

AVALIAÇÃO DO USO DE GARRAFAS PET COMO AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS

EVALUATION OF THE USE OF PET BOTTLES AS AGGREGATE FOR ROAD SURFACE TREATMENT

Andressa Beatriz Almeida dos Santos¹

Andressa.beatriz1_@hotmail.com

RESUMO

O Tratamento Superficial (TS) é um tipo de revestimento flexível executado a partir da aplicação em campo de uma ou mais camadas consecutivas de ligante asfáltico e agregados compactados. O TS costuma ser utilizado em rodovias de baixo volume de tráfego e uma das principais questões desse revestimento é que ele tem perda significativa de agregados no início de sua vida útil. No entanto, o volume de agregados utilizado no TS é elevado, estimulando esforços contínuos para encontrar alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, o Polietileno Tereftalato (PET) é o tipo de plástico mais reciclado em todo o país, e pode ser reaproveitado em diversas indústrias, incluindo a pavimentação. Nessa perspectiva, esse trabalho tem como principal objetivo verificar a viabilidade da incorporação do PET, como agregado alternativo, no TS. Para isso, foram preparadas em laboratório amostras de TS com 0%, 3%, 5% e 7% de PET em relação ao peso de agregados. O desempenho do TS foi avaliado através do ensaio de desgaste por abrasão úmida (do inglês WTAT) e mancha de areia. Os resultados mostram que a cidade de Caraúbas/RN gera grande quantidade de resíduos que podem ser reutilizados, porém não foram observados bons resultados quando comparado com o TS com e sem o agregado alternativo, visto que a amostra com 0% de PET apresentou um desgaste de 4,79%, enquanto que as amostras com PET apresentaram valores de desgaste da ordem 17,86%, representando um aumento significativo. Por fim, foram apresentadas algumas estratégias para melhorar o desempenho do TS com agregado PET.

Palavras-chave: Tratamento Superficial Duplo; sustentável; PET; asfalto; revestimento.

ABSTRACT

Surface Treatment (ST) is a type of flexible surfacing that is carried out by applying one or more consecutive layers of asphalt binder and compacted aggregates in the field. ST is usually used on roads with low traffic volumes and one of the main issues with this surfacing is that it has a significant loss of aggregates at the start of its useful life. However, the volume of aggregates used in TS is high, stimulating ongoing efforts to find more sustainable alternatives. In this context, Polyethylene Terephthalate (PET) is the most recycled type of plastic in the country and can be reused in various industries, including paving. With this in mind, the main objective of this work is to verify the feasibility of incorporating PET as an alternative aggregate into TS. To this end, samples of TS with 0%, 3%, 5% and 7% PET in relation to the weight of aggregates were prepared in the laboratory. The performance of the TS was assessed using the wet abrasion wear test (WTAT) and sand staining. The results show that the city of Caraúbas/RN generates a large amount of waste that can be reused, but good results were not observed when comparing the TS with and without the alternative aggregate, since the sample with 0% PET showed wear of 4.79%, while the samples with PET showed wear values of around 17.86%, representing a significant increase. Finally, some strategies for improving the performance of TS with PET aggregate were presented.

Keywords: Double Surface Treatment; sustainable; PET; asphalt; surfacing.

1 INTRODUÇÃO

O modo rodoviário é o principal meio de transporte do Brasil, sua flexibilidade possibilita o deslocamento de pessoas, objetos e cargas variadas, em quantidade significativa e velocidade relativamente boa (COLAVITE; KANISHE, 2015). Dentre os componentes do sistema rodoviário, o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas, construída para suportar os esforços oriundos do tráfego de veículos e das intempéries. Os pavimentos flexíveis, são compostos por camadas de materiais granulares (reforço de subleito, sub-base, base) e revestimento asfáltico, que desempenham um papel crucial na construção de rodovias, proporcionando uma superfície durável e adaptável ao tráfego. (MOTTA *et al*, 2022)

O revestimento asfáltico em geral visa garantir a segurança e o conforto do usuário, proteger as camadas inferiores dos agentes naturais, transmitir uniformemente as ações do tráfego sobre elas. Entre os tipos de revestimento utilizados em pavimentos asfálticos, pode-se dividir, naqueles usinados, isto é, preparados em usinas de asfalto e que costumam ser utilizados em vias de elevado volume de tráfego, um exemplo é o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ); e aqueles produzidos em campo, a exemplo do Tratamento Superficial (TS), o mais utilizado em vias de baixo volume de tráfego. (PEREIRA, 2013)

O TS é executado a partir da aplicação de uma ou mais camadas de ligante asfáltico (geralmente utiliza-se emulsão asfáltica) e agregados compactados. A adesão entre os agregados e a emulsão asfáltica é fundamental para garantir a qualidade do revestimento, porém com os efeitos do tráfego, da ação climática e do envelhecimento; o deslocamento dos materiais durante a vida útil é inevitável fazendo com que surjam novas panelas e fissuras (MOTTA *et al*, 2008).

A vista disso, o uso de recursos naturais como pedras, areias, cascalhos e petróleo é expressivamente elevado na construção de estradas e rodovias, estimulando esforços contínuos para encontrar alternativas mais sustentáveis, como o uso de materiais reciclados. Com isso, a aplicabilidade desses resíduos reciclados faz-se necessária para evitar o esgotamento dos aterros sanitários e principalmente para reduzir o uso de recursos naturais. Por esse motivo, a inclusão de materiais alternativos na pavimentação vem sendo objeto de estudo. Pesquisadores como Santos *et al* (2013) avaliaram o uso da borracha de pneus inservíveis como agregado no CBUQ, Sousa (2021) avaliou o uso de resíduos sólidos nas camadas granulares do pavimento, ambos aplicados em misturas asfálticas usinadas para alto volume de tráfego, tendo como objetivo comum melhorar as características mecânicas do revestimento, os tornando mais duradouros e sustentáveis.

Nesse contexto, o Polietileno Tereftalato (PET), é um dos resíduos mais gerados pelos brasileiros, com 23,5 toneladas coletadas no ano de 2019, sendo o tipo de plástico mais reciclado em todo o país (ABRELPE, 2021). Por conta da versatilidade na aplicação, o material PET está sendo explorado de diversas maneiras na construção civil, tais como na composição de blocos de concreto (CÂNDIDO *et al*, 2014), como agregado miúdo em argamassas (CANELLAS; D'ABREU, 2005), como agregado em misturas asfálticas a quente (COELHO *et al*, 2018) e como modificador de ligante asfáltico (TAVARES, 2018), por exemplo. A maioria dos trabalhos voltados a pavimentação investigam o uso do PET em revestimentos com misturas usinadas, porém ainda é restrito os estudos referentes a utilização desse material em misturas preparadas em campo, como o TS.

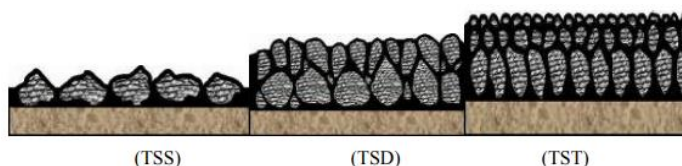
Dessa forma, a aplicação de garrafas PETs fragmentadas, como agregado alternativo, no TS pode ser uma forma de reutilização desse material que evite o descarte inadequado. Além disso, o material PET pode melhorar a adesão agregado-ligante, aumentando a vida útil do TS. Devido à grande demanda de resíduos sólidos provenientes de garrafas PET gerado pelo município de Caraúbas-RN, esse trabalho tem como principal objetivo verificar a viabilidade

da incorporação do PET como agregado no TS, assim como sua produção em escala, visto que a maior parte das rodovias da região são de baixo volume de tráfego.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O TS é o tipo de revestimento asfáltico mais utilizado em vias projetadas para baixo volume de tráfego. O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) classifica e determina a sistemática da execução do TS como: Tratamento Superficial Simples (TSS) - DNIT 146/2012, Tratamento Superficial Duplo (TSD) - DNIT 147/2012 e Tratamento Superficial Triplo (TST) - DNIT 148/2012. Essa divisão refere-se ao número de aplicações de camadas de ligante asfáltico e agregados. A Figura 01 mostra uma ilustração dos três tipos de TS.

Figura 01 – Tipos de Tratamento Superficial.



Fonte: Loiola, 2009.

O TSS é a camada do revestimento que recebe apenas uma aplicação de ligante e agregado, no TSD e no TST as camadas de agregados são de granulometrias distintas permitindo uma sinergia entre as mesmas uma vez que os agregados menores preenchem os espaços entre os agregados maiores. Portanto, a camada de agregado mais fino na superfície proporciona uma base sólida para a camada de agregado médio e a camada de agregado graúdo. A textura gerada pela última camada ajuda a reforçar a aderência e a proteção do pavimento otimizando o desempenho global do TS, prolongando a vida útil e garantindo a segurança dos usuários (PEREIRA, 2013).

No geral, o TS quando comparado com o CBUQ é frequentemente mais econômico, possui alta resistência ao desgaste e sua aplicação é relativamente rápida e isso reduz o tempo de interrupção do tráfego e minimiza os impactos para os usuários da estrada (SILVA; ROMEIRO, 2017).

No entanto, um dos principais defeitos desse revestimento se deve a sua perda de agregados, que no início de sua vida útil, pode ser devido a ligação agregado-emulsão não ser forte o suficiente para resistir aos esforços do tráfego e/ou pode também estar atrelada a fatores característicos dos materiais que afetam essa particularidade como: porosidade, capacidade de absorção, forma e textura do agregado e tipo de emulsão. Essa falta de adesão agregado-emulsão ao longo de sua vida útil, pode se dar também devido a ações climáticas, quantidades inadequadas de agregados e ligante, ruptura precoce da emulsão devido a coordenação imprópria de equipamentos na execução em campo, entre outros (Silva *et al*, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com área de aproximadamente 1.096 km², o município de Caraúbas, está localizado na microrregião da Chapada do Apodi, no Rio Grande do Norte (RN) e possui atualmente cerca de 19.577 habitantes (IBGE, 2022). O tráfego na região é normalmente baixo como indica SILVA (2022), o que justifica avaliar o uso de revestimentos com melhor custo benefício, como é o caso do TS.

3.1 Materiais

A cidade conta com o apoio da Associação Caraubense de Reciclagem Serviços e Educação Ambiental (ACRESEA) para promover a participação da população na coleta e reciclagem dos resíduos sólidos gerados, além de oferecer educação ambiental e possibilitar a geração de renda através da coleta. Os últimos registros fornecidos pela ACRESEA, referentes a coleta de PET no primeiro semestre de 2023, apontam uma média mensal de aproximadamente 3.466 Kg desse material. Esse número implica em mais de 40 toneladas de resíduos sólidos somente do tipo PET, gerados anualmente na cidade de Caraúbas.

O material que chega nas instalações da coletora é separado por cor e tipo, alguns são prensados e destinados as indústrias para a logística reversa e outros são beneficiados e transformados em vassouras pela própria empresa. Para o estudo em questão será utilizado o PET cortado manualmente em pequenas partículas com auxílio de uma tesoura, com dimensões médias de até 2cm de comprimento e 0,15cm de largura. Na Figura 02 é possível observar todos os processos citados.

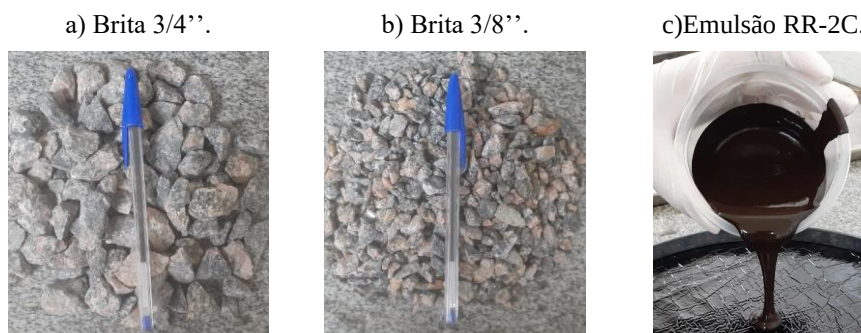
Figura 02 – Processos logísticos da ACRESEA.



Fonte: Autor, 2023.

Os agregados minerais foram coletados na Pedreira Potiguar, situada nas proximidades do município, os materiais fornecidos são de tamanhos e propriedades diferentes. Como agregados foram utilizados a brita 3/4" (19mm) e a brita 3/8" (9,5mm). O ligante asfáltico utilizado nesse trabalho foi a Emulsão Asfáltica Catiônica de Ruptura Rápida (RR-2C) na qual a fase asfáltica é dispersa na fase aquosa, ou vice-versa, cujas partículas possuem carga positiva (DNER-EM 369, 1997), esse material foi fornecido pela empresa Asfalto Construções e Serviços LTDA. A Figura 03 ilustra os materiais mencionados.

Figura 03 – Materiais.



Fonte: Autor, 2023.

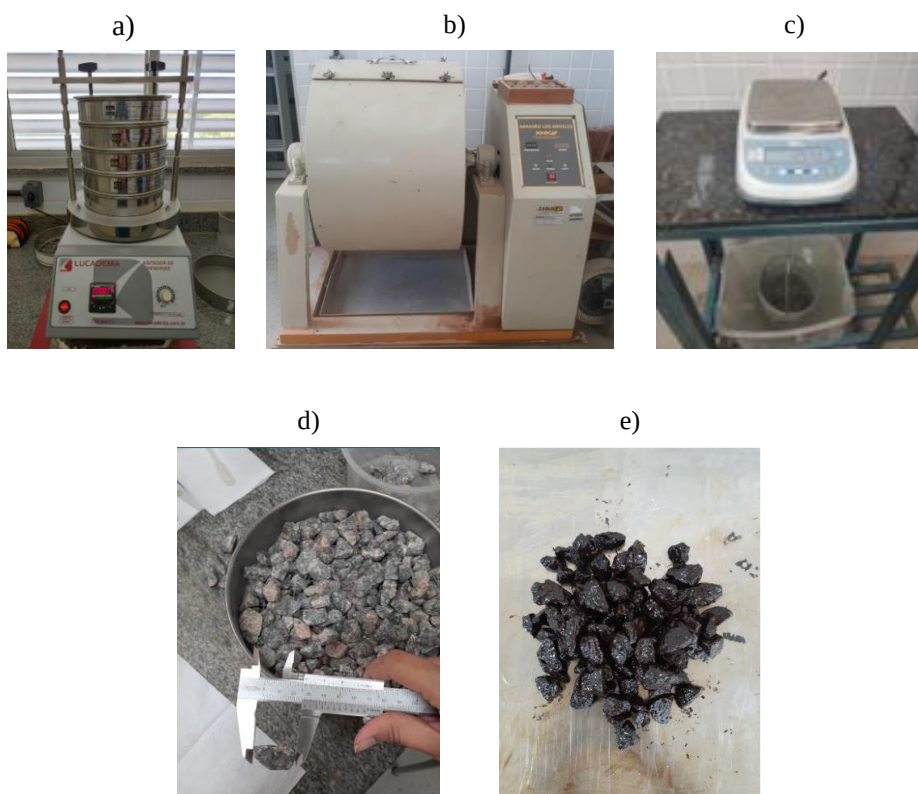
3.2 Métodos

Os ensaios foram realizados todos no laboratório da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus Caraúbas, exceto o de desgaste a abrasão úmida, este foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC), localizado em Fortaleza/CE.

3.2.1 Caracterização dos Agregados

A granulometria dos agregados foi analisada com base na norma DNER-ME 083/98, que estabelece a análise granulométrica através do ensaio de peneiramento. Para cada um dos agregados foram feitas duas amostras, que foram secas em estufa e em seguida mantidas à temperatura ambiente, para então serem peneiradas. A Figura 4a ilustra as peneiras e o peneirador mecânico usado. A resistência ao desgaste das britas 3/4" e 3/8" foi avaliada a partir do ensaio de Abrasão "Los Angeles" como recomendado pela norma DNER – ME 035/98. A Figura 4b mostra o equipamento usado para realização desse ensaio. O ensaio de absorção e densidade foi realizado conforme a norma DNIT 413/2019 – ME, que prescreve o processo para determinação de massa específica, densidade e absorção de agregados graúdos para misturas asfálticas, a Figura 4c mostra um dos processos desse ensaio.

Figura 04 – Aparelhagem usada nos ensaios.



Fonte: Autor, 2023.

Por fim, foram realizados os ensaios de índice de forma (ABNT NBR 6954/89) representado na Figura 4d e adesividade ao ligante (DNER-ME 078/94) ilustrado na Figura 4e. A partir desses ensaios é possível avaliar visualmente a capacidade que o agregado tem de ser aderido pelo material betuminoso e a forma das partículas.

3.2.2 Determinação da Taxa de Agregado e da Taxa de Ligante Asfáltico

Optou-se por avaliar um TSD utilizando a brita 3/4” (como primeira camada) e a brita 3/8” (como segunda camada). Para determinação das taxas de ligante e agregado existem diversos métodos com técnicas diferentes, o método de Hanson que é calculado em função do tamanho médio dos agregados; o método Califórnia que considera o tamanho máximo efetivo dos agregados, entre outros. No entanto foi utilizado o método do Mosaico, que segundo Loiola (2009) é o método que melhor representa a dinâmica de execução em campo. Consiste em espalhar os agregados em uma placa ou bandeja de área conhecida (44cm x 30cm x 6cm) de modo a cobrir toda a superfície sem que fique com falhas ou sobreposições, como mostra a Figura 05.

Figura 05 - Execução do método do Mosaico.



Fonte: Autor, 2023.

Com isso, calculou-se a taxa de agregado gráúdo (T_g) pela Equação (1). Onde: P_t é peso da bandeja com o agregado (kg); P_p é peso da bandeja (kg); e A é área da bandeja (m^2)(DNIT 147/2012-ES).

$$T_g = (P_t - P_p) / A \quad (1)$$

A taxa de emulsão foi calculada de acordo com Loiola (2009) a partir da Equação (2), onde: $T(RR-2C)$ é a taxa da emulsão asfáltica catiônica RR-2C(L/ m^2); $TCAP$ é taxa do CAP(L/ m^2); Tag é taxa do agregado.

$$T(RR - 2C) = 0,112 * Tag \quad (2)$$

3.2.3 Resistência ao Desgaste

O ensaio *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) foi realizado conforme a norma ABNT NBR 14746. A norma define como avaliar a resistência ao desgaste de TS em condições de tráfego simuladas através de um ensaio de abrasão úmida, e também fornece diretrizes para determinar a proporção ideal de emulsão para diferentes misturas de agregados e aditivos, cujo desgaste é calculado de acordo com a Equação (3). Onde: A é abrasão ao desgaste úmido; P_1 é a massa inicial do revestimento e P_2 a massa final pós-ensaio.

$$A = ((P_1 - P_2) / P_1) * 100 \quad (3)$$

Apresenta-se a seguir os processos utilizados para realização do ensaio WTAT, utilizando como referência os trabalhos de Loiola (2009) e Araújo (2019): a) colocou-se sobre uma placa circular metálica uma manta asfáltica e um molde de ferro com diâmetro de 28cm e espessura de 1cm, esse conjunto foi pesado utilizando uma balança de precisão (Figura 6a); b) aplicou-se as taxas de agregados e de emulsão referente ao número de camadas (Figuras 6b e 6c); c) compactação feita com o auxílio de um cilindro de concreto (Figura 6d); d) em seguida

o conjunto foi colocado na estufa a 60°C por 24h para que toda a água presente na emulsão evapore, acelerando seu processo de cura (Figura 6e); e) o revestimento foi removido da estufa e permaneceu em temperatura ambiente por 1h; f) fez-se a pesagem do revestimento seco antes de ser submetido aos ensaios; g) cobriu-se completamente a amostra com água durante 10min (Figura 6f) e h) a amostra foi então submetida ao ensaio de WTAT (Figura 6g); i) lavou-se o revestimento pós-ensaio, foi colocado na estufa por 2h a 60°C e pesado novamente para calcular o desgaste. A Figura 6h mostra o revestimento após o ensaio.

Figura 06 – Procedimentos para realização dos ensaio WTAT.



Fonte: Autor, 2023.

Para comparação dos dados, foram feitas 4 amostras, uma com o TSD convencional (0% de PET), e as outras 3 substituindo uma pequena parcela de brita 3/8” por porcentagens diferentes de PET, respectivamente 3%, 5% e 7%. Esse percentual de PET foi aplicado entre a segunda camada de emulsão e a segunda camada de agregado.

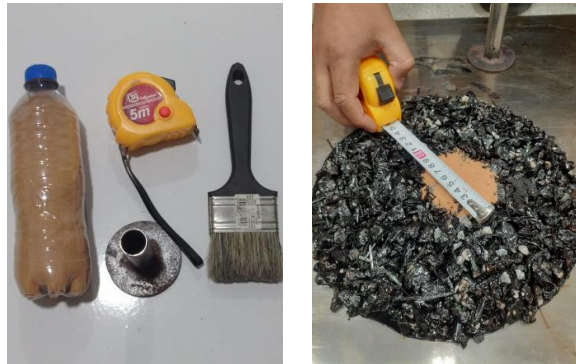
3.2.4 Macrotextura do Revestimento

Realizou-se também o ensaio da mancha de areia com base na ASTM - E-965-96 (1998), que avalia a textura superficial do revestimento que está diretamente ligado às condições de drenagem (ZENKNER; NATANAEL; SILVA JUNIOR, 2018) a partir da Equação (4):

$$HS = (2 * V) / (D^2 * \pi) \quad (4)$$

Onde: HS - Altura média de mancha de areia (mm); V - Volume de areia (25.000mm³); D - Diâmetro médio do círculo de areia (mm). A Figura 07 ilustra o ensaio de mancha de areia.

Figura 07 – Mancha de areia.



Fonte: Autor, 2023.

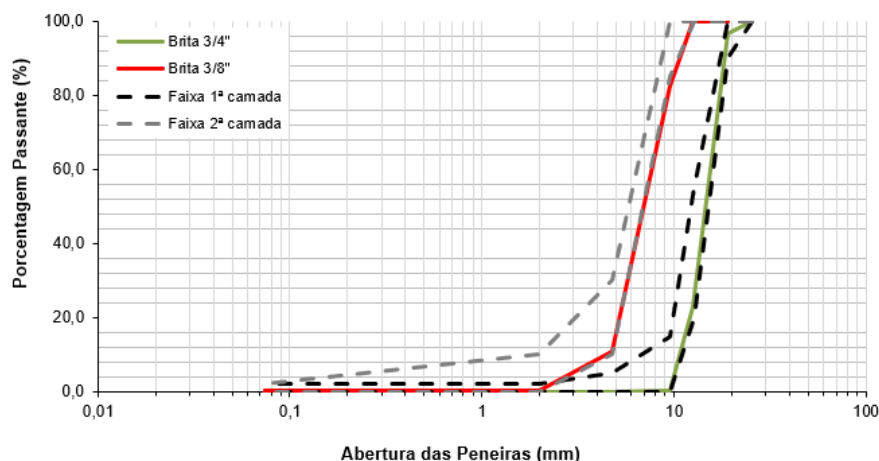
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos Agregados

4.1.1 Análise Granulométrica

A Figura 08 mostra as faixas granulométricas para cada camada do TSD, determinadas pelo DNIT e os resultados referentes aos ensaios de granulometria realizado em cada tipo de agregado. As britas possuem graduação uniforme, o que significa que as partículas que compõem o agregado são distribuídas em uma faixa de tamanhos específica, com limites superior e inferior bem definidos, o que pode afetar em suas propriedades mecânicas. As duas juntas são uma boa combinação para o TSD, usando a brita 3/4" na 1ª camada e a brita 3/8" na 2ª camada.

Figura 08 – Representação dos resultados da granulometria em gráfico.



Fonte: Autor, 2023.

4.1.2 Índice de Forma e Adesividade

Segundo a norma do DNIT 031/2006 que determina especificações de serviço para os pavimentos flexíveis, o valor limite para o índice de forma de agregados graúdos usados em TSD não deve ser inferior a 0,5. A classificação de forma é dada a partir dos valores médio do

comprimento (A), largura (B) e espessura (C) dos agregados, como mostra a Tabela 01. Na Tabela 02 são apresentados os resultados referentes ao formato dos agregados.

Tabela 01 – Classificação de Índice de forma.

Média das relações B/A e C/B	Classificação da forma
$B/A > 0,5$ $C/B > 0,5$	Cúbica
$B/A < 0,5$ $C/B > 0,6$	Alongada
$B/A > 0,5$ $C/B < 0,7$	Lamelar
$B/A < 0,5$ $C/B < 0,8$	Alongada-Lamelar

Fonte: Loiola, (2009).

Tabela 02 – Resultados do índice de forma.

Material	Brita 3/4"
A médio (mm)	25
B médio (mm)	17
C médio (mm)	10
B/A	0,68
C/B	0,59
Classificação	Cúbica

Fonte: Autor, 2023.

Os resultados da adesividade são obtidos visualmente. Na Figura 09, nota-se que os resultados são insatisfatórios á vista que apresentou deslocamento das partículas betuminosas ao término das 72 horas.

Figura 09 – Resultado do ensaio de adesividade.



Fonte: Autor, 2023.

4.1.3 Densidade, Massa Específica e Abrasão Los Angeles.

A Tabela 03 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de densidade, absorção e abrasão feitos no laboratório para os agregados da Pedreira Potiguar (PP), como também os resultados obtidos por Loiola (2009) referentes aos mesmos tipos de agregados predominantes na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) para servir como parâmetro comparativo.

Tabela 03 – Resultados obtidos para os ensaios com as britas 3/4" e 3/8".

Parâmetro	Pedreira Potiguar		Região Metropolitana de Fortaleza	
	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Brita 3/4"	Brita 3/8"
Densidade Relativa Real	2,679	2,679	2,750	2,730
Densidade Relativa Aparente	2,639	2,606	2,681	2,638
Absorção (%)	0,57	1,04	0,93	1,27
Abrasão Los Angeles (%)	24,34	28,62	42,18	22,8

Fonte: Autor, 2023.

Os valores de densidade dos materiais fornecidos pela PP são equivalentes aos da densidade dos mesmos materiais produzidos nas pedreiras da RMF. já com relação a porcentagem de absorção, A Norma Mercosul 53 (2009) que determina especificações de ensaios de densidade e massa específica e absorção, preconiza o valor limite de 2% para absorção em agregados graúdos. Com isso, os dois trabalhos possuem agregados com percentuais de absorção razoável, com maior presença de poros nas britas 3/8" o que pode afetar sua resistência e durabilidade. De acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES, os valores limites para abrasão de um agregado usado em pavimentos flexíveis devem ser igual ou inferior a 50%, á vista disso é notório que os materiais do lote fornecidos pela PP possuem uma melhor resistência ao desgaste quando comparados com os do lote fornecido RMF.

4.2 Avaliação do Desgaste

A partir de amostras experimentais feitas antes dos ensaios, foi possível observar que os agregados eram excessivos com relação a área, nesse caso, apesar de ser o método que mais se assemelha á execução em campo, o autor optou por adotar uma nova taxa de aplicação. Outros autores como Loiola (2009) e Araújo (2019), também fizeram uso de adaptações nas taxas, por considerar as variações ao serem aplicadas em campo por processos mecanizados. A Tabela 04 mostra os resultados das taxas calculadas e adotadas pelo autor. Para comparação foram utilizados resultados obtidos por Araújo (2019) e nota-se que mesmo com redução nas taxas os valores ainda possuem uma divergência notável.

Tabela 04 – Taxas de agregado e emulsão.

Agregado	Araújo (2019)		Taxa Calculada		Taxa Adotada	
	Agregado (Kg/ m ²)	Emulsão RR-2C (L/m ²)	Agregado (Kg/ m ²)	Emulsão RR-2C (L/m ²)	Agregado (Kg/ m ²)	Emulsão RR-2C (L/m ²)
Brita 3/4"	12,6	0,82	21,94	2,46	18	2,02
Brita 3/8"	5,8	1,23	8,85	0,99	7	0,78

Fonte: Autor, 2023.

Optou-se por manter as taxas de aplicação fixas, variando apenas as porcentagens de PET nas amostras, com o objetivo de eliminar essa variável na comparação e assim avaliar a quantidade ótima de PET a ser utilizada. Os resultados do ensaio WTAT realizado nos revestimentos de TSD são apresentados na Tabela 05.

Tabela 05 – Resultados do ensaio WTAT.

Amostras	Conjunto (Kg)	Revestimento + conjunto (Kg)	Revestimento (Kg)	Revestimento depois do ensaio (Kg)	Desgaste a abrasão (%)
7% PET	0,61	2,01	1,4	1,14	18,59
5% PET	0,61	2,23	1,62	1,33	17,92
3% PET	0,61	2,21	1,6	1,32	17,06
0% PET	0,62	2,2	1,57	1,5	4,79

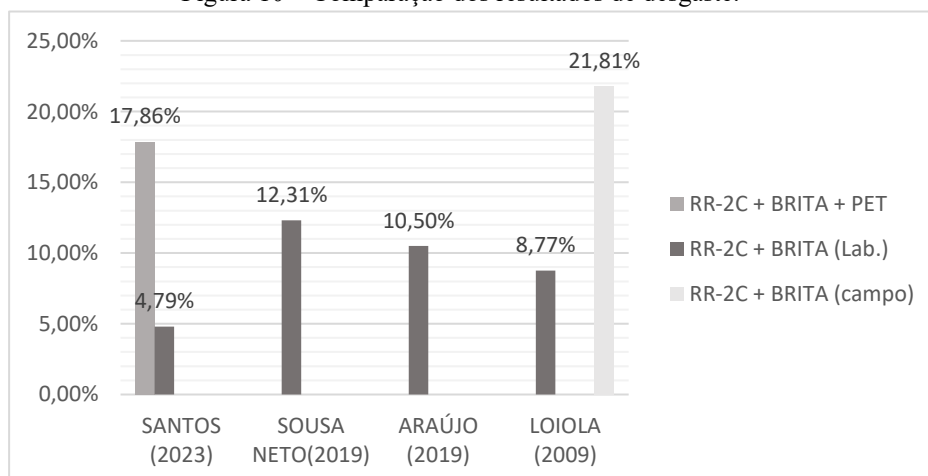
Fonte: Autor, 2023.

À vista dos resultados, é notório que o revestimento que melhor apresentou resultados é o que não possui PET em sua composição, visto que possui um menor desgaste. Entretanto, se observarmos apenas as 3 amostras que contêm PET, há uma crescente melhoria inversamente proporcional ao teor de PET, isto é, o revestimento que possui menor teor do material PET é a que possui a maior resistência a abrasão úmida.

Esperava-se que com o uso do PET no TSD, os resultados de WTAT fossem pelo menos similares aos resultados da amostra sem PET. Como isso não foi observado, acredita-se que esse resultado está diretamente ligado ao tratamento do PET anterior a sua aplicação, como por exemplo: i) o tamanho das partículas do PET pode ter causado uma má adesão com os demais materiais, ou seja, com dimensões menores e mais próximas de um pó, esse material poderia provocar uma melhor ligação entre os agregados e a emulsão, além de preencher os espaços vazios entre as britas e assim melhorar a capacidade de resistência da mistura, além de deixar a superfície com uma melhor textura de rolamento; ii) a temperatura com que esses materiais se encontram também pode ser uma possível causa, visto que na temperatura ambiente o PET não está totalmente amolecido para gerar uma melhor ligação com os agregados minerais e com o ligante asfáltico.

Todavia, foi feita a média do desgaste dos revestimentos que possuíam o PET como agregado e foram comparados com resultados de trabalhos que utilizaram os demais tipos de materiais, que são a brita e a emulsão RR-2C. Dos resultados apresentados na Figura 10, é possível observar que, as amostras que contêm PET possuem valor mais alto de desgaste porém próximos aos resultados obtidos por Sousa Neto (2019), já quando comparado com os resultados obtidos por Araújo (2019) e Loiola (2009) com a brita caracterizada em laboratório, a diferença percentual é de 7,36% e 9,09% respectivamente e mostra que os revestimentos que não contêm PET em sua composição são mais resistentes à abrasão. Ainda comparando com o trabalho de Loiola (2009), agora com ensaio realizado com os materiais extraídos do campo, é possível notar que o TSD com uso do PET se mostra mais resistente ao desgaste nessa situação.

Figura 10 – Comparação dos resultados de desgaste.



Fonte: Autor, 2023.

4.3 Avaliação da Macrotextura

A Tabela 06, mostra a classificação da textura superficial do revestimento de acordo com a altura média da mancha de areia. A Tabela 07 apresenta os resultados referentes a classificação da macrotextura somente nas amostras que contêm PET, onde todos os valores se encontram fora do intervalo determinado pelo DNIT (2006), que varia entre 0,6mm e 1,2mm, á classificando como uma textura de média á grosseira ou aberta.

Autores como Sousa Neto (2019), Loiola (2009) e Araújo (2019) também apresentaram resultados fora do intervalo, com classificação de muito grosseira ou muito aberta, utilizando o revestimento convencional somente com brita e emulsão, o que significa que a utilização do PET não interferiu nos resultados.

Tabela 06 – Classificação da Macrotextura.

Altura média de mancha de areia (mm)	Textura superficial
$HS \leq 0,20$	Muito fina ou muito fechada
$0,20 < HS \leq 0,40$	Fina ou fechada
$0,40 < HS \leq 0,80$	Média
$0,80 < HS \leq 1,20$	Grosseira ou aberta
$HS > 1,20$	Muito grosseira ou muito aberta

Fonte: DNIT (2006).

Tabela 07 – Resultados do ensaio de mancha de areia.

Amostras	HS	Classificação
7% PET	6,49	Muito grosseira ou muito aberta
5% PET	5,66	Muito grosseira ou muito aberta
3% PET	4,97	Muito grosseira ou muito aberta

Fonte: Autor, 2023.

Contudo, os revestimentos com classificação de muito grosseiro ou muito aberto são aplicados geralmente em casos onde há necessidade de maior aderência entre o pneu e o pavimento, como rodovias e vias urbanas com grande fluxo de veículos e/ou em áreas com alto índice de chuvas, permitindo a drenagem da água e a redução do risco de aquaplanagem.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi avaliado a aplicabilidade e viabilidade da inserção do PET como agregado em um TSD de vias com baixo volume de tráfego, visando a sustentabilidade e melhoria das propriedades mecânicas.

Com isso, esperava-se que o uso do PET melhorasse a ligação entre agregados e ligante devido a sua composição química, características mecânicas e resistência a decomposição, e assim contribuísse para uma maior vida útil sem descolamento de agregados. Entretanto, a partir da avaliação do desgaste nas amostras e por meio de comparações, foi possível constatar que o PET, apesar de não obter o desempenho esperado, ainda é um material leve e volumoso, que pode ser empregado em pequena quantidade nas amostras. O volume de agregados é tão grande no TS que qualquer redução de uso de agregados naturais é fundamental.

De maneira geral, apesar dos resultados de WTAT não serem bons, o uso de material reciclado deve sempre ser prioridade na sociedade. Algumas sugestões para trabalhos futuros são: (i) uso do PET mais fragmentado; (ii) mudanças na temperatura do PET antes da aplicação; (iii) uso de recicláveis mais maleáveis, como copos descartáveis; (iv) utilização de agregados minerais com menores grãos, entre outros.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **PANORAMA DO RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2021**. 2021.

Disponível em: <file:///D:/Downloads/Panorama-2021-ABRELPE.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM E 965 – 96**: Standard Test Method for Measuring Pavement Macrottexture Depth Using a Volumetric Technique, 2001.

ARAÚJO, Alexandre Martins. **ESTUDO LABORATORIAL DE TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO UTILIZANDO BRITAS CONVENCIONAIS**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.uema.br/handle/123456789/1010>. Acesso em: 21 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14746/14**: Microrrevestimento a frio e lama asfáltica – determinação de perda por abrasão úmida (WTAT). Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6954**: Lastro Padrão – Determinação da Forma do Material. Rio de Janeiro, 1989.

CÂNDIDO, Luis Felipe; BARRETO, José Maurício Lima; CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra. **AVALIAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PRODUZIDOS COM PET RECICLADO**. 2014. Disponível em:

https://www.academia.edu/9732004/AVALIA%C3%87%C3%83O_DE_BLOCOS_DE_CONCRETO_PRODUZIDOS_COM_PET_RECICLADO_EVALUATION_OF_CONCRETE_BLOCKS_WITH_ADDITIONS_OF_RECYCLED_PET. Acesso em: 23 ago. 2023.

CANELLAS, S. S.; D'ABREU, J.C.. **RECICLAGEM DE PET, VISANDO A SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADO MIÚDO EM ARGAMASSA**. 2005. Disponível em:

https://www.artigos.entmme.org/download/2005/reciclagem/1680%20-%20S.S.Canellas_J.C.DAbreu%20-%20RECICLAGEM%20DE%20PET,%20VISANDO%20A%20SUBSTITUI%C3%87%C3%83O%20DE%20AGREGADO%20MI%C3%9ADO%20EM%20ARGAMASSA.pdf. Acesso em: 23 ago. 2023.

COELHO, M.L et al. **AGREGADOS DE GARRAFA PET TORNAM O ASFALTO MAIS RESISTENTE APÓS IRRADIAÇÃO COM LUZ VISÍVEL**. 2018. Disponível em:

<https://revistas.ufpel.edu.br/index.php/rbes/article/view/288/256>. Acesso em: 23 ago. 2023.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 078/94:** Agregado Graúdo - Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 086/94:** Agregados - Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 035/98:** Agregados: Determinação da abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT - 146/2012 ES:** Pavimentação Asfáltica - Tratamento Superficial Simples - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT - 147/2012 ES:** Pavimentação Asfáltica - Tratamento Superficial Duplo - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT - 148/2012 ES:** Pavimentação Asfáltica - Tratamento Superficial Triplo - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2012.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT – 413/2019 ME:** Pavimentação - Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro: Publicação IPR - 729, 2006.

HEISLER, Ricardo José. **LEVANTAMENTO DE ATR EM RODOVIAS COM REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO EXECUTADO EM ÉPOCAS DISTINTAS.** 2016. Disponível em: <https://1library.org/document/qvpdvr1q-levantamento-rodovias-revestimento-concreto-asfaltico-executados-epocas-distintas.html>. Acesso em: 04 out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/caraubas/panorama>. Acesso em: 05 out. 2023.

KARNIKOWSKI, Tamires. **SELEÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS URBANOS BASEADA NA ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA**. 2019.

LOIOLA, Paulo Roberto Reis. **ESTUDO DE AGREGADOS E LIGANTES ALTERNATIVOS PARA EMPREGO EM TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DE RODOVIAS**. 2009. Fortaleza. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/3670>. Acesso em: 14 ago. 2023.

MOTTA, Laura Maria Goretti da *et al.* **PAVIMENTO DO PONTO DE VISTA ESTRUTURAL E FUNCIONAL. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2022. Cap. 1, p. 11.

NORMA MERCOSUL – **NM-53/2009**: Agregado Graúdo – Determinação de massa específica aparente e absorção de água. 2003.

PEREIRA, Synardo Leonardo de Oliveira. **AVALIAÇÃO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS SIMPLES, DUPLO E TRIPLO DE RODOVIAS ATRAVÉS DO EMPREGO DE DIFERENTES AGREGADOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA**. 2013. Disponível em: file:///D:/Downloads/2013_dis_slopereira.pdf. Acesso em: 23 ago. 2023.

RODRIGUES, Ana Letícia Vidal et al. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TRABALHOS QUE ABORDAM PET ADICIONADO NA DOSAGEM DE PAVIMENTO**. 2019.

SILVA, Raimi Costa da; BARROSO, Suelly Helena de Araújo; KIM, Youngsoo Richard. **INTRODUÇÃO DO COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE PARA AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DO TIPO TRATAMENTOS SUPERFICIAIS**. 2017. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1371/681>. Acesso em: 05 out. 2023.

SANTOS, Tânea Aparecida et al. **MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADA POR BORROCHA DE PNEUS INSERVÍVEIS, COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL, PARA APLICAÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO**. 2013.

SILVA, Ludimila de Andrade; ROMEIRO, Dionei Antonio. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA EM TSD – TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO – EM ZONAS URBANAS: ESTUDO DE CASO**. 2017. Disponível em: file:///D:/Downloads/2017_1_LUDIMILLA_DIONEY.pdf. Acesso em: 23 ago. 2023.

SOUSA, Márcio Alexandre de. **ESTUDO DO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ASFALTO MODIFICADO**. 2021. Disponível em:
<http://repositorio.favale.edu.br:8080/jspui/bitstream/123456789/53/1/TCC-MARCIO%20ALEXANDRE%20DE%20SOUSA%20%281%29.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2023.

SOUSA NETO, Antônio Pereira de. **ESTUDO LABORATORIAL DE TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO UTILIZANDO SEIXO ROLADO**. 2019. Disponível em:
<file:///D:/Downloads/Monografia%20Vers%C3%A3o%20Digital.pdf>. Acesso em: 04 out. 2023.

TAVARES, Ana Letícia Nóbrega Rabello. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO CAP 50/70 MODIFICADO POR ADIÇÃO DE PET TRITURADO**. 2018. Disponível em:
<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/23475/ANA%20LET%c3%8dCIA%20N%c3%93BREGA%20RABELLO%20TAVARES%20-%20TCC%20ENG.%20CIVIL%20CTRN%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 jul. 2023.

ZENKNER, Thais Freitas; NATANAEL, Marcus Vinicius Barros; SILVA JUNIOR, Flávio Vieira da. **AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA DO PAVIMENTO ASFÁLTICO DO ANEL VIÁRIO DO MUNICÍPIO DE PALMAS (TO)**. Disponível em:
<file:///D:/Downloads/scientia,+Editor+da+revista,+m+ARTIGO+2586+-+2019-08-24.pdf>. Acesso em: 03 set. 2023.