

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Análise das Características Mecânicas de Misturas Asfálticas a Quente com Adição de PET

Vinícius Silveira Levay

Engenheiro Civil, Centro Universitário de Brasília, Brasília, Brasil, levay.vinicius@gmail.com

Maruska Tatiana Nascimento da Silva

Docente, Centro Universitário de Brasília, Brasília, Brasil, maruskanascimento@gmail.com

RESUMO: O modal mais utilizado atualmente no Brasil é o rodoviário. Uma pesquisa realizada pela CNT em 2019 relatou que 59% dos 108.863 km avaliados apresentam algum tipo de deficiência em geometria, pavimento ou sinalização. Devido a isso, os engenheiros de pavimentação estão buscando novos métodos de dimensionamento e a utilização de materiais não convencionais para melhorar o desempenho de misturas asfálticas. O presente trabalho tem como objetivo compreender o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo CBUQ com adição de 1,5%, 2,0% e 2,5% de *flakes* de garrafa PET de 4,8 mm para utilização na camada de rolamento. Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados (granulometria, densidade, massa específica, absorção, abrasão de Los Angeles, equivalente de areia e adesividade) e ligante asfáltico 30/45 (viscosidade Saybolt-Furol, penetração, ponto de amolecimento e densidade). As misturas asfálticas foram dosadas de acordo com o método Marshall e avaliou-se o comportamento mecânico das amostras compactadas de CBUQ por meio dos ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall e Resistência à Tração. Para as condições específicas analisadas, as misturas com *flakes* de PET apresentaram valores satisfatórios de comportamento mecânico, mas comparado com às amostras de referência, apresentaram um menor desempenho, com a diminuição na Resistência à Tração e Estabilidade. Desta forma, a adição de *flakes* de PET podem apresentar viabilidade do ponto de vista técnico e ambiental, como uma alternativa para a destinação final de resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), Garrafa PET, Sustentabilidade, Propriedades mecânicas.

ABSTRACT: The model of transportation used currently in Brazil is highway. A research made by Nacional Confederation of Transportation (CNT) in 2019 reported that 59% of the 108.863 km evaluated showed some kind of deficit in geometry, pavement or signaling. Due to this, pavement engineers are looking for new methods to dimensioning and the utilization of new non-convention materials to improve the performance of asphalt mixtures. This present research aims to evaluate the mechanics behavior of HMA mixtures (Hot Mix Asphalt Concrete) with addition of 1,5%, 2,0% and 2,5% of PET bottles (Polyethylene Terephthalate) with the size of 4,8mm for utilization in surface course. Laboratory tests were executed for the characterization of aggregates (particle sizes, density, Los Angeles abrasion, sand equivalent and adhesiveness) and asphalt 30/45 (Saybolt-Furol viscosity, penetration, softening point and specific density). The asphalt mixtures were designed according to Marshall Dosage Method and the mechanical behavior was evaluated through the Marshall Stability and Flow and Tensile Strength. About these specific conditions, the asphalt mixtures with flakes of PET presented a satisfactory mechanical behavior, while the mixtures with flakes presented lower performances in relation to the control samples with a decrease of Marshall Stability and Tensile Strength. Therefore, the addition of PET can present technical and environmental viability, as an alternative to the destination of waste disposal.

KEYWORDS: Hot Mix Asphalt (HMA), Polyethylene Terephthalate (PET), Sustainability, Mechanical properties.

1 Introdução

Atualmente no Brasil o modal mais utilizado é o rodoviário, responsável pela integração do sistema de transporte do país e por mais de 61% do transporte de cargas e 95% de passageiros, e grande parte dessa malha encontra-se em degradação contínua devido à falta de recursos para a manutenção dos pavimentos, excesso de carga e a utilização de metodologias ultrapassadas. O meio técnico rodoviário tem buscado soluções mais econômicas e alternativas para restauração dos pavimentos.

Os danos estruturais em pavimentos ocorrem por diversos fatores como: pressão e peso das rodas do carregamento, volume do tráfego e efeito da temperatura e umidade (Franco, 2007; Dellabianca, 2004). Uma pesquisa realizada em 2019 pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) divulgou o estado geral das rodovias estaduais e federais, onde dos 108.863 km avaliados, 59% apresentaram algum tipo de deficiência na sinalização, no pavimento ou na geometria da via, sendo que, 34,6% em estado regular, 17,5% em estado ruim e 6,9% em péssimo estado, conforme apresentado na Figura 1.

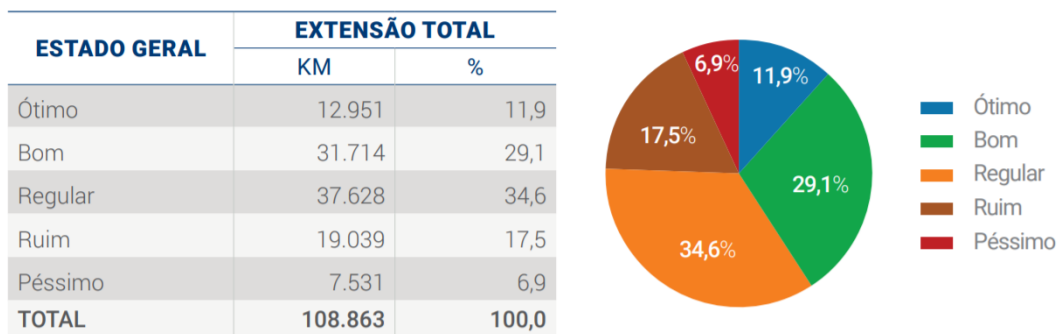


Figura 1 - Classificação do estado geral das rodovias no Brasil, CNT 2019.

Os engenheiros de pavimentação estão constantemente pesquisando melhorias nos pavimentos asfálticos, aplicando novos métodos de dimensionamento e utilizando materiais não convencionais, proporcionando mais segurança aos usuários, a redução de custos e o aumento da durabilidade dos pavimentos. As ausências de condições apropriadas de qualidade e segurança impactam diretamente nos custos de operação do sistema de transporte rodoviários no Brasil (Franco, 2007).

Um dos principais problemas ambientais do mundo contemporâneo é consumo elevado de materiais plásticos, e em virtude da sua vasta utilização, busca-se a destinação adequada do material, através não somente da reciclagem, mas também a aplicação de resíduos sólidos como o Politereftalato de Etileno (PET) em outros ramos, como na área de pavimentação asfáltica.

De acordo com um levantamento realizado em 2017 pelo The Guardian, um milhão de garrafas plásticas são vendidas por minuto em todo o mundo, gerando um consumo mundial de cerca de 500 bilhões de garrafas por ano e somente 7% foram coletadas e transformadas em garrafas novas. Dados da Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET) foram recicladas 274 kilotoneladas de PET no Brasil, aproximadamente 51% da produção total.

A utilização de PET em pavimentos tem sido pouco estudada, porém pesquisas anteriores apontaram resultados promissores, em virtude de ser um material com boa estabilidade química, resistente e inerte (Arão, 2016). Misturas asfálticas com adição de polímeros tendem a ter uma vida de fadiga maior, com menores deformações permanentes (Silva *et al.*, 2013).

Neste contexto, o presente trabalho buscou caracterizar os agregados e ligante asfáltico utilizados em obras de pavimentação do Distrito Federal, e a partir do método de dosagem Marshall, dosou-se uma nova mistura, com adição de *flakes* de PET de 4,8 mm nas porcentagens de 1,5%, 2,0% e 2,5%. Foram moldados



diferentes corpos de provas para a realização dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral, avaliando o comportamento mecânico do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) com PET e sua viabilidade em obras de pavimentação.

2 Materiais

Foram utilizadas 3 granulometrias de agregados calcários: Brita 1, Pedrisco, Pó de Pedra, coletados na pedreira Contagem, jazida explorada na região da Fercal, no Distrito Federal. Os agregados calcários são amplamente utilizados na pavimentação do DF devido a sua grande disponibilidade na região, apesar de serem considerados de qualidade inferior quando comparados com os agregados de rochas graníticas e gnáissicas.

O cimento asfáltico utilizado foi do tipo CAP 30/45, fornecido pela Centro Oeste – Tecnologia em Asfalto. Optou-se por utilizar o CAP 30/45 devido a sua maior consistência, ponto de amolecimento e viscosidade.

Os *flakes* de garrafa PET foram adquiridos da DEPET Reciclagem, e distinto de outras pesquisas, os *flakes* de 4,8mm utilizados são provenientes da reciclagem de diferentes garrafas plásticas, e triturados na indústria, apresentando uma grande variedade de formatos, cores e tamanhos.

3 Método

Os ensaios de caracterização dos agregados e ligantes, assim como a definição do teor ótimo de ligante foram realizados no laboratório de asfalto do Departamento de Estradas e Rodagem do Distrito Federal (DER-DF). Os ensaios mecânicos ocorreram no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (InfraLab) da Universidade de Brasília.

O método utilizado para dosagem foi o de Marshall, método bastante difundido e utilizado no mundo para misturas asfálticas do tipo CBUQ. Os agregados foram enquadrados na faixa granulometria C, segundo a especificação DNIT 031/2006 – ES, faixa granulométrica utilizada para camada de rolamento.

Determinado o teor ótimo de projeto, foram compactados 48 CPs, 12 para cada para mistura a serem estudadas, utilizando um compactador mecânico Marshall com a aplicação de 75 golpes em cada face, onde:

- T1: Dosagem CBUQ convencional, sem adição de *flakes* de garrafa PET;
- T2: Dosagem CBUQ com adição de *flakes* de PET de 4,8 mm na porcentagem de 1,5%;
- T3: Dosagem CBUQ com adição de *flakes* de PET de 4,8 mm na porcentagem de 2,0%;
- T4: Dosagem CBUQ com adição de *flakes* de PET de 4,8 mm na porcentagem de 2,5%.

Assim como o estudo realizado por Arão (2016), não houve na presente pesquisa a modificação do CAP e sim a adição do PET (processo seco). Para isso, fez-se necessário retirar de cada agregado e do ligante asfáltico as adições de *flakes* de PET de maneira proporcional. Desta forma, o peso das misturas permaneceu o mesmo.

Os ensaios mecânicos de Estabilidade e Fluência de Marshall e Resistência à tração por Compressão Diametral foram realizados para análise comparativa de misturas com e sem adição de diferentes porcentagens de *flakes* de garrafa PET.

O ensaio de estabilidade e fluência foi realizado em corpos de prova Marshall, com cerca de 635 mm de altura e 100 mm de diâmetro, moldados em anéis metálicos. Após 40min em banho maria a 60°C e por meio de cabeçotes curvos padronizados, a taxa de carregamento aplicada foi de 5 cm/min, com uma carga crescente de compressão. A carga máxima, expressa em Newtons (N), correspondeu ao ponto onde ocorre a quebra de agregados ou deslocamento, gerando a perda de estabilidade da mistura. A fluência correspondeu ao



deslocamento vertical total expressa em milímetros (mm) na qual o corpo de prova sofreu. Foram compactados no total 12 CPs, sendo 3 para cada tipo de mistura.

Estabelecida pela especificação DNIT- ME 136/2010, o ensaio de Resistência à tração por Compressão Diametral o ensaio foi realizado com a aplicação de duas forças de compressão concentradas e diametralmente opostas de compressão e executado com uma prensa mecânica com êmbolo movimentando se a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s com sensibilidade igual ou inferior a 19,6N. Foram obtidos os valores da altura e diâmetro dos corpos de prova com um parquímetro e depois condicionados durante período de 2 horas a uma temperatura de $25 \pm 0,5$ °C. Os corpos de provas foram submetidos a carga até seu rompimento, foram compactados 12 CPs, sendo 3 para cada teor.

4 Resultados e Discussões

4.1. Caracterização dos Agregados

A caracterização dos agregados calcários do tipo: Brita 1, Brita 0 e Pó de Pedra encontram-se na Tabela 1, assim como os limites estabelecidos por normas

Tabela 1 - Caracterização dos agregados.

Ensaio	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	Limites
Densidade Real (g/cm ³)	2,86	2,73	2,77	-
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,83	2,7	-	-
Absorção (%)	0,39	0,38	-	-
Abrasão Los Angeles	21,1	21,3	-	máx 35%
Equivalente de Areia (%)	-	-	78,5	mín 35%
Adesividade	Satisfatório	-	-	-

4.2. Caracterização do Ligante

A caracterização do ligante asfáltico CAP 30/45 encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização do CAP 30/45.

Ensaio	CAP 30/45		Limites ANP
Viscosidade Saybolt-Furol	135°C	289 seg	mín 192 seg
	150°C	142,5 seg	mín 90 seg
	177°C	50,2 seg	40 a 150 seg
Penetração (mm)	32		30 a 45
Ponto de Amolecimento (°C)	52,4		mín 52
Densidade (g/cm ³)	1,009		-

4.3. Caracterização dos flakes de PET

A Tabela 3 apresenta a granulometria realizado conforme as especificações DNER-083/98 dos flakes de garrafa PET. De acordo com Arão (2016), a granulometria dos flakes não pode ser considerada real, devido à grande parte do material ser laminar, leve e flexível.



Tabela 3 - Percentual passante da distribuição das partículas dos *flakes* de PET.

Série ASTM	Abertura (mm)	% Passante
3/8"	9,5	100
Nº 4	4,8	3,62
Nº 10	2	0,56
Nº 40	0,42	0,28
Nº 80	0,18	0,08
Nº 200	0,075	0,08

4.4. Composição dos Teores

O teor ótimo de ligante estabelecido foi de 4,2%, apesar da 031/2006 – ES (DNIT, 2006) especificar que para camada de rolamento, o teor de ligante mínimo é de 4,5%, optou-se por não refazer a dosagem do teor ótimo, visto que, o volume de vazios, a relação betume/vazios, Estabilidade e Resistência à Tração por Compressão Diametral estavam dentro dos limites determinados por norma.

A porcentagem em peso de cada material está apresentada na Tabela 4. A adição de *flakes* de PET ocorreu durante o processo de aquecimento dos agregados em estufa.

Tabela 4 - Composição dos Teores

Teor	T1	T2	T3	T4
Teor de ligante (%)	4,20	4,14	4,12	4,10
Brita 1 (%)	19,16	18,87	18,8	18,68
Brita 0 (%)	25,87	25,47	25,3	25,21
Pó de Pedra (%)	50,77	50,02	49,8	49,51
<i>Flakes</i> de PET 4,8 mm (%)	-	1,5	2	2,5

4.5. Parâmetros Volumétricos

A Tabela 5 apresenta os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas com e sem adição de PET.

Tabela 5 - Parâmetros volumétricos das misturas.

Teor	T1	T2	T3	T4	Limites
Teor de ligante (%)	4,2	4,14	4,12	4,10	-
Densidade Real da Mistura (g/cm ³)	2,775	2,732	2,718	2,704	-
Densidade Teórica (g/cm ³)	2,585	2,552	2,541	2,530	-
% de Vazios	4,6	5,0	5,3	6,6	3 - 5
Vazios Cheios de Betume (VCB)	10,3	10,0	9,9	9,7	-
Vazios do Agreg. Mineral (VAM)	15,0	15,1	15,1	16,3	mín 15
Relação Betume/Vazios (RBV)	68,6	66,6	65,7	59,3	75 - 82

Todos os teores apresentaram uma relação betume/vazios inferior ao estabelecido pela 031/2006 – ES (DNIT, 2006) para a camada de rolamento, porém o subitem C, item 5.2, determina que as misturas devem atender às especificações da relação betume/vazios ou aos mínimos de Vazios do Agregado Mineral (VAM), no qual o valor mínimo é de 15% para misturas com tamanho máximo de agregado de 19,1mm, ou seja, todas as misturas atendem os parâmetros de VAM e devido a densidade dos *flakes* de PET ser inferior comparada com os agregados da mistura, gerou traços menos densos.

Devido a retirada de parte do ligante asfáltico na presente pesquisa, houve uma discrepância com os resultados do trabalho realizado por Arão (2016), no qual o volume de vazios (V_v) diminuiu nas misturas com a adição de garrafa PET e a Relação Betume/vazios (RBV) aumentou. A pesquisa realizada por Silva *et al.* (2013) também verificou um aumento do V_v e diminuição da RBV à medida que se acrescentou pó de PET as misturas.

4.6. Estabilidade e Fluência Marshall

A seguir são apresentados os resultados do ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall.

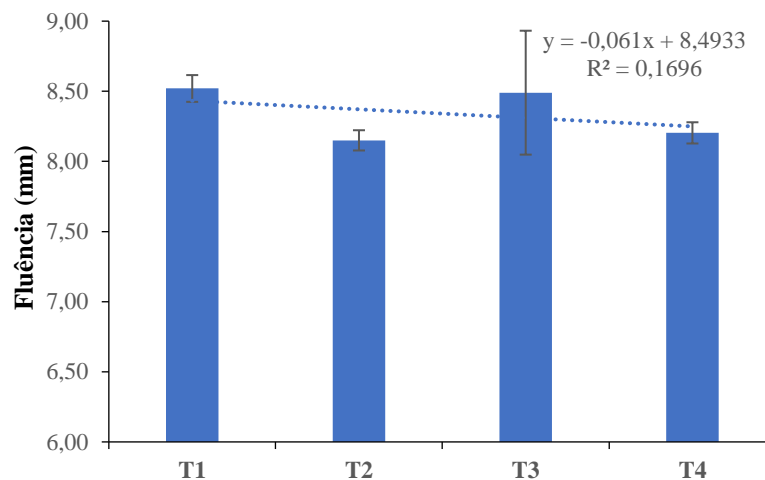


Figura 2 - Resultados do ensaio de Fluência.

Não houve um aumento ou diminuição relevante da Fluência do teor convencional comparado com os teores com adição de *flakes* de PET, no qual todos mantiveram próximos de 8,3 mm de deslocamento.

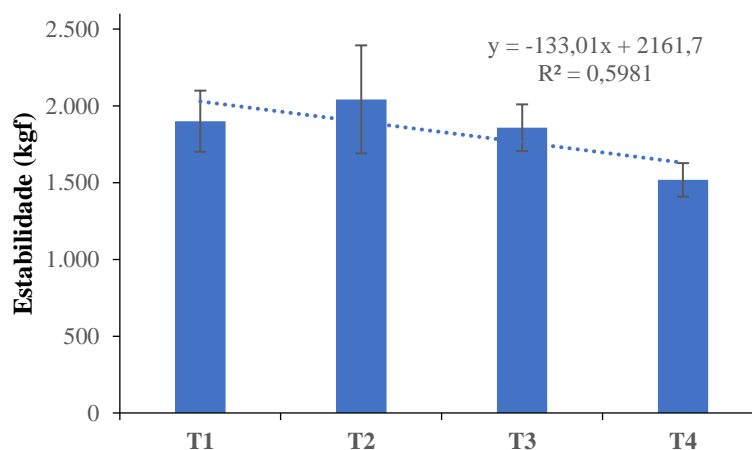


Figura 3 - Resultados do ensaio de Estabilidade.

É possível observar uma certa tendência na perda de Estabilidade das misturas com as adições de *flakes* de PET. Os Teores T1 e T3 apresentaram além da Fluência, uma Estabilidade semelhante. A adição de 2,5% de *flakes* de PET no Teor T4 influenciou na rigidez da mistura. A alteração do entrosamento das partículas ao acrescentar os *flakes*, assim como a diminuição do teor do ligante pode ter ocasionado a perda de estabilidade.

4.7. Resistência à tração por Compressão Diametral

O resultado foi obtido através da média amostral obtida por meio do rompimento de três corpos de prova por teor e são apresentados na Figura 4.

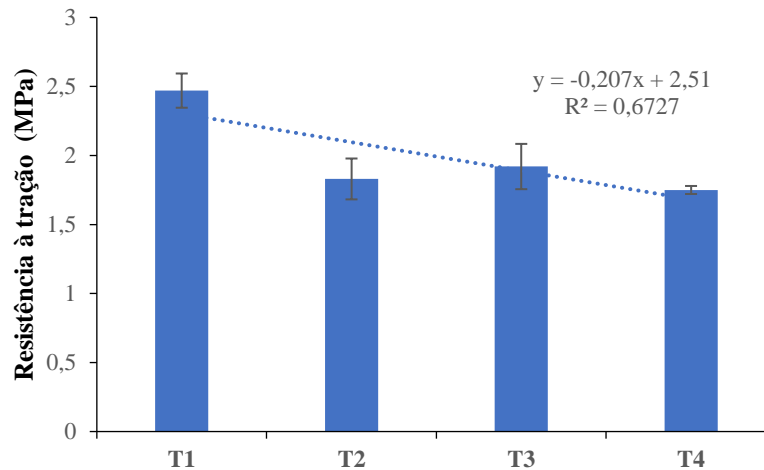


Figura 4 - Valores de resistência à tração por compressão diametral.

Assim como o Vv e a Gmb , a RT apresentou uma tendência de redução na medida em que a porcentagem de PET aumentou nos teores, porém com valores muito superiores ao exigido por norma. De acordo com a 031/2006 – ES (DNIT, 2006), a camada de rolamento deve apresentar uma resistência à tração de no mínimo 0,65 MPa, desta forma, o menor valor obtido nos ensaios do teor T4 atende a esta especificação estabelecida pela norma.

O Teor T1 apresentou uma resistência à tração maior, cerca de 25% comparado os teores com adição de garrafa PET. Os teores T2, T3 e T4 apresentaram valores similares, sendo que o teor T3 apresentou o maior valor entre eles e o Teor T4 o menor valor. No trabalho de Arão (2016), a mistura com 1,0% de *flakes* de 2mm atingiu a resistência de 1,87 MPa, valor semelhante ao encontrado na presente pesquisa. Silva *et al.* (2013) avaliou que os valores de Resistência à Tração diminuíram conforme acrescentou pó de PET as misturas, adições acima de 7,5% de pó de PET apresentaram uma resistência inferior ao exigido por norma.

5 Conclusão

O estudo com adição de *flakes* de PET em diferentes proporções, assim como a retirada de parte do ligante asfáltico, gerou uma técnica ainda desconhecida para o desempenho de pavimentos, apresentando no geral um prejuízo nas propriedades mecânicas e físicas, porém com um ganho financeiro e ambiental significativo. De acordo com Arão (2016) em uma via com duas faixas de rolamento com 6 metros de largura cada, com uma espessura de revestimento asfáltico de 5 cm, a adição de 1,0% de *flakes* de PET geraria o consumo aproximado de 268 mil garrafas PET por quilômetro, cerca de 0,002% do total de consumo estimado de garrafas em 2016.

Apenas os teores T1 e T2 atenderam satisfatoriamente aos critérios considerados para a determinação do teor de projeto. O Teor T3 e T4 não atenderam nos critérios de volume de vazios (Vv), devido a redução do ligante asfáltico e baixa densidade dos *flakes* de PET. A adição de *flakes* de PET gerou densidades máximas teóricas (DMT) menores, induzindo ao aumento do volume de vazios.

As adições de *flakes* de garrafa PET não influenciaram de forma efetiva na Fluência das misturas. Normas mais recentes como a 031/2006 – ES (DNIT, 2006) não fazem menção a Fluência, logo este parâmetro não foi considerado pertinente. Os resultados dos ensaios de Estabilidade foram satisfatórios, o teor com 1,5% de *flakes* (T2) apresentou uma estabilidade maior comparada com o teor convencional, além disso, percebe-se

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



que o Teor T2 apresentou um CV alto, uma possível explicação é devido à grande variabilidade dos *flakes* de PET que trazem também os materiais das tampas das garrafas. Em relação a Resistência à Tração por Compressão Diametral, foi verificado uma redução nos teores com adição de *flakes* de PET comparado com o teor tradicional, porém sem comprometer o ótimo desempenho.

Baseado nos resultados apresentados, a utilização de PET mostrou-se promissora do ponto de vista mecânico e ambiental, sendo sua aplicação mais factível em vias de menor tráfego ou em ciclovias, levando em consideração também o efeito da temperatura no pavimento, a fim de evitar grandes deformações. Contudo, é necessário realizar mais estudos no sentido de identificar a efetiva contribuição da PET em misturas asfálticas, como a realização de ensaios mecânicos, análise química, granulométrica, quantidade máxima de material a ser incorporado e os métodos de adições.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos do Centro Universitário de Brasília, do laboratório de asfalto do DER/DF e do InfraLab (UnB) por cederem o espaço e pelo auxílio na realização dos ensaios, fundamentais para a realização e sucesso da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPET. Décimo Censo da Reciclagem do PET no Brasil. Associação Brasileira da Indústria do PET, São Paulo, 2016.
- Agência Nacional de Petróleo (ANP). Resolução ANP N°19, de 11 de julho de 2005.
- Arão, M. Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a Inserção de Polietileno Tereftalato (PET) triturado. Rio de Janeiro, 2016. Dissertação de Mestrado- Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa CNT de Rodovias 2019: Relatório gerencial. Brasília. 2017.
- Dellabianca, L. M. A. Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ES 031/2006. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. ME 083/98. Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. ME 136/2010. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas –Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.
- Franco, F. A. C. P. Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2007.
- Lavillei, S., Taylor, M. The Guardian. A million bottles a minute: world's plastic binge 'as dangerous as climate change. Londres. 2017.
- Silva, J. A. A.; Rodrigues, J. K. G.; Lucena, L. C.; Lucena, A. E.; Patricio, J. D. Estudo da utilização do politereftalato de etileno (PET) para compor as misturas asfálticas dos revestimentos rodoviários. 42ª Reunião Anual de Pavimentação e 16º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Gramado, 2013.