, 2007.
- Bernucci, I. L. B.; Motta, I. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ª Edição. Petrobrás, ABEDA. Rio de Janeiro, 2022.
- Moghaddam, B.; Karim, M. R.; Syammaun, T. Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles. *Construction and Building Materials*, v. 34, p. 236–242, 2012.
- NCHRP. A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary. (NCHRP Report 673). National Cooperative Highway Research Program. Washington, D.C.: 2011.
- Public Work Department. 2008. Standard Specification For Road Works. Primeira edição, JKR/SPJ/2008-S4. PWD. Malásia, 2008.
- Rahman, W.; Omardin, M. Characterisation of recycled polyethylene terephthalate as partial fine aggregate replacement properties and behavior of asphalt mixtures for road pavements. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 11, n. 6, p. 3755 – 3758, 2016.
- Silva, J.; Rodrigues, J. K. G.; Carvalho, M. W.; Lucena, L. C. F. L.; Cavalcante, E. H. Mechanical performance of asphalt mixtures using polymer-micronized pet-modified binder. *Road Materials and Pavement Design*, Taylor Francis, v. 19, n. 4, p. 1001–1009, 2018.
- Silva, T. R.; Azevedo, A. R. G.; Cecchin, D.; Marvila, M. T.; Amran, M.; Fediuk, R.; Vatin, N.; Karelina, M.; Klyuev, S.; Szelag, M. Application of plastic wastes in construction materials: A review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives. *Materials*, v. 14, n. 13, 2021.