

ESTUDO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE GARRAFAS PET PÓS-CONSUMO EM MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE

Adriéli Raquel da Silva Räder

Bruna Calabria Diniz

Diego Menegusso Pires

Gabriela Fanck dos Santos

Alifer Andrei Veber Beier

José Antônio Santanna Echeverria

Departamento de Ciências Exatas e Engenharias - DCEEng

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ

RESUMO

O presente estudo baseia-se na análise laboratorial das propriedades de misturas asfálticas modificadas com teores de 0,7% e 1,5% de resíduos provenientes da moagem de garrafas PET pós-consumo, em substituição de uma fração do agregado miúdo. Foram utilizados dois materiais diferentes, o pó e o flake de PET, onde as misturas foram enquadradas na faixa C do DNIT. O método de dosagem seguiu a metodologia Marshall, onde resultaram em teores de ligante diferentes para cada quantidade de resíduo, apresentando aumento para as misturas com 1,5% de resíduo e redução para as misturas com 0,7% de PET, em comparação a mistura referência. As misturas foram submetidas aos ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência a tração por compressão diametral, dano por umidade induzida e módulo de resiliência. No geral, tem-se que as misturas com 0,7% do resíduo apresentaram melhores resultados, além de tornarem-se mais econômicas pelo fato de consumirem menor teor de ligante.

ABSTRACT

This research is based on analysis of properties of altered asphalt mixtures with 0,7% and 1,5% content of residue levels resulting of PET bottles milling post-consumer, on replacement a fraction of the small aggregate. It was used two different materials, PET's powder and flake, on this research were adhere to C curve of DNIT. The dosing method follow the Marshall methodology, that was resulted on different binder content for each quantity of PET waste, presented increase and decrease for mixtures with 1,5% and 0,7% of PET, respectively, in comparison to reference mixture. The mixtures were subjected to stability test, creep test and relation stability/creep test, indirect tensile strength, moisture susceptibility, and resilient modulus, prompted moisture damage and resilient modulus (RM). In this study was observed that the mixtures with 0,7% of PET waste presented better results, besides which become more economics due to the lower consumption of asphalt binder.

1. INTRODUÇÃO

A correta disposição dos materiais plásticos sobre o meio ambiente continua sendo uma das principais preocupações de organizações públicas e privadas, onde a busca pelo desenvolvimento sustentável tem fomentado o estudo de diferentes formas de destinação final destes resíduos, entre eles o Politereftalato de Etileno (PET) (SILVA et al., 2013). Segundo Pontes (2016), no ano de 2015, apenas 274 mil toneladas de PET tiveram sua adequada destinação, o que representa somente 51% de todo o material descartado no país, sendo que o restante, 49%, soma-se aos demais resíduos que são depositados em aterros, muitas vezes, irregulares.

A reutilização de resíduos sólidos diminui a quantidade de matéria-prima utilizada, preservando os recursos naturais e minimizando, assim, os impactos ambientais (ARAO, 2016). Segundo o autor, a incorporação de materiais alternativos na pavimentação, em muitos casos, gera um menor custo de construção, além de melhorar as propriedades mecânicas, fazendo com que pesquisas e investimentos nestes materiais sejam cada vez mais estimulados.

Apesar da grande maioria das rodovias brasileiras apresentarem algum tipo de deficiência, o

modal rodoviário ainda é o meio mais utilizado para o crescimento econômico do país. Diante disso, é de suma importância que os pavimentos sejam dimensionados e projetados para que possam apresentar maior vida útil, conforto e segurança aos usuários além de mostrarem-se viáveis, tanto economicamente quanto ambientalmente (QUEIROZ, 2016).

Com isso, tem-se buscado alternativas para que os pavimentos passem a apresentar um melhor comportamento afim de evitar o aparecimento de algum tipo de patologia precoce e, conseqüentemente, uma maior vida útil. Dessa maneira, são investigados novos materiais para aperfeiçoar suas características mecânicas (ARAO, 2016).

As propriedades do Politereftalato de Etileno, como a baixa densidade e a elevada resistência mecânica e química, indicam que esse material pode ser utilizado para melhorar as características do revestimento asfáltico (ARAO et al., 2017). Partindo disso, um estudo realizado por Silva (2015), declarou que o resíduo das garrafas PET pós-consumo, por se apresentar como um plastômero, é capaz de aumentar a rigidez, podendo proporcionar o aumento da vida útil do pavimento em regiões com clima tropical com temperaturas elevadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram agregados pétreos graúdos e miúdos de origem basáltica, pó de pedra, cal, CAP 50/70 e garrafas PET trituradas. O PET apresentou-se dividido em dois materiais distintos: o flake e o pó. O flake foi utilizado em sua forma comercial, e o pó utilizado foi aquele passante na peneira 2,00mm e retido na 0,42mm, possibilitando que a maior quantidade de rótulos fosse retirada.

Para avaliar o efeito do Politereftalato de Etileno nas misturas asfálticas, foram realizadas cinco diferentes amostras, sendo a referência (sem adição de resíduo), com adição de 0,7% e 1,5% de pó de PET e adição de 0,7% e 1,5% flake de PET, de acordo com a faixa C do DNT. A determinação dos teores do resíduo a serem utilizados partiu-se de um estudo anterior realizado neste mesmo grupo de pesquisa, o qual realizou a substituição de pó de pedra por borracha moída de pneu pelo processo à seco, para uma futura comparação entre os resíduos utilizados.

Os corpos de prova foram submetidos ao método de dosagem Marshall e aos seguintes ensaios mecânicos: resistência a tração por compressão diametral, módulo de resiliência e dano por umidade induzida. Além disso, foi realizada a granulometria de cada material constituinte, como também determinadas sua densidades.

2.1. Materiais

Os materiais pétreos são provenientes da pedreira Monego do município de Cruz Alta – RS. Foram utilizados os agregados designados como brita 1”, brita 3/4”, brita 3/8” e pó de pedra. A cal utilizada foi do tipo dolomítica, oriunda da empresa FIDA de Caçapava do Sul – RS. O resíduo de PET foi doado pela empresa Masterflake, da cidade de Guaíba – RS. A granulometria dos materiais foi realizada através da norma DAER/RS - EL 102/01, onde os resultados podem ser visualizados na Figura 1.

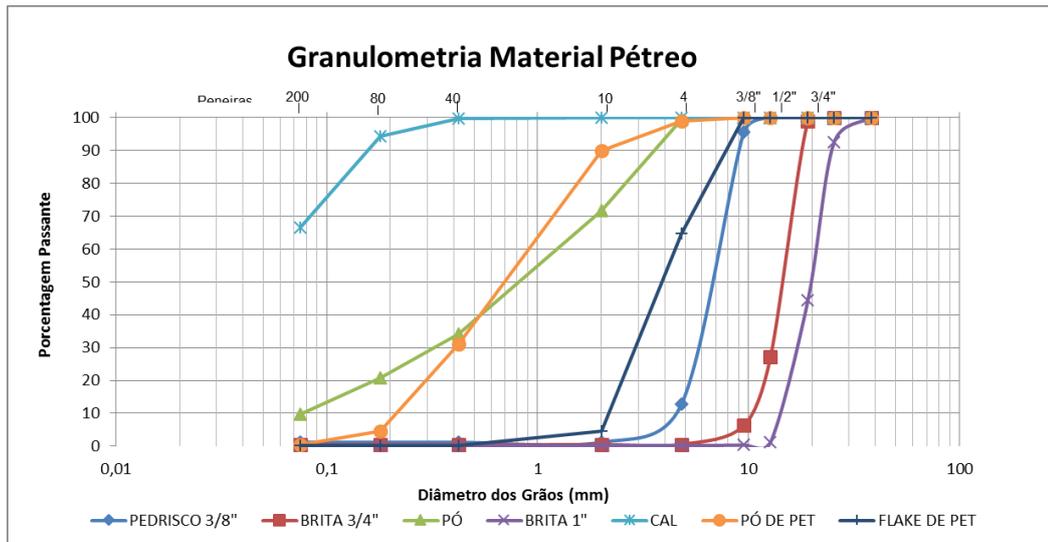


Figura 1: Curva granulométrica dos materiais

Quanto a determinação das massas específicas dos materiais, os resultados e as normativas utilizadas podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1: Massas específicas dos materiais

Material	Resultado (g/cm ³)	Norma
Agregado graúdo	3,003	DAER/RS-EL 105/2001
Agregado miúdo	2,962	DNER – ME 084/1995
Cal	2,537	NBR NM 23/2000
CAP	1,017	DNER-ME 193/1996

Para a densidade do resíduo de PET foi adotado o valor de 1,35 g/cm³ de acordo com os estudos realizados por Queiroz (2016) *apud* Moghaddam, Karim e Syammaun (2012), devido a impossibilidade de realização do ensaio, pois a baixa densidade do material fez com que as partículas boiassem, impossibilitando a saída dos vazios.

O resíduo de PET utilizado, como já mencionado, foi em dois tipos diferentes: o pó e o flake. A Figura 2 ilustra o aspecto dos insumos.



Figura 2: Aspecto do pó e flake de PET

Para a utilização do pó de PET, este foi peneirado nas peneiras de abertura 2,00 e 0,42 mm, onde o PET utilizado foi o passante na peneira de 2,00 mm e retido na de 0,42 mm para que a maior quantidade de rótulos fosse retirada, conforme é evidenciado na Figura 3.



Figura 3: Pó de PET após peneiramento

Para o material denominado flake de PET, optou-se pela sua utilização de acordo com sua forma comercial, ou seja, não foi realizado nenhum tipo de peneiramento para que não houvesse a criação de um novo material que não estaria diretamente disponível no mercado.

As misturas com 0,7% de PET tiveram substituição do pó de pedra por PET nas peneiras de nº 10, 40, 80 e fundo, totalizando 8,4g de resíduo na mistura. Já as misturas com 1,5% de resíduo apresentaram substituição nas peneiras de nº 10, 40, 80, 200 e fundo, com um total de 18g de resíduo na mistura.

2.2. Métodos

Os ensaios mecânicos foram realizados de acordo com as normas apresentadas na Tabela 2. O método de dosagem seguiu a metodologia Marshall, conforme a norma DNIT - ME 043/95, com corpos de prova compactados a 75 golpes por compactador manual disponível no Laboratório de Engenharia Civil da Unijuí.

Tabela 2: Ensaios realizados

Ensaios	Normativas
Estabilidade e Fluência Marshall	DNIT - ME 043/95
Resistência a tração por compressão diametral	DNIT – ME 136/2010
Módulo de resiliência	DNIT – ME 135/2010
Dano por umidade induzida	NBR 15617/2015

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios mecânicos foram realizados em cinco misturas diferentes, sendo: referência, mistura 0,7% pó PET, 0,7% flake PET, 1,5% pó PET e 1,5% flake PET. A determinação do teor ideal de ligante levou em conta, principalmente, o volume de vazios apresentado por cada mistura. Com isso, houve queda no teor de ligante para as mistura modificadas com 0,7% de resíduo, contudo as misturas com maior quantidade de PET, 1,5%, apresentaram aumento no consumo de CAP, conforme pode ser observado na Tabela 3.

O aumento e a redução no consumo de ligante para as misturas modificadas com PET pode ser explicado conforme relato de Moghaddam, Soltani e Karim (2014), onde os autores constataram que as partículas sólidas de PET quando utilizadas em pequenas quantidades, preenchem os vazios entre os agregados, fazendo com que a massa específica aparente aumente, contudo, quando a quantidade de partículas for alta, estas se concentram entre os agregados e aumentam o volume da mistura ocasionando uma redução da massa específica aparente e conseqüente aumento no teor de ligante.

Tabela 3: Teor de ligante nas misturas

Mistura	Teor de ligante (%)	Teor de ligante (g)
Referência	5,4	68,5
0,7% pó PET	5,2	65,8
1,5% pó PET	5,7	72,5
0,7% flake PET	5,2	65,8
1,5% flake PET	5,7	72,5

Os resultados encontrados para a estabilidade Marshall são apresentados na Figura 4.

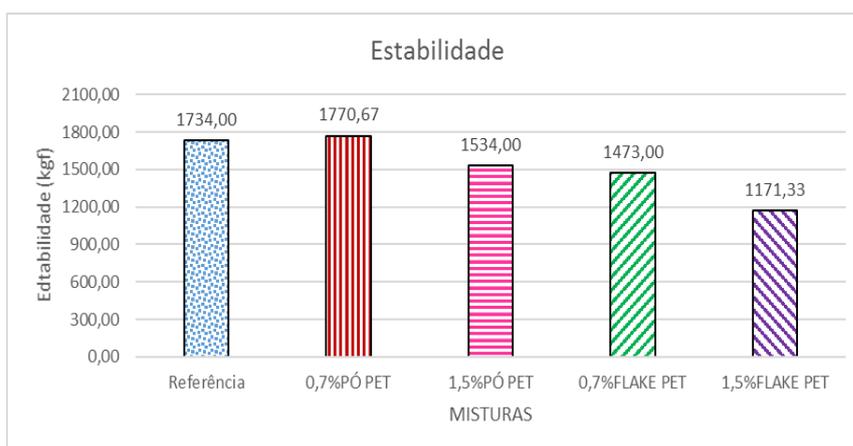


Figura 4: Estabilidade Marshall

Os valores para a estabilidade revelam que houve um leve aumento na mistura 0,7% pó PET, onde pode-se dizer que o resíduo melhorou o entrosamento das partículas, porém o restante das amostras apresentaram queda nos valores. Contudo, de acordo com o indicado pela norma DNIT 031 (2006) como valor mínimo para a estabilidade em 500 kgf, todas as misturas exibiram resultados acima do especificado.

Além disso, é possível observar que, ao analisar as misturas modificadas em função da porcentagem de resíduo adicionado, ou seja, considerando as misturas com 0,7% de resíduo, percebe-se que houve redução da mistura com pó de PET para a mistura com flake de PET, assim como também ocorre nas misturas com 1,5% de resíduo. O mesmo acontece ao analisar as misturas em função do tipo de resíduo, onde houve uma diminuição da estabilidade nas misturas com pó de PET e também com flake de PET à medida que a quantidade de resíduo aumentou.

Com isso, pode-se concluir que a rigidez das misturas modificadas, no geral, diminuiu se

comparadas ao valor da mistura referência, em especial com a adição de flakes de PET, onde este tipo de resíduo pode ter dificultado o entrosamento dos agregados.

Os resultados encontrados para a fluência Marshall são apresentados na Figura 4.

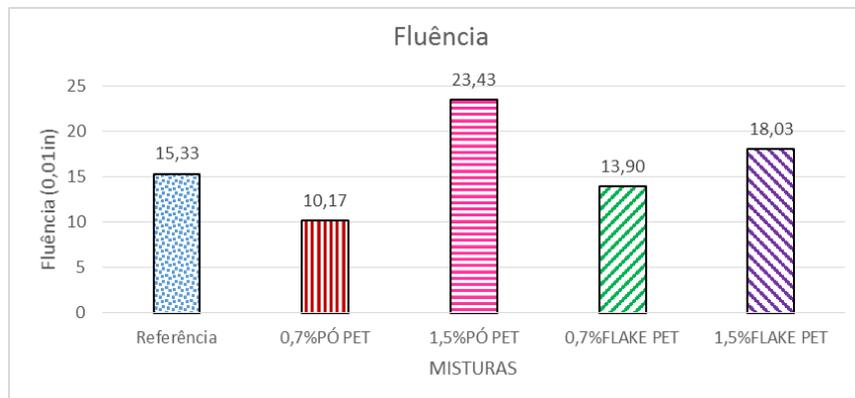


Figura 5: Fluência Marshall

Os resultados encontrados para a fluência, que de acordo com a norma DAER/RS – EL 217 (2001) deve estar inscrita na faixa de 8 à 16/0.01in, pode-se perceber que todas as misturas, exceto a 1,5% pó PET e 1,5% flake PET, apresentaram valores dentro do recomendado. Além disso, houve um aumento nas misturas com 0,7% de resíduo, da mistura com pó para a com flake e queda nas misturas com 1,5% de PET, na mesma comparação.

Com isso, ressalta-se que o resíduo quando adicionado em maiores quantidades, foi capaz de melhorar a capacidade elástica das misturas, porém acima da faixa estabelecida, e nas misturas com menores quantidades, este fez com que o índice de deformação diminuísse.

Os resultados encontrados para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral podem ser visualizados na Figura 6.

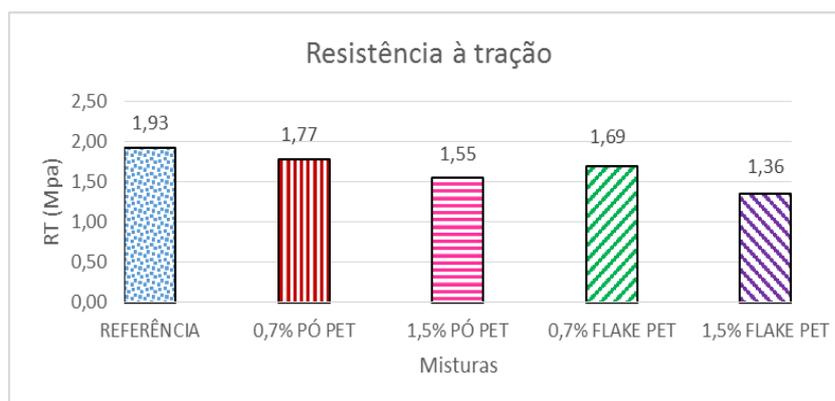


Figura 6: Resistência a tração por compressão diametral

É notória a queda dos valores de RT para as misturas que possuem o resíduo de PET em sua composição, tanto em relação ao teor de resíduo como também ao tipo do mesmo. Contudo, conforme os valores destacados por Bernucci *et al.* (2008) para a resistência, entre 0,5 e 2,0 MPa, pode-se dizer que as misturas modificadas exibiram resultados satisfatórios, onde conclui-se que o resíduo tende a tornar as misturas mais flexíveis.

Os resultados encontrados podem ser considerados coerentes, pois nos estudos realizados por Moghaddam e Karim (2012) e Queiroz (2016), os autores observaram a mesma tendência, onde as misturas com maior quantidade de PET apresentaram misturas menos rígidas comparadas àquelas sem resíduo.

Os valores encontrados para o módulo de resiliência (MR) de cada mistura são observados na Figura 7.

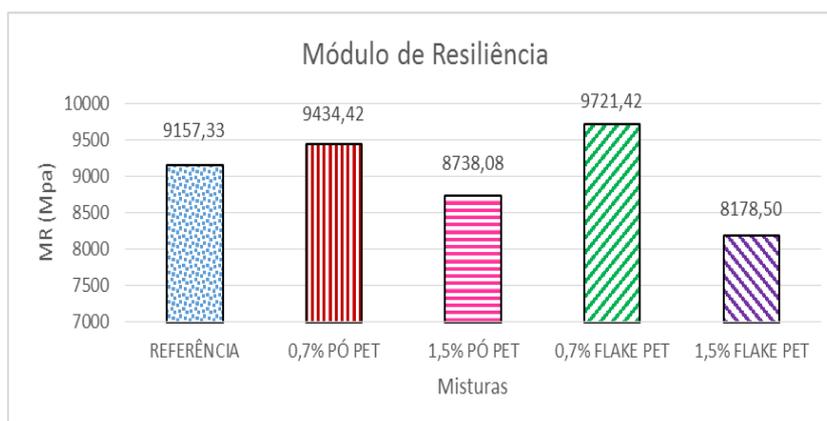


Figura 7: Módulo de resiliência

Valores típicos ao MR são trazidos por Bernucci et al. (2008), sendo considerados entre 2.000 a 8.000 MPa, para misturas de concreto asfáltico ensaiados à 25°C. Com isso, constata-se que nenhuma mistura situou-se entre a faixa da literatura considerada. Além disso, pode-se perceber que as misturas com 0,7% de resíduo apresentaram aumento no módulo resiliente em relação a mistura referência. Já as amostras com 1,5% de PET fizeram com que o MR apresentasse queda significativa, em especial a mistura com flake.

Conclui-se, portanto, que o MR variou de forma inversa à adição dos resíduos, com isso, pode-se dizer que as misturas com maiores quantidades de PET apresentaram índices maiores de deformações elásticas recuperáveis. Este mesmo comportamento foi encontrado na pesquisa realizada por Arao (2016), onde o autor estudou misturas com adição de flakes nos tamanhos de 2,00 e 10,00mm nos teores de 0,5% e 1,0%, como também a substituição de 2,5% do pó de pedra por pó de PET.

Além disso, o autor disserta que como o ponto de fusão do PET é alto, em torno de 250°C, ele não derrete quando incorporado à mistura, porém a temperatura a que a mistura asfáltica é submetida pode alterar algumas características do resíduo, como sua temperatura de transição vítrea, 70°C, deixando as misturas com mais flexibilidade e menores valores para o MR (ARAÓ, 2016). Por outro lado, pode-se considerar que quando o resíduo foi introduzido na mistura em menores quantidades, este foi capaz de preencher os vazios e aumentar a rigidez da mistura.

O dano por umidade induzida, capaz de avaliar a adesividade existente entre agregado-ligante, tem seus valores apresentados na Figura 8.

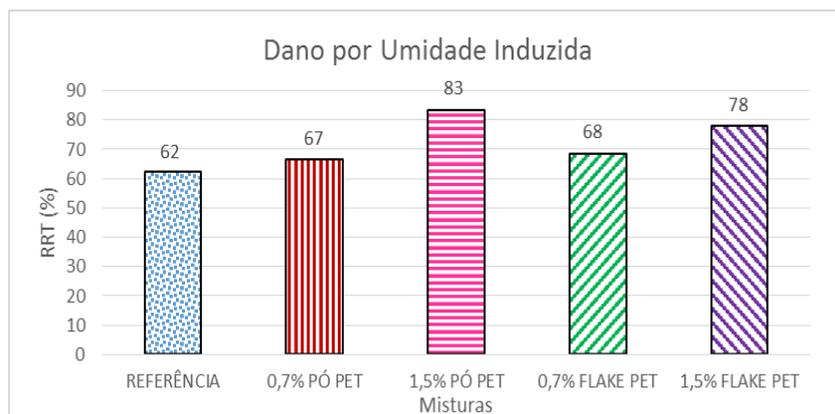


Figura 8: Dano por umidade induzida

Nota-se aumento em todas as misturas modificadas com PET em relação a mistura referência, especialmente nas que apresentam o flake em sua composição. Contudo, conforme dissertam Bernucci et al. (2008), o valor mínimo de RRT é de 70% para que a amostra do ensaio seja considerada aprovada. Com isso, apenas as misturas com a maior quantidade de resíduo podem ser julgadas aprovadas.

A mistura dita como referência apresentou o menor valor para o dano por umidade induzida. Como possível causa, Gouveia et al. (2014), destacam que a absorção de ligante pelo agregado pode ter influência no que diz respeito a adesividade. Os autores dissertam que se esta característica for muito alta, o filme de asfalto sobre o agregado diminui, tornando a mistura mais sensível à ação da água.

Assim sendo, é possível constatar melhoria nas características de adesividade agregado-ligante com a adição do resíduo de PET, principalmente nas misturas com maior quantidade deste, conforme constata os estudos realizados por Queiroz (2016), em misturas porosas.

4. CONCLUSÕES

Pode-se concluir, a partir dos resultados encontrados, que a utilização dos resíduos provenientes da moagem de garrafas PET pós-consumo como material constituinte de misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico é promissora.

Em primeiro instante, percebe-se que as misturas com 0,7% proporcionaram uma queda no teor de ligante em 3,7%. Porém, as misturas com 1,5% de PET apresentaram um aumento de 5,56%, ultrapassando o teor de ligante requerido pela mistura referência.

Para os parâmetros de estabilidade e fluência Marshall, pode-se notar que para a estabilidade, todas as misturas mostraram valores acima da especificado, 500 kgf. Já para a fluência, as misturas modificadas com a maior quantidade de resíduo, 1,5%, expressaram valores acima do estabelecido, 8 a 16/0,01in, e as misturas com 0,7% apresentaram redução no valores, porém dentro da faixa indicada.

Em relação a resistência a tração, todas as misturas aditivadas apresentaram diminuição nos valores de RT, onde as misturas com 1,5% de resíduo exibiram a maior queda nos valores. Ainda assim, todas as misturas apresentaram bons resultados, estando estes dentro dos parâmetros exibidos pela literatura analisada.

Para o ensaio do módulo de resiliência, pode-se perceber que as misturas com 0,7% de aditivo exibiram aumento no MR em relação a mistura referência, enquanto que as misturas com 1,5% fizeram com que o MR diminuísse. Salienta-se, portanto, que a adição do resíduo é inversamente proporcional ao módulo resiliente, fazendo com que as misturas com 0,7% de PET apresentem revestimentos asfálticos com consistência mais dura e as misturas com 1,5% maiores índices de deformações recuperáveis.

A avaliação do dano causado pela umidade nas misturas mostrou que todas as misturas exibiram valores acima da mistura referência. Dessa maneira, é possível obter resultados satisfatórios em relação a adesividade agregado-ligante nas misturas modificadas com PET, onde o resíduo foi capaz de minimizar os efeitos prejudiciais da umidade nos pavimentos.

De uma forma geral, contata-se que as misturas com 0,7% de PET apresentaram menor consumo de ligante, mostrando-se como uma alternativa mais econômica. Ainda, pode-se notar que os melhores resultados de modo geral foram encontrados para estas misturas, principalmente a mistura 0,7% pó PET.

Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Masterflake pela doação do resíduo utilizado neste trabalho, ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Unijuí e ao GEPPASV (Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária) da UFSM (Universidade Federal de Santa Maria).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arao, M. (2016) *Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a Inserção de Polietileno Tereftalato (PET) Triturado*. 2016. 114 f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ABNT (2015) NBR 15617: *Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Bernucci, L. B.; L. M. G. Motta; J. A. P. Ceratti; J. B. Soares (2008) *Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 504p. II.
- DAER/RS (2001) 102 - EL: *Análise granulométrica dos agregados*. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. Manual de ensaios, v. 2.
- DAER (2001) 217 - EL: *Ensaio Marshall para misturas betuminosas*. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. Manual de ensaios, v. 2.
- DNER (1995) 043 - ME: *Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall*, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ.
- DNIT (2010) 135 - ME: *Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, Rio de Janeiro – RJ.
- DNIT (2010) 136 - ME: *Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, Rio de Janeiro – RJ, 2010.
- DNIT (2006) 031 - ES: *Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, Rio de Janeiro.
- Gouveia, L. T.; A. P. Furlan; A. B. Pereira; J. L. F Júnior e G. T. P. Fabbri (2014) *Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade*. Departamento de Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- Moghaddam, T. B e M. R. Karim (2012) Properties of SMA mixtures containing waste polyethylene terephthalate. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v.6, p. 612-622.
- Moghaddam, T. B.; M. Soltani e M. R. Karim (2014) Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified an Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Construction and Building Materials*, v. 53, p. 317-324.
- Pontes, N. (2016) Brasil deixa de reciclar metade das garrafas PET jogadas no lixo. *Folha de São Paulo*. São Paulo: Grupo Folha, [1921?] - Diário.
- Queiroz, B. O. (2016) *Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas modificadas com Politereftalato*

de Etileno (PET). 125 f. Dissertação de Mestrado – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

Silva, J. A. A.; J. K. R. Guedes; L. C. Lucena; A. E. Lucena; J. D. Patricio (2013) Estudo da utilização do politereftalato de etileno (PET) para compor as misturas asfálticas dos revestimentos rodoviários. *Anais da 42ª Reunião Anual de Pavimentação e 16º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária*, RAPv, Gramado.

Silva, J. A. A. (2015) *A utilização do politereftalato de etileno (PET) em misturas asfálticas*. 2015. 141 f. Tese – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.