

INVESTIGAÇÃO DO USO DE PLÁSTICO PET COMO AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS

INVESTIGATION INTO THE USE OF PET PLASTIC AS AGGREGATE FOR ROAD SURFACE TREATMENT

Luiz Felipe de Lima Matos¹
luizfelipematos@gmail.com

RESUMO

O Tratamento Superficial (TS) é um tipo de revestimento asfáltico utilizado em vias de médio a baixo volume de tráfego. Esse tratamento consiste na aplicação em campo de camadas de agregados sobre camadas de ligante asfáltico. Diferentemente do Concreto Asfáltico (CA), o TS é executado em campo, com menor controle de adesão agregado-ligante. Portanto, durante a vida útil, observa-se que na fase inicial a perda de agregados é maior, podendo ser atribuído à baixa adesão entre o agregado e o ligante associado à abertura do tráfego antes do período adequado de ruptura, além de questões relacionadas a execução inadequada, e outros. Uma possível solução para essa perda de agregados pode ser o uso do resíduo tereftalato de polietileno (PET) por ser um material mais maleável, contribuindo com a ligação agregado-ligante, e possuir baixa densidade, reduzindo o uso de agregados minerais além de ser um material abundante e reciclável. Para isso, neste trabalho foi coletado material PET, triturado industrialmente para substituir parte dos agregados minerais aplicados na segunda camada de TS Duplo (TSD). Assim, foram moldados corpos de prova com taxas de 0%, 5%, 10% e 15% de PET a fim de comparar a perda de agregados através do ensaio de Wet Track Abrasion Test (WTAT). Os resultados apontam que a presença de agregado PET não proporcionou aumento de adesão entre os agregados e ligante asfáltico. Observou-se que o processo de cura e o excesso de PET pode ajudar a explicar esses resultados quando comparado com outros estudos na literatura.

Palavras-chave: TSD; WTAT; PET; Revestimento Asfáltico.

ABSTRACT

Surface Treatment (ST) is a type of asphalt surfacing used on medium to low-traffic volume roads. This treatment consists of the field application of aggregate layers over asphalt binder layers. ST is carried out in the field, with less control of aggregate-binder adhesion, unlike Asphalt Concrete (AC). Therefore, during its useful life, there is a higher aggregate loss in the initial phase due to low adhesion between the aggregate and the binder when traffic opens before the breaking period, as well as issues related to inadequate execution, among others. A possible solution to this aggregate loss could be the use of polyethylene terephthalate (PET) waste as it is a more malleable material, contributing to the aggregate-binder bond, and it has a low density, reducing the use of mineral aggregates besides being an abundant and recyclable material. For this analysis, it was collected and industrially crushed PET material to replace part of the mineral aggregates used in the Double TS (DTS) second layer. The Wet Track Abrasion Test (WTAT) was used to compare the aggregate loss of samples containing 0%, 5%, 10%, and 15% PET. The study found that adding PET to the mix did not improve the adhesion between the asphalt binder and the aggregates. It was noticed that the curing process and the excess PET may help explain these results compared to other academic studies.

Key words: DTS; WTAT; PET; Asphalt Surfacing.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Confederação Nacional dos Transportes – CNT (2022), o modo rodoviário detém aproximadamente 64,9% do volume total de cargas transportadas no país, e 90,0% do transporte de passageiros. Essa preferência foi estabelecida ainda no final da década de 1950, quando, por orientação política da época, enfatizou-se na expansão das rodovias como uma estratégia fundamental para integração do território nacional.

Balbo (2007) afirma que a estrutura de um pavimento é planejado para receber e transmitir esforços com o objetivo de amenizar pressões sobre as camadas inferiores e a fundação, sendo estes classificados em rígidos, semiflexíveis e flexíveis. Bernucci et al. (2006) destacam que os pavimentos rígidos são aqueles que possuem revestimento com placa de concreto Portland, tendo sua espessura determinada em função da resistência à flexão e das camadas subjacentes. Quanto aos pavimentos flexíveis, define-os como aqueles cujo revestimento é composto por uma mistura constituída de agregados e ligantes asfálticos.

De acordo com Silva (2018), o Tratamento Superficial (TS) trata-se de um revestimento flexível de espessura fina, em média entre 5 e 20 mm, constituído pelo espalhamento sucessivo de emulsão asfáltica e agregado, seguido de compactação. O TS ainda pode ser subdividido em três grupos: Tratamento Superficial Simples (TSS), Tratamento Superficial Duplo (TSD) e Tratamento Superficial Triplo (TST). O TSS constitui-se em uma única camada de ligante sobre a base imprimada seguida de agregado, finalizada com compactação. O TSD segue o mesmo princípio do TSS, porém, com uma segunda aplicação de ligante e agregados de menor granulometria à primeira camada, finalizada com uma segunda compactação. O TST se difere apenas pela presença de uma terceira camada de ligante e agregados de menor granulometria às duas primeiras camadas, seguido de compactação.

Por ser executado em campo, no TS não há como controlar a qualidade de adesão entre os agregados e o ligante asfáltico, diferentemente das misturas usinadas, como o Cimento Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ), também chamado de Cimento Asfáltico (CA) de acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES, onde há maior controle de adesão visto que o ligante asfáltico consegue envolver completamente o agregado por conta da alta temperatura (geralmente acima de 140°C). Com isso, a probabilidade de perda de agregados no TS durante a passagem inicial do tráfego é maior, podendo ser atribuído a fatores como tempo chuvoso, taxa excessiva de agregados, assim como taxa inadequada de ligante e controle de tráfego inadequado durante a construção. Além disso, as

características físicas dos agregados como granulometria, forma e absorção, contribuem para o aumento desse problema (ADAMS, 2014).

Para melhorar as condições de adesão no TS, Santos (2023) utilizou o tereftalado de polietileno (PET) para substituir parte do agregado mineral de TSD e verificar a melhoria de ligação entre agregados e ligante asfáltico. Porém, o resultado da avaliação do desgaste não foi o esperado, pois a perda de agregados nos corpos de prova com PET foi maior que aqueles com apenas agregados minerais. Como justificativa à esses resultados, o autor cita a influência do tamanho das partículas do PET resultando na má adesão com os demais materiais, apresentando como sugestão o uso do PET com dimensões menores, já que o autor utilizou um formato mais esbelto e comprido. Além disso, Santos (2023) cita a temperatura do material PET ao manuseá-lo. Como foi trabalhado em temperatura ambiente, o autor cita como possível solução o manuseio do material à uma temperatura mais elevada, tornando-o mais maleável.

Segundo a ABREMA (2023), há uma estimativa de geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de aproximadamente 1,04 Kg per capita diariamente no Brasil. Esse valor aplicado ao Cebso Demográfico 2022, estima-se que aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de RSU foram gerados no país neste mesmo ano. Deste total, apenas 205,663 toneladas de plástico foram reciclados em 2022, correspondendo a 25,5% de todo o RSU cotado. Partindo dessa premissa, surge a necessidade de continuação de estudos referentes ao uso de PET em TSD como substituto de agregados minerais, avaliando outras formas de tratamento prévio do material e questões relacionada a aplicação desse resíduo durante a execução. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é avaliar a eficácia do uso do PET moído industrialmente junto aos agregados minerais na segunda camada de TSD a fim de verificar se o resíduo PET pode contribuir para melhorar a adesão entre o agregado e o ligante asfáltico, reduzindo a perda de agregados no TS.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o uso de plástico PET como agregado para aplicação em tratamento superficial de rodovias.

2.2. Objetivos Específicos

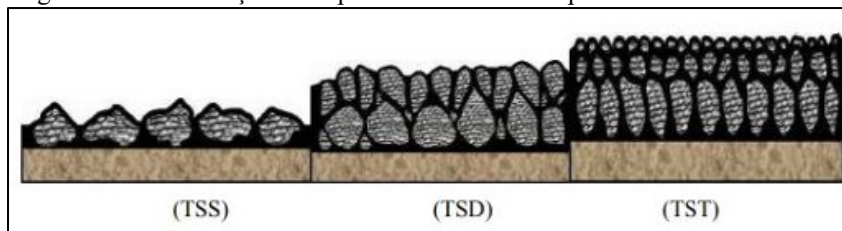
- Avaliar a porcentagem ótima de PET como agregado a fim de melhorar a adesão Agregado-Ligante no TS;

- Investigar a influência do tamanho e da forma do grão das partículas do plástico PET na adesão do TS;
- Analisar a viabilidade econômica da substituição de agregado comum por agregado PET no TS.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Silva (2018), os agregados mais adequados para se aplicar em TS são os que possuem granulometria bem definida, ou seja, que possuem as dimensões mais semelhantes possíveis. Isso se deve ao seu processo construtivo, realizado in loco, que não garante uma boa homogeneidade do revestimento em casos de agregados mal definidos. Neste último caso, os de menores dimensões podem ficar submersos no ligante aplicado enquanto os maiores podem se soltar facilmente do revestimento devido a camada fina de ligante, ocasionando a perda dos agregados. A Figura 1 demonstra os três tipos de TS: TSS, TSD e TST.

Figura 1: Demonstração dos tipos de tratamentos superficiais



Fonte: LOIOLA (2009)

A adesividade é inerente à aspectos físicos e químicos do ligante e do agregado. A ação mais importante do ligante asfáltico é unir as partículas dos agregados, envolvendo-as na nova superfície e à camada inferior, além de trabalhar como impermeabilizante. O efeito da água de segregar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inadequado para o uso em misturas asfálticas. Aqueles agregados que possuem alta adesividade na presença de água são denominados hidrofóbicos, sendo estes os mais recomendados para o uso em misturas asfálticas (MOTTA et al., 2022).

3.1. Dosagem do Tratamento Superficial

De acordo com o Departamento Estadual de Rodovias do Ceará (DER-CE), o método da “bandeja de fundo vermelho”, também conhecido como método mosaico, assim denominada devido ao fundo ser pintado de tal cor para facilitar a identificação dos vazios ainda existentes, é bastante difundido e segue o pensamento no qual, ao dispor os agregados uniformemente, toda a superfície será preenchida evitando sobreposições (SILVA, 2018). A norma DNIT 147/2012 – ES demonstra o cálculo da taxa de agregado graúdo, assim como também a dosagem

do ligante, mostrando a faixa de volume aceitável para aplicação de emulsão asfáltica em cada camada do TSD.

3.2. Avaliação de Desgaste do TS

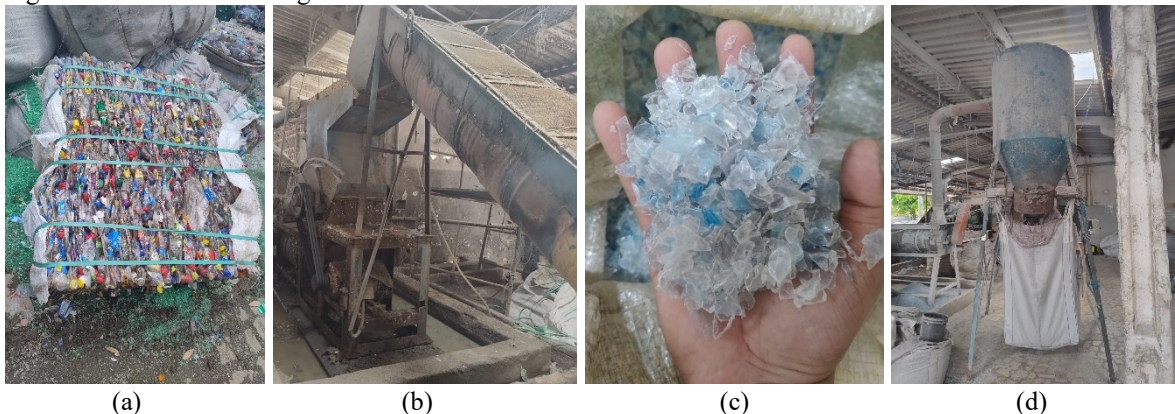
Para a análise do desgaste do TSD, Loiola (2009) utilizou o ensaio de Wet Track Abrasion Test (WTAT) de acordo com a norma ABNT NBR 14746/2001, aplicando a carga abrasiva por 5 minutos. Nela instrui a avaliação simulando o tráfeco através da abrasão úmida das misturas, fornecendo diretrizes para determinar a ideal proporção entre emulsão, agregados e aditivos para diferentes misturas. Seus resultados apresentaram uma média de desgaste para os corpos de prova feitos apenas com brita e emulsão RR-2C de 8,77%, chegando ao máximo de desgaste em 21,75%. Já nos resultados de Araújo (2019), foi apresentado uma média de desgaste de 10,50% nos corpos de prova, chegando ao máximo de 18%.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Nesse estudo será avaliado o resíduo do tipo PET reciclado. Para isso, foi realizado uma pesquisa de disponibilidade no mercado do material triturado industrialmente. Como resultado, para realizar a coleta do material foi contatado a cooperativa Terra Limpa Reciclagem, localizada no município de São Gonçalo do Amarante, região metropolitana de Natal-RN à 300 km de Caraúbas-RN, onde as investigações e estudos foram realizados.

Figura 2: Processos de moagem do PET



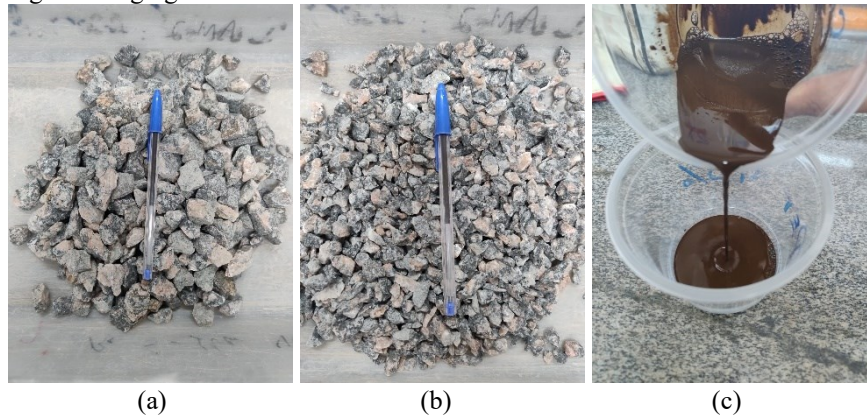
Fonte: Autor (2024)

Na indústria, o material chega prensado em blocos (Figura 2a) e posteriormente é colocado na “toradora de rótulos”, onde é retirado grande parte dos adesivos e tampas contidos nos resíduos. Em seguida, o material passa pelo primeiro moinho (Figura 2b), onde o material é triturado e, em seguida, lavado. Através de uma esteira, o material é transportado até o segundo moinho para novamente ser triturado em tamanhos de partículas menores (Figura 2c).

Por último, o material já lavado é transportado por um ventilador de alta potência para secagem e armazenamento no silo (Figura 2d).

Os agregados minerais foram adquiridos na Mineração Caraúbas, pedreira localizada no município de Caraúbas-RN à margem da rodovia estadual RN-233, Km 05. Para a primeira camada de TSD, foi coletada a brita $\frac{3}{4}$ " (19 mm) e para a segunda camada, a brita $\frac{3}{8}$ " (cascalho), demonstrados na Figura 3a e 3b, respectivamente. Através do Grupo Potiguar, foi possível adquirir o ligante tipo emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida, RR-2C (Figura 3c), sendo este tipo o mais empregado na região em obras de revestimento asfáltico. Segundo o DNER-EM 369 (1997), trata-se de um ligante onde o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é diluído em meio aquoso, tornando-o mais flúido. Neste caso, o material adquirido possui uma proporção de 60% de CAP e 40% de água com características catiônicas.

Figura 3: Agregados e Emulsão



Fonte: Autor (2024)

4.2. Métodos

Todos os métodos de ensaio foram realizados no laboratório de engenharia civil da Universidade Federal Rural do Semi-Arido (UFERSA), campus caraúbas-RN, exceto o WTAT que foi executado no laboratório de mecânica dos pavimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC), em Fortaleza-CE, campus do Pici.

4.2.1. Caracterização dos Agregados

Após a coleta dos agregados, realizou-se a redução da amostra de acordo com a norma DNER-PRO 199/96. Em seguida, os materiais foram submetidos ao ensaio de granulometria, sendo duas amostras ensaiadas para cada um de acordo com a norma DNIT 412/2019 – ME. Para auxiliar na execução, utilizou-se uma série de peneiras e agitador mecânico. O PET foi submetido apenas a este ensaio. Foi executado o ensaio para a determinação de massa específica, densidade relativa e absorção dos materiais de origem mineral de acordo com a norma DNIT 413/2019 – ME. Para avaliar a resistência dos agregados à abrasão, executou-se

o ensaio de “Los Angeles” de acordo com a norma DNER-ME 035/98, onde a Brita 19mm foi encaixada na “Graduação B” e o Cascalho na “Graduação C”, inseridas no tambor em rotação uniformes e suas respectivas cargas abrasivas.

4.2.2. Determinação da Taxa de Agregado e Ligante Asfáltico

Na montagem dos corpos de prova para TSD, optou-se por utilizar a brita 19mm na primeira camada e a cascalho na segunda camada. Para a determinação das taxas, foi tomado como base a norma DNIT 147/2012 – ES. Na determinação da taxa de agregados, foi adaptado o método da caixa de fundo vermelho (Figura 4). Este meio consiste em espalhar o agregado no fundo deste recipiente de modo que preencha todos os vazios e o fundo não seja mais visto, evitando sobreposição dos mesmos.

Figura 4: Ensaio Caixa de Fundo Vermelho



Fonte: Autor (2024)

Quadro 1: Determinação Taxa de Ligante

Camada	Ligante	Agregado
1ª	1,2 a 1,8 l m ²	20 a 25 kg/m ²
2ª	0,8 a 1,2 l m ²	10 a 12 kg/m ²

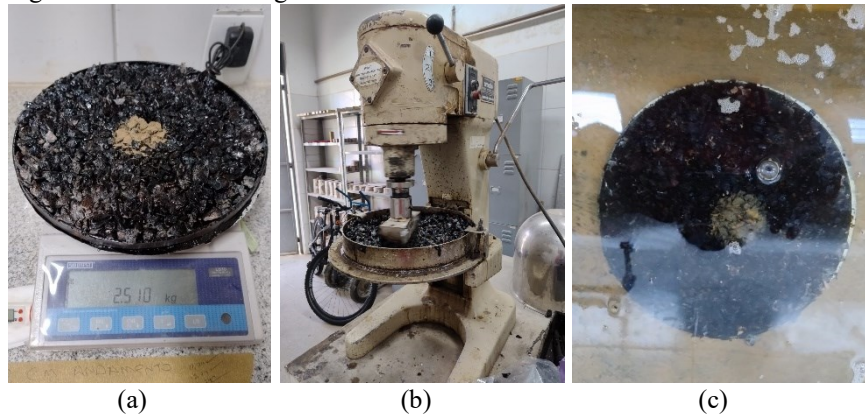
Fonte: DNIT 147/2012 (2012)

Feito isso, a taxa de agregado gráudo (T_g) é obtida pela subtração da massa da bandeja com o agregado (P_t) pela massa da bandeja vazia (P_p) dividido pela área do fundo da bandeja A. Para a determinação da taxa de ligante asfáltico, foi utilizado a proporção indicada na norma, como mostra o Quadro 1. Portanto, foi determinado a taxa de 1,5 L/m² para a primeira camada e 1,0 L/m² na segunda camada, valores medianos entre os intervalos permitidos. O cálculo determinado para taxa de agregado na primeira camada de 20,83 Kg/m² e na segunda camada de 12,83 Kg/m².

4.2.3. Resistência ao Desgaste

Para verificar a resistência ao desgaste das misturas, foi realizado o ensaio de WTAT conforme a norma ABNT NBR 14746. Como referência para moldar os corpos de prova, foram tomados como base os trabalhos de Loiola (2009) e Araújo (2019), onde utilizaram uma placa metálica circular com manta asfáltica em sua superfície como base, simulando a imprimação, e um aro metálico com diâmetro de 28cm e espessura de 1cm. A abrasão foi calculada pela diferença entre a massa inicial e a final dividido pela massa inicial, obtendo a porcentagem de desgaste.

Figura 5: Ensaio de Desgaste WTAT



(a) Fonte: Autor (2024)

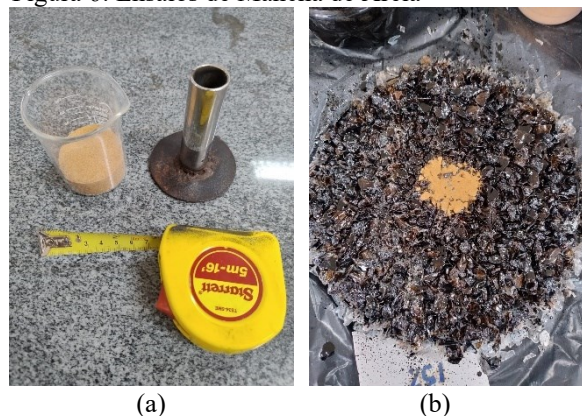
(b)

(c)

Para análise e comparação de resultados, foram moldados 2 corpos de prova de TSD convencional (0% de PET). Outros 6 foram feitos, sendo 2 para cada porcentagem de PET aplicado na segunda camada do TSD em substituição da massa de cascalho em 5%, 10% e 15%. Essa porcentagem do material foi adicionado e misturada ao agregado mineral para serem aplicados juntos (Figura 5a). Após a moldagem, os corpos de prova foram pesados e passaram pelo processo de cura em temperatura ambiente no próprio laboratório. Antes da execução do ensaio WTAT (Figura 5b), os corpos de prova foram imersos em água durante 10 minutos (Figura 5c) e, após esse período, foi submetido ao ensaio de abrasão durante 5 minutos. Por último, foram lavados, expostos ao sol para secagem e pesados novamente.

4.2.4. Macrotextura do TSD

Figura 6: Ensaio de Mancha de Areia



(a)

(b)

Fonte: Autor (2024)

Para avaliar sua macrotextura, foi realizado o ensaio de mancha de areia nos corpos de prova de TSD de acordo com a ASTM E-965-96 (1998), ligado às condições de drenagem do pavimento. Para isso, foi utilizado a Equação 1, onde HS é a altura média da mancha de areia em milímetros (mm), V é o volume de areia (25.000mm^3) utilizado para o ensaio e D o diâmetro do círculo da mancha sobre o revestimento. A Figura 6a mostra os equipamentos utilizados para

a realização do ensaio e, na Figura 6b, expõe a mancha de areia sobre o TSD.

$$HS = \frac{2V}{D^2 \cdot \pi} \quad (1)$$

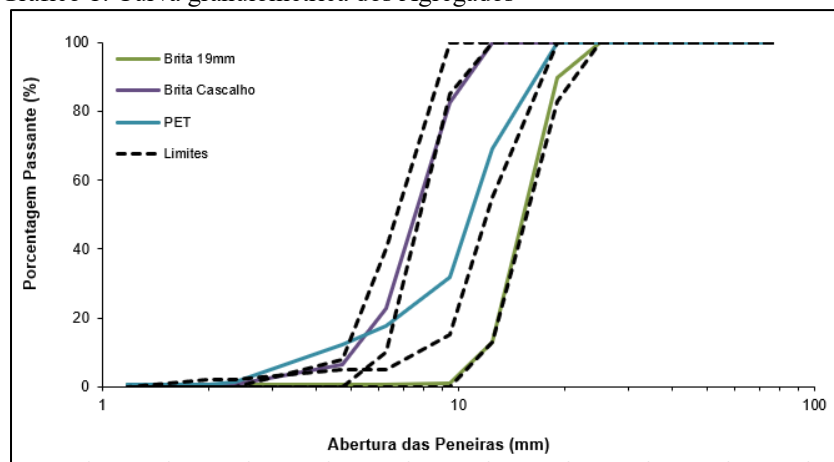
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização dos Agregados

5.1.1. Análise Granulométrica

O Gráfico 1 mostra a curva granulométrica obtida para os agregados brita 19mm e cascalho, bem como para o PET triturado. Observa-se que os agregados minerais possuem granulometria bem definida, ou seja, uniforme, podendo ser julgados como adequados para a execução do TSD nesse quesito, sendo a brita 19mm aplicada na primeira camada e o cascalho na segunda camada. Suas curvas, considerando as margens de erros, definidas pela norma, conclui-se que podem ser utilizadas em TSD. Já a curva granulométrica do PET triturado não se comporta nas faixas recomendadas pela norma DNIT 147/2012 ES, ficando entre a faixa recomendada para a primeira camada e para a segunda camada. Visto que sua granulometria é menor que a de 19mm aplicada na primeira camada, optou-se por avaliar seu comportamento na segunda camada, junto com o cascalho.

Gráfico 1: Curva granulométrica dos Agregados



Fonte: Autor (2024)

5.1.2. Densidade, Absorção e Los Angeles

O Quadro 2 apresenta os resultados para densidade dos agregados minerais, assim como a porcentagem de absorção e o desgaste por abrasão no ensaio “Los Angeles. Como base comparativa, foi tomado os resultados obtidos na pesquisa de Santos (2023), pois ambos os estudos possuem agregados de mesma origem, também apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Comparativo dos Resultados de Densidade e Absorção

Parâmetro	Resultados do Trabalho Atual		Resultados Santos (2023)	
	Brita 19mm	Cascalho	Brita 19mm	Cascalho
Densidade Relativa Real	2,684	2,686	2,679	2,679
Densidade Relativa Aparente	2,647	2,601	2,639	2,606
Absorção (%)	0,51	1,22	0,57	1,04
Abrasão Los Angeles (%)	26,85	20,29	24,34	28,62

Fonte: Autor (2024)

Observa-se que os resultados para densidade e absorção possuem resultados bem semelhantes. Quanto à absorção, não há norma que determine os limites de absorção para agregados minerais. No uso geral em pavimentação, somente a norma DNER-ME 262/94 estabelece limites de absorção para as escórias de aciaria, sendo no mínimo 1% e máximo de 2%. Tomado esses limites, vê-se que a brita 19mm está abaixo desse limite, enquanto o cascalho se enquadra perfeitamente. Como o agregado que mais absorve ligante é o da primeira camada, ou seja, a brita 19mm, o autor considera ambos os resultados satisfatórios com relação aos limites do DNER-EM 262/94. Ambos os estudos possuem resultados inferiores à este limite. Quanto às porcentagens de abrasão, os valores comparativos estão próximos, com excessão do cascalho, onde o trabalho de Santos (2023) apresentou valores da ordem de 8% maior. No entanto, de acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES, o resultado para a brasão de um agregado usado em pavimentos flexíveis deve ser inferior ou igual à 50%. Dessa forma, todos os resultados estão abaixo desse limite e, portanto, são satisfatórios.

5.2. Avaliação de desgaste WTAT

O Quadro 3 contém o quantitativo dos materiais utilizados na moldagem dos corpos de prova de TSD do estudo em questão. À nível comparativo, foram tomados os valores utilizados nos estudos de Araújo (2019) e Santos (2023). Optou-se por manter as massas de agregados constante, assim como o volume de ligante, para melhor comparar os resultados.

Quadro 3: Quantitativo de Material para o TSD

Agregado	Araújo (2019)		Santos (2023)		O Autor (2024)	
	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)
19mm	12,60	0,82	18,00	2,02	20,83	1,50
Cascalho	5,80	1,23	7,00	0,78	12,83	1,00

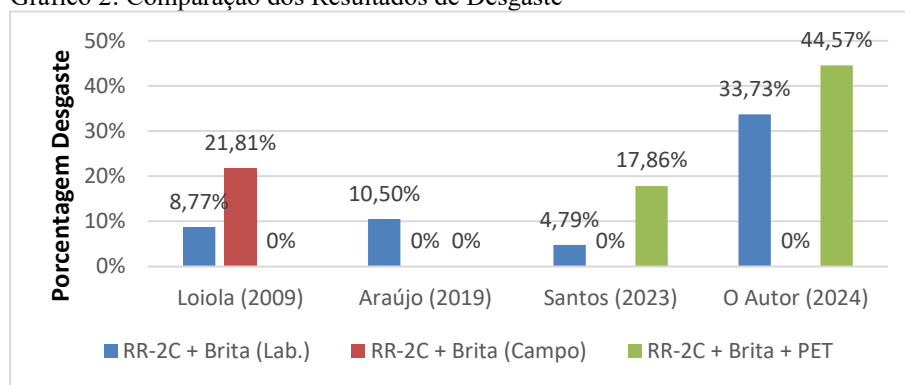
Fonte: Autor (2024)

Observa-se no Quadro 3 as diferenças nas taxas entre os três trabalhos, o que pode ajudar a explicar os resultados. Todavia, considerando que o estudo de Santos (2023) utilizou agregados de mesma origem deste, percebe-se maior semelhança entre eles. A princípio, nota-se que o somatório de agregados minerais utilizado no estudo do autor é maior, sendo 8,66

Kg/m² à mais, do que no de Santos (2023), enquanto neste último o somatório do volume de emulsão utilizado é maior, sendo 0,3 L/m² à mais. Vale ressaltar que a origem das emulsões são distintas.

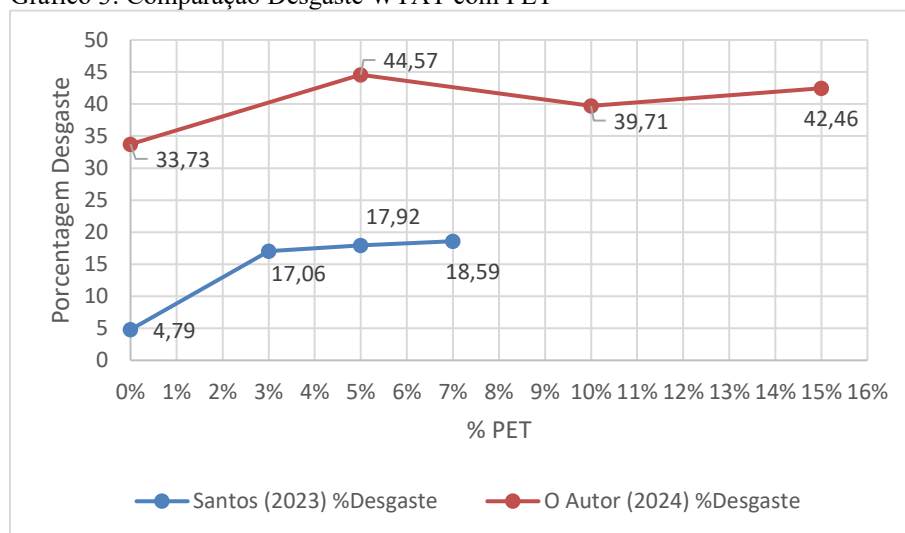
Tanto no trabalho de Araújo (2019) quanto no de Santos (2023), foi utilizado a estufa no período de 24h no processo de cura dos corpos de prova. No entanto, para melhor simular o que ocorre em campo, optou-se pela cura sob condições ambientais. Essa diferença influencia diretamente na comparação dos resultados (Gráfico 2), ainda mais que, por se tratar de época chuvosa e de menor temperatura ambiente, foi observado que a cura dos corpos de prova ocorreram de forma parcial. Além disso, as porcentagens de PET utilizadas no presente trabalho são maiores ao de Santos (2023), onde foi utilizado 3%, 5% e 7% do resíduo.

Gráfico 2: Comparação dos Resultados de Desgaste



Fonte: Autor (2024)

Gráfico 3: Comparação Desgaste WTAT com PET



Fonte: Autor (2024)

Observa-se que as porcentagens de desgaste são elevadas até mesmo para a mistura que não possui PET, apesar de ser o de menor desgaste com 33,73%. O maior desgaste possui 44,57%, sendo este resultado para a mistura com 5% de PET. Quando comparados com os

resultados obtidos por Santos (2023), conforme mostra o Gráfico 3, vê-se que a porcentagem de desgaste da mistura sem o PET é de 4,79%, enquanto para a mistura com 5% de PET chega apenas à 17,86%.

Por ser um material de baixa densidade, a substituição direta da massa em porcentagem de agregados minerais por PET aumenta consideravelmente seu volume total. Neste caso, outra possibilidade para os valores altos de desgaste pode ser atribuído à quantidade insuficiente de ligante nas misturas, diminuindo a adesão entre agregados e ligante. Se comparar o formato do PET utilizado por Santos (2023) com o do presente trabalho, nota-se a diferença entre eles pois o primeiro utilizou um formato mais afilado e esbelto (Figura 7), enquanto o segundo, por se tratar de uma moagem industrial, possui formado não uniforme (Figura 8). Neste último caso, a superfície da partícula possui maior área. Consequentemente, confirma a necessidade de aumentar o volume de ligante por metro quadrado para melhorar a adesão da mistura.

Figura 7: PET utilizado por Santos



Fonte: Santos (2023)

Figura 8: PET utilizado pelo Autor



Fonte: Autor (2024)

A escolha do material nestas condições se deu à capacidade industrial de produção em larga escala, visando antecipadamente, em caso de resultados satisfatórios, sua aplicação em campo. Contudo, os resultados não mostraram melhoria na adesão entre agregados e ligante, e sim diminuição dessa característica. Estudos com uma taxa menor de PET na mistura do TSD, um tratamento para atingir menor granulometria deste material e sua aplicação na primeira camada se fazem necessários para a dar continuidade à investigação.

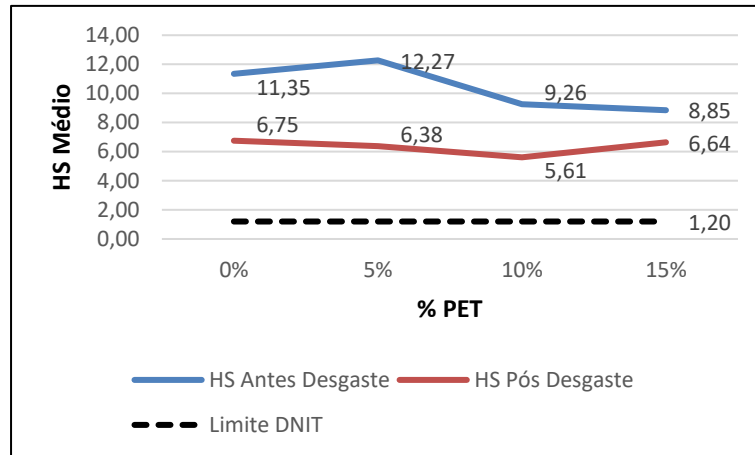
5.3. Avaliação da Macrotextura

Foi realizado o ensaio antes e após o ensaio de desgaste WTAT, a fim de comparar seus resultados. A Figura 12 apresenta os resultados de ambos, assim como o valor limite determinado pelo DNIT.

Como apresentado no Gráfico 4, todos os resultados do ensaio realizado antes do desgaste foram classificados como “muito grosseira ou muito aberta”, conforme classifica o Quadro 4, já que seus valores foram maiores que 1,20mm. Observa-se também, na avaliação antes do desgaste, que a primeira adição de PET à 5% na segunda camada, quando comparado

ao resultado à 0% de PET, apresentou aumento da macrotextura da amostra. Porém, conforme foi aumentando a porcentagem à 10% e 15%, essa macrotextura foi diminuindo.

Gráfico 4: Resultados dos Ensaio de Mancha de Areia



Fonte: Autor (2024)

Quadro 4: Classificação 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)

Os resultados do ensaio pós desgaste apresentam uma queda considerável no HS (Figura 12). Isso pode ser justificado devido ao desgaste causado na segunda camada do TSD. Com a diminuição do volume de espaço vazio existente em cada corpo de prova, menor será a sua macrotextura. Dessa forma, a mancha de areia espalha-se mais sobre a superfície do corpo de prova. Mesmo com esses resultados, a classificação seguido o DNIT (2006) se mantém a mesma, sendo “Muito grosseira ou muito aberta” (Quadro 4). Autores como Santos (2023), Araújo (2019) e Loiola (2009) também apresentaram resultados acima do intervalo determinado pelo DNIT (2006). Dessa forma, a adição do PET não interferiu consideravelmente para a mudança desse quadro.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esperava-se, nos resultados, uma melhoria na adesão entre agregados e ligante. Porém, a utilização do PET nessas condições diminuiu essa característica, tornando os TSDs avaliados mais sensíveis a perda de agregados. Além disso, acredita-se que a ruptura dos corpos de prova de forma exposta ao ambiente interno do laboratório não contribuíram para que ocorresse de

forma completa, aumentando ainda mais as chances de alto desgaste. Dessa forma, os resultados não foram satisfatórios, sendo necessário buscar alternativas de aplicação e tratamento do PET, reduzindo sua granulometria no processo de moagem, para reavaliar seu uso como agregado no TSD. Devido aos resultados insatisfatórios de desgaste, não foi realizada a viabilidade econômica da mistura tratada com PET.

Em resumo, além de um método de cura mais eficaz e uma menor taxa de aplicação de PET no TSD, a busca por este resíduo tratado industrialmente com menor granulometria se faz um ponto viável como solução para este problema, colaborando no preenchimento de vazios do TSD e, conseqüentemente, melhorando a adesão entre agregado e ligante. Ademais, os estudos da reutilização do PET na construção civil de qualquer área, é positivo do ponto de vista ambiental, proporcionando um novo ciclo de vida à esse material abundante e reciclável.

REFERÊNCIAS

_____. ASTM E 965 – 96 (1998): Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique.

ABREMA. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2023**. 2023. Disponível em: https://abrema.org.br/pdf/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 4 de março de 2024.

ADAMS, J. M. **Development of a Performance-Based Mix Design and Performance-Related Specification for Chip Seal Surface Treatments**. 2014. Dissertation - North Carolina State University, Raleigh, 2014.

ARAÚJO, Alexandre Martins. **ESTUDO LABORATORIAL DE TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO UTILIZANDO BRITAS CONVENCIONAIS**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.uema.br/handle/123456789/1010>. Acesso em: 13 de março de 2024

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.

BORIN, Marcos Vinícius. **Conheça os Tipos de Pavimentação e suas Funções**. CTCinfra, 2023. Disponível em: <https://ctcinfra.com.br/tipos-de-pavimentacao/>. Acesso em: 9 de dezembro de 2023.

BRASIL. **O transporte move o Brasil: propostas da CNT ao país**. Brasília: Confederação Nacional dos Transportes, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro: Publicação IPR - 720, 2006.

DNER-EM 262/94: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-EM 369/97: Emulsões asfálticas catiônicas. Rio de Janeiro, 1997.

DNER-ME 035/98: Agregados: Determinação da abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 078/94: Agregado Graúdo: Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – 031/2006 ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006

DNIT – 147/2012 ES: Pavimentação Asfáltica – Tratamento Superficial Duplo –Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2012.

DNIT – 412/2019 ME: Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

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.

LOIOLA, P. R. R. Estudo de agregados e ligantes alternativos para emprego em tratamentos superficiais de rodovias. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

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. 3, p. 246.

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

PEREIRA, S. L. de O. Avaliação dos tratamentos superficiais simples, duplo e triplo de rodovias através do emprego de diferentes agregados da região metropolitana de Fortaleza. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

RIBEIRO, Lucas Alves. Você Conhece Todos os Tipos de Pavimento?. Blog da Engenharia, 2021. Disponível em: <https://blogdaengenharia.com/engenharia/tipos-de-pavimento/>. Acesso em: 9 de dezembro de 2023.

SANTOS, Andressa B. A. AVALIAÇÃO DO USO DE GARRAFAS PET COMO AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS. Artigo (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi Árido. Caraúbas, 2023.

SILVA, Raimi Costa. AVALIAÇÃO DA DOSAGEM DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR PENETRAÇÃO DE RODOVIAS BASEADA NA EXSUDAÇÃO E NA PERDA DE AGREGADOS. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia dos Transportes) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.