

**FACULDADE DOCTUM
ANA LETÍCIA VIDAL RODRIGUES
SHEILA DA SILVA COELHO
THAÍS DE CASTRO SAMPAIO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TRABALHOS QUE ABORDAM PET
ADICIONADO NA DOSAGEM DE PAVIMENTO**

Juiz de Fora
2019

**ANA LETÍCIA VIDAL RODRIGUES
SHEILA DA SILVA COELHO
THAÍS DE CASTRO SAMPAIO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TRABALHOS QUE ABORDAM PET
ADICIONADO NA DOSAGEM DE PAVIMENTO**

Monografia de Conclusão de Curso,
apresentada ao curso de Engenharia
Civil, Faculdade Doctum de Juiz de Fora,
como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. MSc. Liércio Feital
Motta Júnior

Juiz de Fora
2019

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca Faculdade Doctum/JF

Rodrigues, Ana L. V.
Estudo Comparativo entre trabalhos que abordam PET
adicionado na dosagem do pavimento/ Ana L. V. Rodrigues,
Sheila S. Coelho, Thaís C. Sampaio - 2019.
82f.

Monografia (Curso de Engenharia Civil) –
Faculdade Doctum Juiz de Fora.

1. Pavimentação Asfáltica. 2. Politereftalato de Etileno
I. Estudo Comparativo entre trabalhos que abordam PET
adicionado na dosagem do pavimento. II Faculdade Doctum
Juiz de Fora

**ANA LETÍCIA VIDAL RODRIGUES
SHEILA DA SILVA COELHO
THAÍS DE CASTRO SAMPAIO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TRABALHOS QUE ABORDAM PET
ADICIONADO NA DOSAGEM DE PAVIMENTO**

Monografia de Conclusão de Curso,
submetida à Faculdade Doctum de Juiz de
Fora, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil e
aprovada pela seguinte banca
examinadora.

Prof. ou Prof^a. (titulação e nome do docente)
Orientador (a) e Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Prof. ou Prof^a. (titulação e nome do docente)
Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Prof. ou Prof^a. (titulação e nome do docente)
Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Examinada em: ____/____/____.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a todos os nossos professores pelos conhecimentos transmitidos ao longo da nossa jornada acadêmica e a todas as oportunidades oferecidas pela faculdade, que permitiram nosso desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradecemos aos colegas e amigos que, de alguma forma, apoiaram e participaram da nossa trajetória pelo curso de graduação, e a todos que auxiliaram na coleta de dados e elaboração deste trabalho, direta ou indiretamente.

Somos muito gratas ao professor Liércio Feital Motta Júnior pela orientação e pelo apoio prestado no desenvolvimento deste trabalho e, antes desse, como nosso professor no curso de graduação, tendo estado sempre disponível a ajudar e ensinar.

Aos nossos queridos pais, nossos maiores motivadores, por terem dado todo suporte e amor necessário, por todo incentivo e carinho dedicados ao longo dessa jornada. Por sempre terem se feito presentes, nos ajudando a enfrentar todos os obstáculos que surgiram. Por terem colaborado com nosso crescimento pessoal e profissional, nos apoiando em nossas decisões.

Em especial, agradecemos aos nossos irmãos, pelo companheirismo e apoio de sempre. Pela motivação na busca de nossos objetivos.

E por fim a DEUS, pelo dom da vida, por tudo de maravilhoso que aconteceu em nossa vida durante esta faculdade e por nos manter sempre fortes, guiando nossos passos para a concretização dos nossos sonhos e objetivos.

RESUMO

RODRIGUES, ANA L. V.; COELHO, SHEILA S.; SAMPAIO, THAÍS C. **Estudo comparativo entre trabalhos que abordam PET adicionado na dosagem de pavimento**. 82f. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Faculdade Doctum, Juiz de Fora, 2019.

A pavimentação asfáltica tem sido alvo de inúmeras pesquisas que se concentram, de forma intensificada, na busca por soluções alternativas, econômicas e eficientemente viáveis, cujo principal objetivo está na garantia da qualidade, resistência e durabilidade dos pavimentos. A utilização de polímeros, em particular, dos resíduos gerados através de garrafas PET pós-consumo, tem ganhado destaque neste campo, uma vez que as propriedades do polietileno tereftalato indicam que este material pode ser empregado para melhorar as características mecânicas e reológicas das misturas asfálticas. Neste contexto, este trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica, que tem como finalidade realizar um comparativo entre misturas asfálticas incorporadas com determinados teores de pó e *flakes* de PET, em substituição parcial dos agregados. A metodologia aqui proposta, visa uma análise criteriosa de 5 (cinco) trabalhos já publicados, com o intuito de explorar os dados obtidos de ensaios laboratoriais, baseados no método de dosagem Marshall e nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência. A partir da exposição dos resultados de todos os trabalhos, busca-se comparar o comportamento e/ou desempenho mecânico das misturas modificadas com o mesmo teor de resíduos de PET. Conclui-se que a incorporação deste material é satisfatória e depende das propriedades do ligante e dos agregados, das temperaturas de execução dos ensaios bem como dos procedimentos realizados. Além das vantagens ambientais, atreladas à sua reciclagem e reutilização, a maioria dos resultados mostra que a inserção de tal material nas misturas asfálticas proporciona maior elasticidade, assim como um aumento na vida útil dos pavimentos, apresentando-se como uma medida alternativa em obras de pavimentação.

Palavras-chave: Pavimentação Asfáltica. Politereftalato de Etileno. Misturas Asfálticas. Dosagem Marshall.

ABSTRACT

Asphalt paving has been the subject of countless researches that focus intensively on the search for alternative, economical, and efficient solutions, whose main objective is to guarantee the quality, strength, and durability of pavements. The use of polymers, in particular, the waste generated by post-consumer PET bottles, has gained prominence in this field, since the properties of polyethylene terephthalate indicate that this material can be used to improve the mechanical and rheological characteristics of the asphalt mixtures. In this context, this work is a bibliographical review, whose purpose is to perform a comparison between asphalt mixtures incorporated with specific contents of powder and flakes of PET, in partial substitution of the aggregates. The methodology proposed here is aimed at a careful analysis of five previously published studies to explore the data obtained from laboratory tests, based on the Marshall method and the diametrical compression and resilience module tests. From the exposure of the results of all the works, it is sought to compare the behavior and/or mechanical performance of the modified mixtures with the same content of PET residues. It is concluded that the incorporation of this material is satisfactory and depends on the properties of the binder and the aggregates, the temperatures of execution of the tests as well as the procedures performed. In addition to the environmental advantages, coupled with their recycling and reuse, most of the results show that the insertion of such material in the asphalt mixtures provides greater elasticity, as well as an increase in the useful life of the pavements, presenting itself as an alternative measure in works of paving.

KEYWORDS: Asphalt Paving. Polyethylene terephthalate. Asphalt Mixtures. Marshall dosage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Pavimento Rígido (corte transversal)	21
Figura 2 – Pavimento Flexível (corte transversal)	22
Figura 3 – Distribuição dos agregados	29
Figura 4 – Preparação e moldagem da mistura	31
Figura 5 – Extração do corpo de prova do molde.....	32
Figura 6 – (a) Medição do diâmetro e (b) altura do CP	33
Figura 7 – Corpos de prova submersos em banho-maria e, (b) Prensa Marshall	35
Figura 8 – Fluxograma do método de Dosagem Superpave	37
Figura 9 – Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	38
Figura 10 – Garrafas PET limpas com base e topo cortados	43
Figura 11 – Moinho de facas	44
Figura 12 – Dimensões do pó de PET após peneiramento	48
Figura 13 – Afundamento plástico de trilha de roda	65
Figura 14 – Trincas no pavimento	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Classificação do estado geral das rodovias avaliadas.....	14
Gráfico 2 – Composição da produção nacional de termoplásticos e sua geração no RSU brasileiro em 2005	45
Gráfico 3 – Estabilidade para as misturas com 0,5% de PET e misturas – padrão ..	69
Gráfico 4 – MR/RT para as misturas com 0,5% de PET e misturas-padrão	71
Gráfico 5 – Estabilidade para as misturas com 1% de PET e misturas – padrão	72
Gráfico 6 – RT (em MPa) para as misturas com 1% de PET e misturas – padrão ...	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teor de ligante nas misturas	53
Tabela 2 – Estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e relação MR/RT	54
Tabela 3 – Descrição das misturas e teor de ligante.....	56
Tabela 4 – Estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e relação MR/RT	56
Tabela 5 – Teor de ligante, estabilidade Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e relação MR/RT	57
Tabela 6 – Teor de ligante, estabilidade Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e relação MR/RT	59
Tabela 7 – Teor de ligante, resistência à tração, módulo de resiliência e relação MR/RT	60
Tabela 8 – Propriedades e resultados das misturas aditivadas com 0%, 0,5% e 1% de PET	62
Tabela 9 – Propriedades e resultados das misturas aditivadas com 0,5% de PET e a mistura-padrão	69
Tabela 10 – Propriedades e resultados das misturas aditivadas com 1% de PET e a mistura-padrão	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ABIPET	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET
ABIPLAST	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO
ADP	ASFALTOS DILUÍDOS DE PETRÓLEO
AMB	ASFALTO MODIFICADO POR BORRACHA
AMP	ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS
ARE	AGENTES DE RECICLAGEM EMULSIONADOS
CAP	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO
CBQU	CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE
CGS	COMPACTADOR DE GIROS SUPERPAVE
CNT	CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES
CP	CORPO DE PROVA
DNIT	DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
EAP	EMULSÕES ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTAÇÃO
EAPE	EMULSÕES ASFÁLTICAS CATIÔNICAS MODIFICADAS POR POLÍMEROS ELASTOMÉRICOS
LVDT	LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSDUCER
PET	POLIETILENO TEREFTALATO
RSU	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
SUPERPAVE	SUPERIOR PERFORMANCE ASPHALT PAVEMENTS
VDM	VOLUME DIÁRIO MÉDIO

LISTA DE SÍMBOLOS

M_s	Massa seca
M_{sub}	Massa submersa em água
G_{mb}	Massa específica aparente
DMT	Massa específica máxima teórica
V	Volume dos corpos de prova
V_v	Volume de vazios
%n	Percentual em massa do agregado “n” na mistura asfáltica
%a	Teor de asfalto do grupo de CPs
VAM	Vazios do agregado mineral
G_{sb}	Massa específica aparente da mistura compactada
RBV	Relação betume/vazios
F_h	Fator da altura do corpo de prova
h	Espessura do corpo de prova
N	Volume de tráfego
N_{proj}	Número de giros de projeto
H	Altura do corpo de prova
D	Diâmetro do corpo de prova
RT	Resistência à Tração
F	Carga de ruptura
MR	Módulo de Resiliência
σ_t	Tensão de tração aplicada
ϵ_t	Deformação específica recuperável
F_R	Carga vertical repetida aplicada diametralmente no CP
Δ	Deformação elástica ou resiliente
μ	Coefficiente de Poisson

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	17
3 METODOLOGIA	18
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
4.1 Pavimento	20
4.2 Desempenho do Pavimento Asfáltico	24
4.3 Materiais empregados.....	25
4.3.1 Ligante Asfáltico	25
4.3.2 Agregados	26
4.3.2.1 Classificação dos Agregados	27
4.4 Misturas Asfálticas.....	29
4.4.1 Dosagem das Misturas Asfálticas	30
4.4.1.1 Método Marshall	31
4.4.1.2 <i>Método Superpave</i>	36
4.4.2 Ensaio Mecânicos	38
4.4.2.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral	38
4.4.2.2 <i>Módulo de Resiliência</i>	39
4.5 Asfaltos Modificados por Polímeros	40
4.6 Polietileno Tereftalato (PET).....	42
4.6.1 Fabricação do pó e flake de PET	43
4.6.2 Reciclagem do Polietileno Tereftalato	45
4.6.3 Aplicação do PET na pavimentação.....	46
4.7 Trabalhos com a execução de misturas asfálticas aditivadas com PET.....	47
4.7.1 Trabalho 01	47
4.7.2 Trabalho 02	49
4.7.3 Trabalho 03	50
4.7.4 Trabalho 04	50
4.7.5 Trabalho 05	51
5 ANÁLISE E RESULTADOS.....	53
5.1 Análise dos Resultados dos Trabalhos.....	53
5.1.1 Trabalho 01	53
5.1.2 Trabalho 02	55
5.1.3 Trabalho 03	57
5.1.4 Trabalho 04	58
5.1.5 Trabalho 05	60

5.2 Comparação dos Resultados	61
5.2.1 Teor de ligante de projeto.....	62
5.2.2 Estabilidade Marshall	63
5.2.3 Fluência Marshall	64
5.2.4 Resistência à Tração (RT).....	65
5.2.5 Módulo de Resiliência (MR)	66
5.2.6 Relação MR/RT	67
5.2.7 Misturas-Padrão	68
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
7 REFERÊNCIAS.....	77

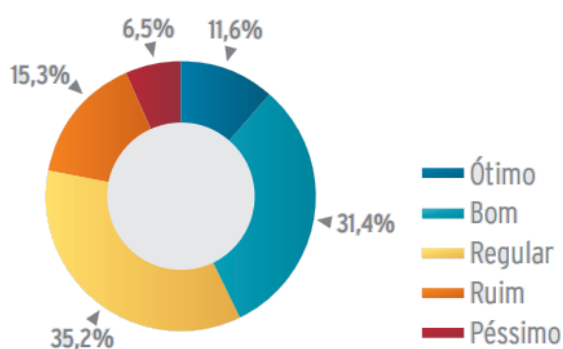
1 INTRODUÇÃO

Construídas a partir do século XIX, as rodovias são definidas como vias de trânsito terrestre de grande relevância na promoção do desenvolvimento dos países, seja em nível social, permitindo a locomoção das pessoas; ou em nível econômico, devido ao transporte de bens, mercadorias e produtos (RIBEIRO, 2017).

Dados disponibilizados pela Confederação Nacional de Transportes (CNT) afirmam que a malha rodoviária brasileira é composta por um total de 1.720.700 km, dentre os quais 12,4% referem-se a rodovias pavimentadas, 9,1% a rodovias planejadas e 78,5% a rodovias que não têm pavimento. Dentre as rodovias pavimentadas, que representam um trecho de 213.453 km, 30,7% são federais e 69,3% são rodovias estaduais transitórias, estaduais e municipais (CNT, 2018).

A Pesquisa CNT de Rodovias percorreu e avaliou 107.161 km correspondentes a toda a malha rodoviária federal pavimentada e os principais trechos estaduais também pavimentados em todo o país. Constatou-se que 57,0% do total de rodovias avaliadas possuem algum tipo de problema e/ou deficiência, como pode-se verificar no Gráfico 1 (35,2% encontram-se em estado regular; 15,3%, ruim; 6,5%, péssimo; seja quanto ao pavimento, à sinalização ou à geometria da via (CNT, 2018).

Gráfico 1 – Classificação do estado geral das rodovias avaliadas



Fonte: CNT (2018)

As rodovias têm a finalidade de proporcionar um meio seguro, econômico e eficaz para o transporte de pessoas e de bens de consumo. No Brasil, o modal rodoviário representa o principal meio de transporte de mercadorias e pessoas e é caracterizado pelo tráfego intenso de veículos (CNT, 2007). Esse elevado fluxo é

considerado uma das causas comuns de desgaste dos pavimentos, que, por sua vez, compromete a vida útil e a qualidade da via. Fatores diversos, tais como as condições climáticas, efeito das intempéries, falta de manutenções preventivas e corretivas e excesso de carga, contribuem, expressivamente, para o surgimento de patologias na estrutura dos pavimentos.

Portanto, o dimensionamento correto do pavimento, tal como o emprego adequado de técnicas de dosagens dos materiais a serem utilizados, é de suma importância nesse contexto, pois garantem resultados satisfatórios, tanto no aspecto funcional, quanto estrutural do pavimento construído, obtendo-se, por conseguinte, estruturas mais resistentes às solicitações impostas ao pavimento. Assim sendo, os pavimentos tendem a apresentar um comportamento mecanicamente eficiente, evitando o aparecimento de defeitos precoces e, conseqüentemente, tendo uma vida útil maior.

O estado precário e o gerenciamento inadequado da pavimentação são responsáveis por diversos acidentes. Isso ocorre porque os condutores veiculares geralmente não têm como se desvencilharem das falhas ou dos buracos presentes nos pavimentos rodoviários. No entanto, algumas medidas podem solucionar essa questão. Antes do plano de execução, torna-se necessária a realização de uma proposta de planejamento para que a construção resultante seja específica e adequada ao local. Após o planejamento e a execução do projeto, é importante pensar em medidas de manutenção da rodovia, após sua liberação para uso, a fim de se evitarem prejuízos decorrentes de reparos e reconstrução do pavimento. Algumas modificações na pavimentação asfáltica vêm sendo estudadas e implementadas, visando a uma adequação às demandas atuais, que proporcionam ao pavimento maior resistência, melhor durabilidade, aprimoramento da qualidade e redução de custos.

Os polímeros são considerados como possíveis estratégias para aprimoramento da pavimentação asfáltica. Dentre eles, destacam-se os resíduos plásticos, principalmente as garrafas compostas por polietileno tereftalato (PET), popularmente conhecidas como garrafas PET (ROCHA *et al.* 2017). As propriedades do polietileno tereftalato (PET), 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).

O consumo de garrafas PET no Brasil é crescente a cada ano. Além disso, a população tem o hábito equivocado de realizar o descarte indevido desse material plástico no meio ambiente. Devido à sua baixa degradabilidade no ambiente, torna-se importante considerar sua reutilização em outras aplicações a fim de minimizar os efeitos poluentes e reduzir a demanda de outras matérias-primas, fato este que, conseqüentemente, levará à redução dos impactos ambientais e à preservação dos recursos naturais (ROCHA *et al.*, 2017).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos nesta linha de pesquisa, tendo-se como objetivo principal a análise da viabilidade de incorporação do resíduo de PET nas misturas asfálticas. Dessa forma, este trabalho tem como finalidade comparar os resultados dos ensaios laboratoriais dispostos em 5 trabalhos da literatura a fim de se correlacionarem os parâmetros mais relevantes obtidos de ensaios mecânicos e de dosagens das misturas asfálticas. Busca-se, por meio deste comparativo, analisar e verificar se, de fato, um aumento no teor de resíduos de PET corresponde a uma melhoria na qualidade das misturas.

Uma vez confirmada, esta medida pode contribuir de maneira significativa para a redução dos impactos ambientais causados pela disposição final inadequada desse material plástico e, além disso, melhorar as propriedades mecânicas do revestimento asfáltico.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar estudos que apresentam a adição do polímero polietileno tereftalato (PET) às misturas asfálticas do tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBQU), com o intuito de verificar o aumento de desempenho do pavimento quanto à flexibilidade e à resistência à tração.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Buscar na literatura trabalhos referentes ao tema em questão, cujos experimentos sejam passíveis de comparação;
- Avaliar o teor de ligante ótimo, o Módulo de Resiliência e a Resistência à Tração das misturas incorporadas com pó e *flakes* de PET para cada um dos trabalhos;
- Comparar os resultados obtidos das misturas aditivadas com PET e aqueles resultantes da mistura convencional, para cada um dos trabalhos;
- Comparar os trabalhos entre si em termos de flexibilidade e resistência à tração resultantes das misturas asfálticas, levando-se em consideração o mesmo percentual de PET adicionado.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa classifica-se como revisão bibliográfica, com caráter exploratório e, quanto à metodologia, ela pode ser considerada como qualitativa.

Na primeira etapa deste trabalho, realizou-se uma revisão bibliográfica, apresentando conceitos e definições sobre a pavimentação asfáltica a fim de embasar teoricamente a pesquisa. Dessa forma, buscou-se apresentar uma síntese sobre as principais características dos pavimentos flexíveis, os materiais que compõem as misturas asfálticas, os ensaios experimentais especificados em normas, a metodologia de dosagem destas últimas, a importância da reciclagem do politereftalato de etileno (PET) e sua utilização na pavimentação.

A segunda etapa consistiu na realização de comparativos entre estudos que utilizaram, dosaram e ensaiaram os pavimentos flexíveis com adição de PET para conhecer suas vantagens. Para tal, buscou-se, na literatura consultada, artigos, dissertações e demais trabalhos que estudaram e analisaram o comportamento mecânico de misturas asfálticas quando adicionado PET em substituição parcial dos agregados. Dessa forma, optou-se pelas referências que utilizaram o método de dosagem Marshall para a definição do teor ideal de ligante asfáltico. Nesta seção são abordados 5 desses trabalhos, mencionando, para cada um deles, os procedimentos e as análises experimentais executadas em laboratórios. A fim de se discutir posteriormente os resultados obtidos, busca-se relacionar o teor de PET e o teor de ligante, além da fluência e estabilidade Marshall, a resistência à tração e o módulo de resiliência encontrados. A metodologia proposta nos estudos experimentais de cada um dos trabalhos analisados nesta pesquisa, segue o fluxograma ilustrado.

Para fins de organização, estes trabalhos são referenciados no texto numericamente e expostos em subseções, conforme segue abaixo:

- **Trabalho 01:** Rader (2018) – Trabalho de Conclusão de Curso: Estudo da adição de resíduos de garrafas pet pós-consumo em misturas asfálticas a quente;
- **Trabalho 02:** Arao (2016) – Dissertação de Mestrado: Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de Polietileno Tereftalato (PET) triturado;

- **Trabalho 03:** Serra *et al.* (2018) – Artigo: Estudo da adição de resíduos de polietileno tereftalato (PET) como agregado alternativo para misturas asfálticas;
- **Trabalho 04:** Rocha *et al.* (2017) – Trabalho de Conclusão de Curso: Estudo de viabilidade do uso de garrafas plásticas na composição do revestimento asfáltico;
- **Trabalho 05:** Queiroz (2016) – Dissertação de Mestrado: Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas modificadas com politereftalato de etileno.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são apresentados conceitos teóricos e definições pertinentes à área de pavimentação, que servirão de fundamentação teórica para o estudo. A priori, busca-se caracterizar a estrutura dos pavimentos asfálticos, bem como discutir seu desempenho, introduzindo, assim, uma abordagem sintetizada sobre os mecanismos de deterioração dos pavimentos flexíveis. Em seguida, é dado um enfoque maior aos materiais empregados na construção dos pavimentos: ligante asfáltico e agregados, os quais compõem as misturas asfálticas. Ainda, são apresentados os principais ensaios realizados nas misturas asfálticas a fim de se determinar propriedades mecânicas e de resistência e verificar se atendem a determinadas especificações dispostas em normas. Nesse contexto, são mostrados, ainda, os procedimentos experimentais da Dosagem Marshall e *Superpave*, os ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência. Por fim, é realizada uma revisão bibliográfica sobre a utilização dos polímeros na pavimentação, particularmente o PET, retratando os processos de fabricação do pó e dos *flakes* de PET, bem como contextualizando sua importância em termos de reciclagem e reutilização. Além disso, são apresentados trabalhos práticos, disponíveis na literatura, que buscam avaliar a eficiência e o desempenho dos asfaltos modificados por polímeros.

4.1 Pavimento

Pavimento é o nome atribuído a uma estrutura construída após terraplenagem, que tem como objetivos resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos do tráfego, além de garantir técnica e economicamente a melhoria das condições de rolamento no que se refere à comodidade e à segurança e, por fim, resistir aos esforços horizontais que nela atuam, proporcionando uma maior durabilidade à superfície de rolamento (ABNT NBR 7207, 1982).

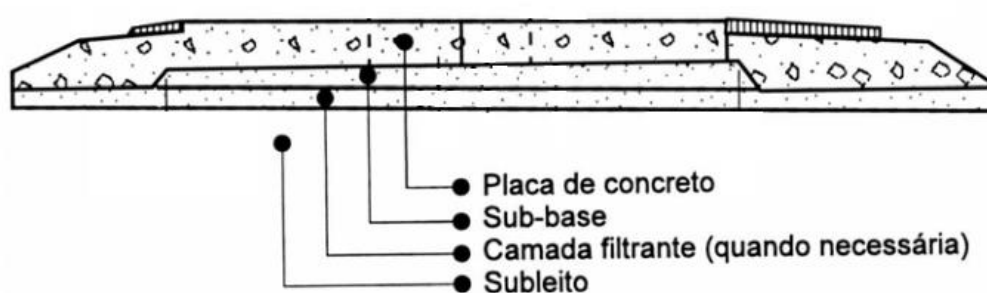
Balbo (2007) acrescenta ainda que os pavimentos têm a função de apresentar uma superfície mais regular, de modo que haja maior conforto para passagem do veículo, bem como uma superfície mais aderente, admitindo, dessa forma, maior segurança para pista úmida ou molhada e uma superfície menos ruidosa, com menor desgaste ambiental nas vias urbanas e rurais.

O pavimento é composto de camadas de espessuras finitas, sobrepostas, de diferentes materiais compactados a partir do subleito, adequadas para atender estruturalmente e operacionalmente ao tráfego, de forma durável e ao mínimo custo possível, considerando o serviço de manutenção e reabilitação obrigatórias (BALBO, 2007; SENÇO, 1997).

Como forma de resistir às cargas solicitantes pelos veículos e pelas ações climáticas, a estrutura do pavimento sofrerá deslocamentos e tensões. Ou seja, como qualquer outra estrutura de construção civil, as cargas são distribuídas de maneira compatível com a resistência de cada camada do pavimento (MOTTA, 1995).

Os pavimentos podem ser classificados estruturalmente em Flexíveis, Rígidos e Semirrígidos (DNIT, 2006). Os pavimentos rígidos, conhecidos também como concreto-cimento, apresentam menor deformabilidade, maior vida útil e são constituídos por camadas que trabalham essencialmente à tração. Neles, o revestimento é composto por uma placa de cimento Portland, podendo ser armada ou não (SENÇO, 1997; BERNUCCI *et al.*, 2008) e desempenha o papel de camada de desgaste e de base. Dessa forma, diferentemente do que é visto nos pavimentos flexíveis, no pavimento rígido uma só camada desempenha duas funções.

Figura 1 – Pavimento Rígido (corte transversal)



Fonte: Adaptado de Senço (1997)

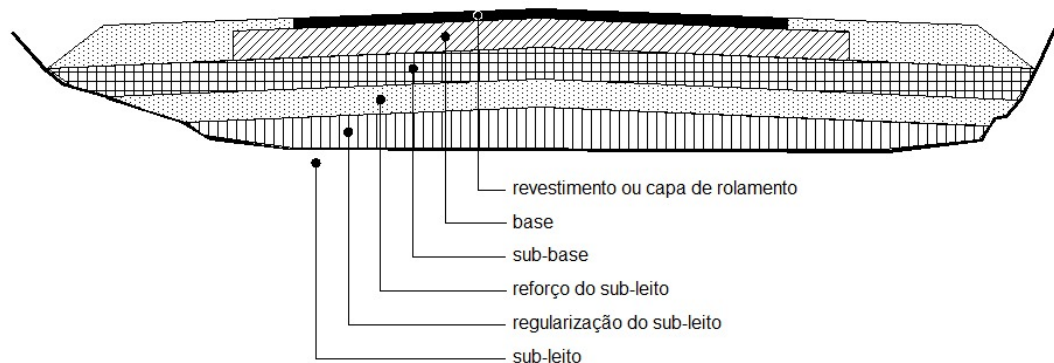
O dimensionamento dos pavimentos rígidos é pautado nas propriedades resistentes das placas de concreto, apoiadas sobre uma camada de transição, definida como sub-base (UNIP, 2016), a qual é constituída por material granular, podendo, em alguns casos, ser estabilizada por um ligante hidráulico (FRANCISCO, 2012). Na Figura 1, estão ilustradas, em corte transversal, as camadas de um

pavimento rígido: revestimento, sub-base, camada filtrante (quando necessária) e subleito.

O pavimento flexível (pavimento asfáltico), composto por material asfáltico e agregado (grauído e miúdo), é, usualmente, o mais empregado no modal rodoviário brasileiro. De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, o pavimento flexível é aquele que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (DNIT, 2006).

Conforme as abordagens de Bernucci *et al.* (2008) e Senço (1997), o pavimento rodoviário é constituído por uma fundação e pelas seguintes camadas apresentadas na Figura 2, com espessuras e materiais determinados através dos métodos de dimensionamento.

Figura 2 – Pavimento Flexível (corte transversal)



Fonte: Adaptado de Senço (1997)

Toda a estrutura do pavimento flexível está acima do subleito, considerada a camada inferior do pavimento, que funciona como a fundação do sistema que irá receber os esforços absorvidos pelo pavimento (ROSSI, 2017). De acordo com Senço (1997), o mesmo pode ser composto de material natural da região onde se pretende construir o pavimento, ou, ainda, de material transportado e compactado, para os casos em que houver necessidade de aterro.

Acima do subleito, tem-se a camada de regularização do subleito (nivelamento), de espessura variável, executada com a finalidade de conformar o leito, transversal e longitudinalmente. A regularização pode existir ou não, uma vez que a mesma não constitui, propriamente, uma camada do pavimento (DNIT, 2006).

O reforço do subleito é a camada de espessura constante que apresenta propriedades técnicas inferiores às da sub-base e superiores à do material da regularização. É construída, se necessário, acima da regularização, uma vez que o emprego da camada de reforço do subleito não é obrigatório. Serve para melhorar as qualidades do subleito e regularizar a espessura da sub-base. O reforço do subleito resiste e distribui os esforços verticais, não tendo as características de absorver definitivamente esses esforços, o que é característica específica do subleito (SENÇO, 2007; DEBORTOLLI, 2016).

A sub-base é a camada complementar à base. É executada quando, economicamente, não for conveniente ou aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito. Tal camada possui a mesma função da base. Em geral, é usada para regularizar a espessura da base (BALBO, 2007).

A camada de base é a camada mais importante da estrutura do pavimento destinada a receber os esforços verticais do tráfego e distribuí-los às camadas subjacentes, sobre a qual se construirá o revestimento (SENÇO, 2007; DEBORTOLLI, 2016).

Por fim, a camada de rolamento ou o revestimento é a camada diretamente ligada à qualidade do subleito, que recebe diretamente as cargas verticais e horizontais oriundas do tráfego, transmitindo-as às camadas subjacentes (ROSSI, 2017). É destinada a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança do usuário, impermeabilizar o pavimento, além de resistir ao desgaste, ou seja, aumentando a durabilidade (vida útil) da estrutura (SENÇO, 2007).

Os pavimentos semirrígidos, por sua vez, estão enquadrados em uma situação intermediária entre os pavimentos rígidos e os pavimentos flexíveis, cujos revestimentos asfálticos possuem em sua base ou sub-base materiais cimentados, que também são solicitados à tração, como o caso das misturas solo-cimento, solo-cal e solo-betume (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Conforme abordado por Francisco (2012), a escolha de cada um desses tipos de pavimentos dependerá da intensidade do tráfego, da qualidade de resistência do solo de fundação, assim como da qualidade dos materiais disponíveis, ou seja, o desempenho do pavimento depende, sobretudo, do dimensionamento das camadas.

4.2 Desempenho do Pavimento Asfáltico

As estruturas do pavimento são projetadas para resistirem a inúmeras solicitações de carga, dentro de um período preestabelecido de projeto, sem que ocorram danos estruturais fora do aceitável e previsto. Por isso, deve-se conhecer, suficientemente, as propriedades dos materiais que compõem a estrutura do pavimento, bem como sua resistência à ruptura, permeabilidade e deformabilidade, diante da repetição de carga e do efeito do clima (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A qualidade da superfície do pavimento é o fator mais importante do ponto de vista do usuário, uma vez que o conforto do rolamento afeta, diretamente, o veículo e a sua manutenção. Porém, a serventia do pavimento abrange, também, a oferta de segurança ao usuário, podendo ser avaliada subjetivamente ou por medidas físicas (DNIT, 2006).

Muitos fatores afetam o desempenho de um determinado pavimento, a saber: a repetição de cargas do tráfego, responsável pela geração e propagação dos defeitos de natureza estrutural; a abrasão da superfície do pavimento; a consequência da passagem das rodas dos veículos que compõem o tráfego; o envelhecimento das camadas asfálticas; as propriedades dos materiais utilizados na construção do pavimento e a sua heterogeneidade ao longo da via; as condições de drenagem; a frequência e as práticas de manutenção aplicadas ao longo do tempo; a estrutura existente e os aspectos ambientais (RODRIGUES, 1991).

O desempenho de um pavimento pode ser quantificado por uma série de indicadores, desde aqueles que caracterizam a sua condição funcional até aqueles que consistem, simplesmente, no registro de defeitos de superfície ou das deformações plásticas. O desempenho estrutural pode ser avaliado por meio da variação do módulo de elasticidade efetivo de uma ou mais camadas com o tráfego acumulado. Os principais mecanismos de deterioração dos pavimentos flexíveis são (RODRIGUES, 1991; GONÇALVES, 1999):

- Formação e crescimento de trincas e/ou fissuras nas camadas asfálticas do revestimento, oriundas da fadiga provocada pela repetição das cargas do tráfego intenso e da água das chuvas. Uma vez que se verifique o fenômeno de infiltração no pavimento, constata-se um aumento significativo da umidade das demais camadas, alterando a capacidade de suporte do mesmo e

aumentando os deslocamentos causados pela solicitação de tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2008);

- Geração de afundamentos em trilha de roda ou de ondulações na superfície por conta das deformações plásticas acumuladas em todas as camadas, provenientes da repetição das cargas do tráfego (GONÇALVES, 1999; HERMES, 2013);
- Envelhecimento do ligante betuminoso por oxidação, que facilita o trincamento da mistura asfáltica, bem como o arrancamento de agregados. A oxidação ocorre em função de fatores diversos, tais como temperatura, umidade e insolação (GONÇALVES, 1999; CARDOSO, 2002);
- Desgaste e perda da textura da superfície do pavimento, expondo os agregados (GOLÇALVES, 1999);
- Geração de painéis ou buracos, causados pela perda de material da superfície do pavimento. Se correções não forem realizadas imediatamente, tais defeitos se propagam. Essa patologia afeta também a capacidade de impermeabilização do pavimento, favorecendo a penetração de água, que contribui para a deterioração das subcamadas do pavimento (GUILHERME *et al.*, 2017).

4.3 Materiais empregados

Apresentam-se, nesta seção, de forma sucinta, alguns materiais constituintes das misturas asfálticas de pavimentos (agregados minerais e ligantes asfálticos), definindo-os, classificando-os e caracterizando-os.

4.3.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico é o componente principal da camada de revestimento dos pavimentos flexíveis, sendo o responsável pela adesão dos agregados e impermeabilização do pavimento (CERATTI e REIS, 2011).

Abeda (2001) classifica os principais tipos de ligantes asfálticos como:

- Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP);
- Asfaltos Diluídos de Petróleo (ADP);
- Emulsões Asfálticas para Pavimentação (EAP);

- Agentes de Reciclagem Emulsionados (ARE);
- Asfaltos Modificados por Polímeros (AMP);
- Asfalto Modificado por Borracha Moída de Pneu (AMB);
- Emulsões Asfálticas Catiônicas Modificadas por Polímeros Elastoméricos (EAPE).

Os asfaltos ou cimentos asfálticos de petróleo (CAP) utilizados em revestimentos asfálticos consistem em um ligante betuminoso oriundo do processo de refinamento do petróleo cru (BERNUCCI *et al.*, 2008) e são definidos como materiais aglutinantes de cor escura, que possuem elevada quantidade de betume (99,5%). Podem ser utilizados em várias aplicações, como, por exemplo, em impermeabilizações de construções civis e, principalmente, em obras de pavimentação (DIAS, 2005).

Além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possuem características de flexibilidade, pouca reatividade e elevada resistência à ação da maioria dos ácidos inorgânicos, sais e álcalis, bem como se apresentam susceptíveis às variações de temperatura e ao tempo de carregamento (FRANKLIM, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com Mothé (2009), o CAP, quando utilizado como um ligante, é um material complexo em termos da sua constituição e do seu comportamento reológico, caracterizando, dessa forma, um dos mais antigos e versáteis materiais de uso em pavimentação.

Os cimentos asfálticos de petróleo são classificados de acordo com o valor de sua penetração ou consistência: CAP 30/45, considerado duro; CAP 50/70, CAP 85/100, médios e CAP 150/200, declarado mole (BALBO, 2007).

4.3.2 Agregados

Segundo a NBR 9935 (ABNT, 2005), o agregado é designado por um material geralmente inerte, sem forma ou volume definido, que possui dimensões e propriedades adequadas à fabricação de argamassas e de concreto.

Senço (1997), em suas abordagens, afirma que o agregado mineral é o responsável por suportar e transmitir as cargas aplicadas. São materiais inertes,

granulares, sem forma e dimensões definidas, com características apropriadas para compor camadas ou misturas, utilizadas nos mais diversos tipos de obra.

Para Bernucci *et al.* (2008), agregado é um termo genérico para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou britadas em seu estado processado. Há, ainda, a necessidade de se considerar os agregados artificiais. É de suma importância avaliar como os agregados são constituídos para conhecer o seu desempenho em potencial, já que o material escolhido para uma determinada utilização deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície do pavimento.

Em geral, todos os revestimentos asfálticos se constituem de associações de ligantes asfálticos, de agregados e, em alguns casos, de produtos complementares. Essas associações, quando executadas e aplicadas apropriadamente, devem originar estruturas duráveis em sua vida de serviço. Para que isso ocorra, deve-se conhecer e selecionar as propriedades que os agregados devem conter (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Para a dosagem adequada dos concretos asfálticos, o estudo das propriedades dos agregados é de grande importância, uma vez que são os componentes mais presentes nas misturas, representando entre 93 e 97% em peso (FARIAS; PALMEIRA, 2010). Dessa forma, estes últimos apresentam influência significativa sobre as características de desempenho (funcional e estrutural) e de comportamento dos pavimentos.

4.3.2.1 Classificação dos Agregados

Os agregados podem ser classificados quanto à natureza, quanto ao tamanho e quanto à distribuição dos grãos.

Quanto à natureza, a NBR 9935 (ABNT, 2011) classifica os agregados como:

- Naturais: materiais granulares provenientes da britagem de rochas ou por obtenção convencional de desmontagem, escavação e dragagem em depósitos, que podem ser empregados na forma e no tamanho como se encontram na natureza (pedregulhos, britas e areia);
- Artificiais: resíduos de processos industriais que envolvem alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima original. São fabricados, especificamente, com o objetivo de alto desempenho ou, também,

como alternativa para regiões onde há dificuldade de se obter agregados com características definidas (escória de alto-forno e de aciaria, argila calcinada ou expandida);

- Reciclados: provenientes do processo de reciclagem de rejeitos ou subprodutos da produção industrial, mineração, construção ou demolição da construção civil. Segundo Rocha *et al.* (2017), a possibilidade de utilização de agregados reciclados vem crescendo em virtude de restrições ambientais quanto à exploração de agregados naturais e devido ao desenvolvimento de técnicas de reciclagem.

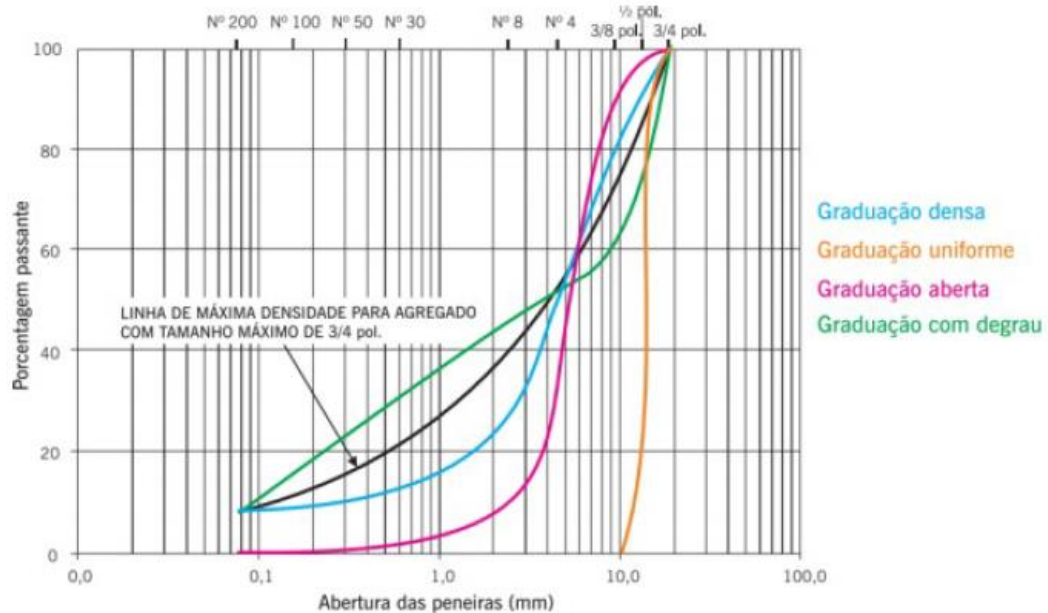
De acordo com o DNIT (2006), em relação ao tamanho, os agregados podem ser classificados como:

- Graúdos: material possui dimensões maiores do que 2,0 mm (peneira nº 10). Destacam-se as britas, cascalhos e seixos;
- Miúdos: apresentam dimensões superiores a 0,075 mm (peneira nº 200) e inferiores a 2,0 mm (areias e pó de pedra), isto é, materiais retidos na peneira de nº 200 e passantes na de nº 10;
- Fíler (material de enchimento): material em que passa pelo menos 65% das partículas pela peneira nº 200 (cal, cimento Portland, cinzas).

De acordo com Ceratti e Reis (2011), o tamanho dos agregados pode tornar a mistura instável com materiais de diâmetro demasiadamente pequeno e, por outro lado, materiais com tamanhos exagerados podem prejudicar a trabalhabilidade e/ou gerar segregação.

Pode-se, também, classificar um agregado quanto à distribuição granulométrica, determinada, em geral, por meio de uma análise realizada por peneiramento. Essa é considerada uma das principais características do agregado, pois, efetivamente, influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Nas misturas asfálticas, a distribuição granulométrica dos agregados interfere em diversas propriedades, tais como, rigidez, estabilidade, durabilidade e resistência à fadiga. Assim sendo, a classificação em função da distribuição granulométrica, conforme Bernucci *et al.* (2008) pode ser observada na Figura 3

Figura 3 – Distribuição dos agregados



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Os agregados de graduação densa ou bem-graduados apresentam distribuição granulométrica contínua, com material fino suficiente para preencher os vazios das partículas maiores. Os de graduação aberta também possuem distribuição granulométrica contínua, entretanto, com ausência de material fino (menor que 0,075mm), o que resulta em maior volume de vazios (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os agregados que apresentam grande parte de suas partículas com tamanhos próximos, representando uma curva granulométrica íngreme, possuem graduação uniforme. Já para aqueles que apresentam pequena porcentagem de suas partículas com tamanhos intermediários, a graduação descontínua é identificada (ARAO, 2016).

4.4 Misturas Asfálticas

As misturas asfálticas são o produto da combinação do ligante ao agregado em proporções adequadas e definidas em laboratório. As mesmas podem ser usinadas a quente ou a frio e preparadas na própria pista ou em usinas móveis (ARAO, 2016).

Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), conhecido popularmente como concreto asfáltico, é a mistura mais utilizada no Brasil, sendo definido como a junção de cimento asfáltico e agregados de diferentes tamanhos que são aquecidos a uma determinada temperatura, em função da propriedade viscosidade-temperatura do ligante (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Ainda, conforme Bernucci *et al.* (2008), a quantidade de ligante asfáltico deve ser suficiente para cobrir os agregados e completar os vazios, pois a mistura precisa contar com vazios em torno de 3 a 5% de ar após a compactação, para camada de rolamento (revestimento em contato direto com os pneus dos veículos) e para camadas de ligação ou intermediárias (camada subjacente a de rolamento) de 4 a 6%. Se não for dada a devida atenção ao controle do índice de vazios, as misturas asfálticas deformam-se, consideravelmente, por fluência e deixam de ser regulares à circulação de veículos. Uma pequena alteração nas características do teor de ligante asfáltico pode levar a problemas de deformação perene por fluência e exsudação ou atenuação da mistura e da resistência ao aparecimento de trincas.

4.4.1 Dosagem das Misturas Asfálticas

A dosagem de uma mistura asfáltica é possível por meio da execução de procedimentos laboratoriais e tem por finalidade produzir uma composição que agregue trabalhabilidade satisfatória e a melhor combinação possível das seguintes características (ASPHALT INSTITUTE, 2002):

- Estabilidade: resistência à ação do tráfego sem sofrer distorções ou deslocamentos;
- Durabilidade: resistência à desagregação pela ação do tráfego e/ou do intemperismo;
- Flexibilidade: resistência à flexão sob ação de carga repetida, sem ocorrência de fissuras;
- Impermeabilidade: resistência à penetração e à percolação de água;
- Resistência ao atrito.

A dosagem das misturas asfálticas consiste na escolha, por meio de métodos empíricos, de um teor ótimo de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. O teor de ligante varia de acordo com o método de dosagem (ARAO,

2016). Dentre os métodos para a dosagem de misturas asfálticas, aqui serão descritos e apresentados o Método Marshall e o Método *Superpave*.

4.4.1.1 Método Marshall

A norma DNER-ME 043 (ABNT, 1995) apresenta os procedimentos para a determinação da estabilidade e da fluência de misturas betuminosas de cimento asfáltico ou alcatrão, a quente, para uso em pavimentação, com agregado de tamanho de 25,4 mm máximo, por meio de aparelhagem Marshall.

O ensaio é dividido em duas etapas. A primeira resume-se na elaboração do corpo de prova e determinação do volume de vazios, volume de betume e volume de asfalto. Na segunda etapa, é feita a compressão do corpo de prova para estabelecer a estabilidade e fluência (SILVA e MARQUES, 2018).

Para os CPs (corpos de prova), os agregados e o ligante são aquecidos separadamente até a temperatura especificada e, posteriormente, misturados. Para se atingir a homogeneização da mistura, o asfalto é adicionado aos agregados e, em seguida, a mesma é colocada no molde, como se pode verificar na Figura 4 (SENÇO, 2001).

Figura 4 – Preparação e moldagem da mistura



Fonte: Bernucci et al. (2008)

Então, para finalizar a moldagem da mistura, ela é compactada com um soquete (SENÇO, 2001).

Os corpos de prova são preparados e moldados, e pelo menos três são necessários para cada teor de ligante adotado. É recomendado o esforço de compactação de 50 golpes para pressão de pneu até 7 kgf/cm² e de 75 golpes para pressão de 7 kgf/cm² a 14 kgf/cm² (ABNT, 1995).

Os procedimentos para determinação dos parâmetros gerados para a dosagem Marshall para concreto asfáltico usado em camada de rolamento (BERNUCCI *et al.*, 2008; CERATTI E REIS, 2011) são:

- 1) Determinação das massas específicas reais do cimento asfáltico de petróleo (CAP) e dos agregados;
- 2) Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com a mistura asfáltica;
- 3) Escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a sua mistura nos limites da faixa granulométrica escolhida. Ou seja, é escolhido o percentual em massa de cada agregado para formar a mistura;

Figura 5 – Extração do corpo de prova do molde



Fonte: Rocha *et al.* (2017)

- 4) Determinação das temperaturas de usinagem e compactação com base na curva viscosidade-temperatura em relação às características do ligante. De acordo com o DNER-ME 043/95, a temperatura a que o ligante deve ser aquecido, para ser misturado ao agregado, é aquela que apresenta uma viscosidade de (85 ± 10) sSF, e a temperatura de compactação da mistura é aquela na qual o ligante apresenta uma viscosidade de (140 ± 15) sSF. A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107°C nem superior a 177°C. A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15°C acima da temperatura estimada para o ligante, sem ultrapassar 177°C;

- 5) Adoção de teores de asfalto para os diferentes grupos de CPs a serem moldados. Cada grupo deve ter no mínimo 3 CPs. Conforme a experiência do projetista, para a granulometria selecionada, é sugerido um teor de asfalto (T , em %) para o primeiro grupo de CPs. Os outros grupos terão teores de asfalto acima ($T+0,5\%$ e $T+1,0\%$) e abaixo ($T-0,5\%$ e $T-1,0\%$);
- 6) Após o resfriamento e a desmoldagem dos corpos de prova (como se pode verificar na Figura 5), obtenção das dimensões (diâmetro e altura), massa seca (M_s) e massa submersa em água (M_{sub}) dos CPs. A altura do corpo de prova deve ser de $(63,5 \pm 1,3)$ mm. Os procedimentos de medições da altura e diâmetro do CP são mostrados na Figura 6. Por meio desses valores, obtém-se a massa específica aparente dos corpos de prova (G_{mb}), que, por comparação com a massa específica máxima teórica (DMT), vai permitir calcular as relações volumétricas típicas da dosagem. Na Figura 6, pode-se verificar os processos de medição do diâmetro e altura dos CPs;

Figura 6 – (a) Medição do diâmetro e (b) altura do CP



Fonte: Arao *et al.* (2016)

- 7) Ajuste do percentual em massa de cada agregado, a partir do teor de asfalto;
- 8) Cálculo da massa específica máxima teórica correspondente ao teor de asfalto considerado;
- 9) Cálculo dos parâmetros de dosagem para cada CP: volume dos corpos de prova e massa específica aparente da mistura. Os parâmetros volumétricos, volume de vazios, porcentagem em massa dos agregados, vazios do agregado mineral e relação betume/vazios devem ser sempre calculados com valores de G_{mb} médio de três corpos de prova;
 - Volume dos corpos de prova (V):

$$V = M_s - M_{sub} \quad (1)$$

onde,

M_s : massa seca dos CPs.

M_{sub} : massa submersa dos corpos de prova.

- Massa específica aparente da mistura (G_{mb}):

$$G_{mb} = \frac{M_s}{V} \quad (2)$$

- Volume de vazios (V_v):

$$V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \quad (3)$$

onde,

DMT: massa específica máxima teórica.

- Porcentagem em massa dos agregados:

$$\sum \%n = 100 - \%a \quad (4)$$

onde,

$\%n$ = percentual em massa do agregado “n” na mistura asfáltica já contendo o asfalto
 $\%a$ = teor de asfalto do grupo de CPs em questão.

- Vazios do agregado mineral (VAM):

$$VAM = 100 - \left(\frac{G_{mb} \times \sum \%n}{G_{sb}} \right) \quad (5)$$

onde,

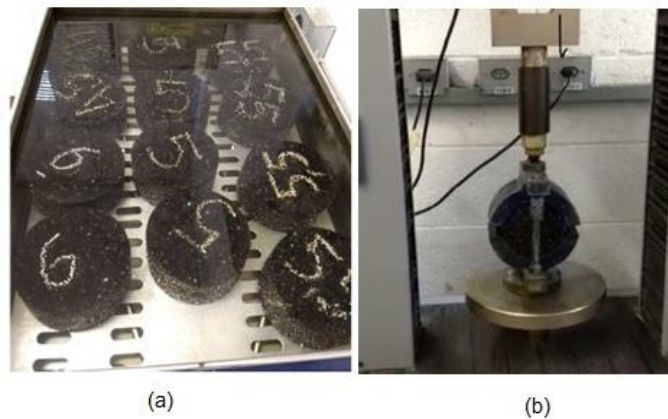
G_{sb} é a massa específica aparente da mistura asfáltica compactada.

- Relação betume/vazios (RBV):

$$RBV = 100 \times \left(\frac{VAM - V_v}{VAM} \right) \quad (6)$$

- 10) Submersão dos corpos de prova em banho-maria a $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ por 30 a 40 minutos (ver Figura 7). Retira-se cada corpo de prova, colocando-o, imediatamente, dentro do molde de compressão, que deve estar entre as temperaturas de 21 a 38°C . Determinam-se, então, por meio da prensa Marshall (ilustrada na Figura 5), os parâmetros de estabilidade de fluência.

Figura 7 – (a) Corpos de prova submersos em banho-maria e, (b) Prensa Marshall



Fonte: Rocha *et al.* (2017)

A carga, em N (kgf), necessária para produzir o rompimento do corpo de prova à temperatura especificada é anotada como “estabilidade lida”. Esse valor é corrigido para a espessura do corpo de prova, por meio da equação a seguir:

$$F = 927,23 h^{4,64} \quad (7)$$

onde,

F = fator;

h = espessura do corpo de prova.

O resultado obtido é o valor da estabilidade Marshall. A estabilidade é dada pela carga média, em N (kgf), de, pelo menos, três corpos de prova. O valor da fluência é determinado de forma simultânea ao ensaio de estabilidade. No momento do rompimento do corpo de prova, deve-se atentar para a diferença de leitura de deformação no medidor de fluência.

O teor ótimo de ligante necessário, de maneira geral, é definido pela relação betume/vazios ou pelo volume de vazios (Bernucci *et al.*, 2008). Segundo Napa

(1982), a escolha do teor de asfalto primordialmente para camadas de rolamento em concreto asfáltico é baseada somente no volume de vazios, correspondente a 4%.

4.4.1.2 Método Superpave

Marques (2004) explica que a aplicação do sistema *Superpave* (*Superior Performance Asphalt Pavements*) depende do volume de tráfego (N), onde foram desenvolvidos 3 níveis de projeto de misturas, sendo o primeiro para tráfego abaixo de 10^6 , o segundo para tráfego entre 10^6 e 10^7 e o terceiro para tráfego acima de 10^7 . Contudo, o método em seu Nível 1 apresenta similaridade ao método Marshall no que tange à avaliação dos parâmetros volumétricos (ASPHALT INSTITUTE, 2001).

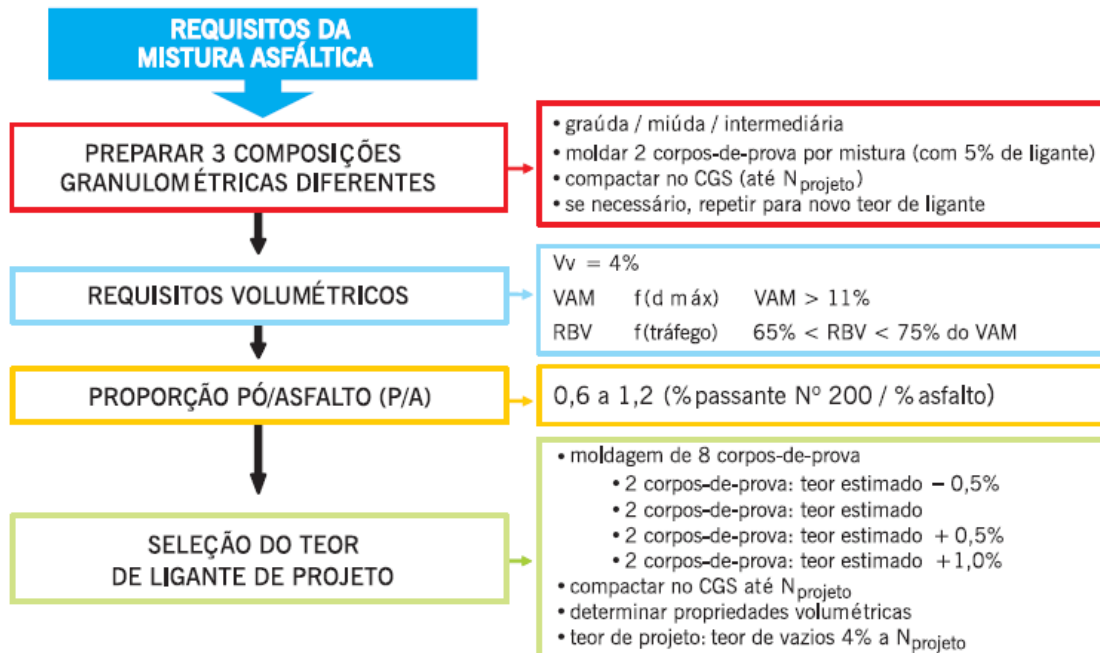
Há de se considerar, entretanto, que uma das diferenças verificadas entre o procedimento Superpave e o Marshall é a forma de compactação. Uma vez que, na dosagem Marshall, a compactação é realizada por impacto (golpes); na dosagem *Superpave*, ela é feita por amassamento (giros) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Nesse método de ensaio, o processo de compactação se dá pelo uso do compactador giratório Superpave (CGS) que produz amostras com 150 mm e 100 mm de diâmetro. O compactador giratório aplica uma pressão constante de 600 kPa sobre a amostra dentro do molde, durante o processo de compactação. O molde é fixado num ângulo de $1,25 \pm 0,02^\circ$, e sua base gira a 30 revoluções por minuto. O tamanho máximo do agregado é 25,4 mm. A altura da amostra é medida para cada giro e, assim, pode-se estimar a densidade do corpo de prova durante a compactação (ASPHALT INSTITUTE, 2001; CAVALCANTI, 2010).

Bernucci *et al.* (2008) descreve os passos para determinação do teor de projeto, considerando o procedimento *Superpave*, tal como é demonstrado no fluxograma da Figura 8. O primeiro passo consiste na escolha de três composições granulométricas. A segunda etapa diz respeito à compactação dos CPs, assumindo-se um teor de tentativa (estimado por meio da massa específica efetiva dos agregados) para cada mistura (tomando-se dois CPs por mistura). Assim sendo, após a compactação dos corpos de prova no compactador giratório com o número de giros de projeto, se obtêm as propriedades volumétricas (V_v , VAM e RBV) dessas misturas experimentais. Motta e Leite (2000) descrevem que, nessa etapa, é verificada também a proporção pó/asfalto, que corresponde à razão entre o teor de

material passante na peneira nº 200 e o teor de ligante. Este valor deve estar entre 0,6 e 1,2.

Figura 8 – Fluxograma do método de Dosagem *Superpave*



Fonte: Bernucci et al. (2008)

É importante levar em consideração que a quantidade de ligante utilizada deve ser tal que a mistura experimental atinja 4% de vazios (bem como na dosagem Marshall) no número de giros de projeto. Caso contrário, é necessário se fazer uma estimativa por meio de fórmulas empíricas para encontrar o teor de ligante que deve ser utilizado para que se atinja os 4% de vazios. Desse modo, esse teor será o teor de ligante estimado para cada mistura. O procedimento *Superpave* permite que o projetista escolha qual das misturas testadas, entre as três composições granulométricas, a que melhor atende às exigências volumétricas especificadas para projeto. Desse modo, são confeccionados CPs com base no teor de ligante estimado, definido anteriormente. Além disso, são confeccionados outros CPs, assumindo-se outros três teores: o teor estimado $\pm 0,5\%$ e $+1\%$. Os corpos de prova são compactados no $N_{projeto}$ e as propriedades volumétricas correspondentes obtidas. O teor final de projeto é aquele que corresponde a um $V_v = 4\%$ (BERNUCCI et al., 2008).

4.4.2 Ensaio Mecânicos

Abaixo, serão descritos os procedimentos experimentais para a realização dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência.

4.4.2.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas é estabelecida com base no ensaio de compressão diametral, cuja metodologia é prescrita pela norma DNIT 136/2010.

O experimento, que pode ser realizado por meio da prensa Marshall, consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão, que geram ao longo do diâmetro solicitado tensões de tração uniformes e perpendiculares a esse diâmetro (BERNUCCI *et al.*, 2008), como se verifica na Figura 9.

Figura 9 – Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: Motta (2005)

Em linhas gerais, as etapas para a execução do ensaio são descritas abaixo (DNIT, 2010):

- 1) Medir as dimensões do corpo de prova – altura (H) e diâmetro (D);
- 2) Colocar o CP em uma estufa ou sistema de refrigeração a fim de se obter a temperatura de 25°C, especificada para o ensaio, por um período de 2 horas;

- 3) Colocar o corpo de prova na prensa mecânica e ajustar os pratos da prensa até ser capaz de manter a posição do CP;
- 4) Aplicar de forma progressiva a carga, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo de prova;
- 5) Anota-se o valor da carga de ruptura (F) e calcula-se a resistência à tração do CP com base na Equação 8.

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \quad (8)$$

onde,

RT: Resistência à tração, em kgf/cm²;

F: Carga de ruptura, em kgf;

D: diâmetro do corpo de prova, em cm;

H: altura do corpo de prova, em cm.

4.4.2.2 Módulo de Resiliência

A norma DNIT-ME 135/2010 prescreve a metodologia para a determinação do módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas, a 25°C. De acordo com o DNIT 135/2010, o módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração (σ_t) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica e a deformação específica recuperável (ϵ_t) correspondente à tensão aplicada.

Para a determinação do módulo de resiliência de materiais de pavimentação, tem-se utilizado equipamentos de carga repetida em laboratório. Tal equipamento consiste em uma estrutura metálica, um pistão que propicia o carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático unido a um regulador de tempo e frequência de 1 Hz. Por meio de um transdutor do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transducer), o corpo de prova sofre deformações horizontais, medidas por um microcomputador que faz o registro da deformação (BERNUCCI *et al.*, 2008; RADER, 2018).

A aplicação de carga no plano diametral vertical de um CP cilíndrico é semi-senoidal, uma vez que se busca aproximar a forma de carregamento correspondente

à passagem de roda. Além disso, o período de duração de aplicação total de carga é de 0,1 segundo e o repouso de 0,9 segundo (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Assim sendo, as cargas aplicadas geram uma tensão de tração no plano transversal ao plano de aplicação da carga e o deslocamento diametral recuperável é medido por meio dos LVDTs (ARAO, 2016).

O módulo de resiliência é calculado como (DNIT, 2010):

$$MR = \frac{F}{\Delta \times H} \times (0,9976\mu + 0,2692) \quad (9)$$

onde,

MR: Módulo de Resiliência, em kgf/cm²;

F: carga vertical repetida, aplicada diametralmente no CP, em kgf;

Δ : deformação elástica ou resiliente, registrada no microcomputador, para aplicações da carga (F), em cm;

H: altura do CP, em cm;

μ : coeficiente de Poisson, o qual recomenda-se um valor de 0,30.

4.5 Asfaltos Modificados por Polímeros

Os cimentos asfálticos produzidos pelo refino do petróleo atendem satisfatoriamente à maioria das situações às quais os pavimentos estão submetidos. Contudo, nos últimos anos, as rodovias de alto volume de tráfego apresentam aumento no Volume Diário Médio (VDM), maior peso nos caminhões, aumento da carga por eixo e aumento da pressão dos pneus, requerendo revestimentos betuminosos mais resistentes e técnicas construtivas mais modernas. O CAP Modificado é aquele que recebe a adição de um agente modificador de origem natural, sintética ou polimérica (AIREY, 2003).

Lewandowski (1994) ressalta que, para ser viável, o modificador deve possuir as seguintes características:

- Facilidade de produção;
- Resistência à degradação em temperaturas de mistura;
- Dispersão no ligante;
- Aumento da resistência ao trincamento em baixas temperaturas;
- Custo razoável.

Para tais objetivos, existem vários tipos de polímeros usados em pavimentação asfáltica. Esses polímeros são de diversos tipos e, geralmente, são divididos em elastômeros e plastômeros (GREEN, 1998). Em um contexto geral, os elastômeros produzem misturas asfálticas mais flexíveis, enquanto os plastômeros, por sua vez, resultam em revestimentos com maiores módulos de resiliência.

A modificação de cimentos asfálticos por polímeros tem sido uma solução para suprir algumas deficiências dos cimentos asfálticos e melhorar propriedades como a susceptibilidade térmica, resistência à deformação permanente e às trincas térmicas (AIREY, 2003).

Dentre os principais objetivos que justificam a utilização de modificadores de asfalto, Balbo (2007) destaca:

- Elevação da coesão do material (CAP);
- Redução da suscetibilidade térmica do CAP e da viscosidade à temperatura de aplicação;
- Obtenção de CAP com baixa fluência;
- Aumento da resistência ao acúmulo de deformações permanentes e ao aparecimento de trincas por fadiga;
- Melhoria da adesividade;
- Retardamento do envelhecimento do material (CAP).

Os polímeros são classificados em termorrígidos, termoplásticos, elastômeros e elastômeros termoplásticos. Segundo Bernucci *et al.* (2008), os polímeros mais utilizados na pavimentação asfáltica são os elastômeros termoplásticos, como os copolímeros em bloco de estirenobutadieno, o estireno-butadieno-estireno, o estireno-isopreno-estireno, o estireno-etilenobutadieno-estireno, a acrilinitrila-butadieno-estireno e o acetado de vinila.

A compatibilidade entre o polímero e o CAP é fundamental nos processos de modificação. Para Bernucci *et al.* (2007), nem todos os polímeros podem ser adicionados ao CAP. Na mesma lógica, nem todos os cimentos asfálticos podem ser passíveis da adição de polímeros. Assim, deve existir certo cuidado na escolha do polímero e do aglomerante para evitar problemas de compatibilidade e estocagem do material.

Leite (1999) afirma ainda que existem diversas especificações referentes aos diversos tipos de polímeros existentes no mercado. Em geral, tais especificações

baseiam-se nas propriedades referentes à tensão versus deformação, efeitos do calor, estabilidade, recuperação elástica, susceptibilidade térmica e módulo de rigidez.

O uso do asfalto-polímero pode aumentar a vida útil de serviços do pavimento e reduzir a frequência de manutenções. Apesar de todas as vantagens, os polímeros têm custo muito alto em comparação aos materiais utilizados nas misturas asfálticas convencionais. Por isso, a quantidade utilizada deve ser a menor possível. Levando em consideração esse quesito, tem-se observado que há uma tendência crescente na substituição dos polímeros comerciais virgens por polímeros reciclados, como, por exemplo, resíduos de PET e borracha de pneus descartados (SULYMAN *et al.*, 2016).

Fundamentalmente, o reforço com fibras aumenta a resistência e melhora o comportamento das misturas asfálticas em relação à fadiga (ABTAHI *et al.*, 2010). Na adição de polímeros diretamente na mistura asfáltica, em geral, tem-se utilizado fibras de polipropileno, de polietileno e de PET. A substituição parcial dos agregados por polímeros triturados na mistura tem mostrado resultados satisfatórios em pesquisas recentes, o que é interessante do ponto de vista ambiental, uma vez que se utilizam maiores volumes de materiais reciclados.

4.6 Polietileno Tereftalato (PET)

O polietileno tereftalato ou politereftalato de etileno, mais popularmente conhecido por PET, com nomenclatura oficial poli (oxitereftaloíla de oxietileno), é um polímero termoplástico que possui uma estrutura parcialmente alifática e aromática, semicristalino, constituinte da família dos poliésteres (ARAO, 2016). Atualmente, o PET é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo com diversas possibilidades de aplicações, como em fibras têxteis e embalagens processadas (ROMÃO *et al.*, 2009).

Os termoplásticos são polímeros capazes de se tornarem fluidos com o aquecimento e voltam à sua configuração inicial após o resfriamento, sem nenhuma alteração de propriedade, o que os permite serem moldados e reciclados sem afetar suas propriedades físicas (GIRALDI, 2008).

Se comparado a outros tipos de termoplásticos, o PET se apresenta mais vantajoso, por possuir níveis satisfatórios de estabilidade térmica, facilidade de

processamento, elevada resistência mecânica mesmo a temperaturas elevadas, leveza, brilho e transparência e baixo custo de produção (ROMÃO *et al.*, 2009).

De acordo com as abordagens de Bernucci *et al.* (2008), na síntese do PET, os processos se dividem em três etapas. A pré-polimerização consiste na primeira delas e refere-se à fabricação do pré-polímero denominado oligômero tereftalato de bis(2-hidroxietileno) - BHET. Na segunda etapa, definida por policondensação, a produção do PET se dá por meio do aquecimento gradual do BHET. Vale ressaltar que, para a fabricação de fibras têxteis, esses dois processos são suficientes. Entretanto, para a produção de embalagens PET, necessita-se da etapa de polimerização no estado sólido (terceira etapa), deixando o produto com maior grau de cristalinidade, o que proporciona a moldagem do material.

4.6.1 Fabricação do pó e flake de PET

Os *flakes* de PET são obtidos do processo de trituração das garrafas PET. Tal processo pode ser subdividido nas seguintes etapas (LOUZADA, 2015):

- 1) Coleta e seleção das garrafas PET pós-consumo. Deve-se atentar para a retirada dos rótulos, tampas e base, lavando-as adequadamente e deixando-as limpas, conforme mostrado na Figura 10;

Figura 10 – Garrafas PET limpas com base e topo cortados



Fonte: Arao (2016)

- 2) Processo de granulação, onde as garrafas são trituradas por meio de um moinho de facas, como o da Figura 11;

- 3) O material resultante passa por uma peneira localizada na parte de baixo do equipamento e é coletado em uma caixa;
- 4) O processo de trituração é repetido para cada peneira até que o material alcance o tamanho requerido.

Figura 11 – Moinho de facas



Fonte: Silva (2012)

De acordo com as abordagens de Melo (2004) o processo de fabricação do pó de PET, após a obtenção dos *flakes* de PET, é descrito em apenas quatro etapas, dentre as quais estão:

- 1) Processo de aglomeração, sob o qual os *flakes* recebem um processamento térmico, a fim de diminuir seu volume e aumentar sua densidade;
- 2) Remodelagem, de modo a preparar o material para a segunda etapa de moagem;
- 3) Nesta etapa de moagem, o material é cortado por rotomoldagem, deixando-o em uma forma arredondada;
- 4) Micronização, onde o material é reduzido a pó com partículas passantes na peneira de 0,42 mm.

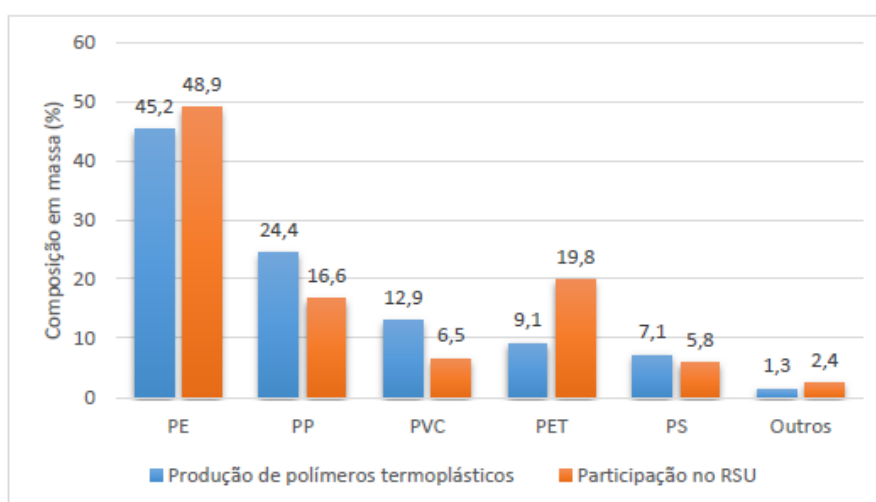
4.6.2 Reciclagem do Polietileno Tereftalato

A reciclagem de embalagens PET tem crescido significativamente no Brasil, devido a preocupações ambientais e à busca da sustentabilidade. De acordo com Abipet (2017), a reciclagem acontece em três etapas:

- Recuperação: inicia-se no momento do descarte e termina com a confecção do fardo, que se torna sucata comercializável;
- Revalorização: com início na compra da sucata em fardos e fim na produção de matéria-prima reciclada;
- Transformação: final do processo completo de reciclagem, com a utilização da matéria-prima oriunda das garrafas de PET pós-consumo para a fabricação de outros materiais.

O processo de reciclagem do PET usualmente empregado no Brasil é o mecânico. Esse processo consiste na conversão dos descartes plásticos pós-industriais ou pós-consumo em grânulos que podem ser reutilizados na produção de outros produtos, como sacos de lixo, solados, pisos, conduítes, mangueiras, componentes de automóveis, fibras, embalagens não-alimentícias e outros (AQUARONE, 2001).

Gráfico 2 – Composição da produção nacional de termoplásticos e sua geração no RSU brasileiro em 2005



Fonte: Abiplast *et al.* (2008)

O Gráfico 2 ilustra a produção de polímeros termoplásticos e a porcentagem desses materiais na geração de resíduos sólidos urbanos. Apesar de a produção de PET corresponder a 9% da produção total de polímeros, a porcentagem do PET no RSU contabiliza 20% (ROMÃO *et al.*, 2009).

Dados revelam que foram consumidas 514.000 toneladas de resina PET na fabricação de embalagens em 2011 e cerca de 59% das embalagens pós-consumo foram efetivamente recicladas em 2012. Apesar disso, a reciclagem de PET vem aumentando e, em 2011, o Brasil alcançou o segundo lugar na reciclagem mundial, perdendo somente para o Japão, que reciclou 77,9% (ARAO, 2016).

Há de se considerar que a reciclagem de resíduos PET é de suma importância, tanto em fatores econômicos quanto sustentáveis. Além de reduzir a exploração dos recursos naturais, reduz o nível de poluição ambiental, economiza energia e recursos e, ainda, contribui para modificar as propriedades de alguns materiais de construção da engenharia (RADER, 2018).

4.6.3 Aplicação do PET na pavimentação

Do ponto de vista da engenharia, desenvolver o uso e a produção de materiais que apresentem maior tempo de vida útil nas misturas asfálticas, garantindo um menor impacto ambiental e reduzindo o consumo de recursos naturais e de energia empregada, agregaria um melhor desempenho ao estudo dos pavimentos. Assim sendo, a busca por melhorias tecnológicas e alternativas mais econômicas para a pavimentação asfálticas tem fomentado a realização de pesquisas no que tange à utilização de resíduos nas camadas de revestimentos dos pavimentos (RADER, 2018).

Dados mostram que a mistura asfáltica com polímeros diminui as deformações permanentes, trincas por fadiga e aumenta a flexibilidade e durabilidade (SILVA, 2005; ARAÚJO, 2013; MENARIA; SANKHLA, 2015; SOJOBI, 2016; SULYMAN *et al.*, 2016).

A adição do resíduo de Politereftalato de Etileno (PET) em Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP), triturados em partículas, pode ser uma alternativa técnica viável para melhorar as propriedades mecânicas e reológicas das misturas asfálticas. Essa adição tem como finalidade proporcionar uma menor susceptibilidade das misturas asfálticas à fadiga e, conseqüentemente, aumentar a

vida útil de revestimentos asfálticos em regiões com clima tropical e a temperaturas elevadas (SILVA, 2015). Além de melhorar as propriedades elásticas do asfalto e contribuir com a resistência à deformação permanente, os polímeros conferem uma melhor adesão entre agregados e asfalto, como também melhoram a resistência à oxidação (BRINGEL et al., 2005).

As propriedades do politereftalato de etileno (PET), como a baixa densidade e elevada resistência mecânica e química, indicam que esse material pode ser utilizado para melhorar as características do revestimento asfáltico (ARAO *et al.*, 2017).

4.7 Trabalhos com a execução de misturas asfálticas aditivadas com PET

Nesta seção, são apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura que consideram a incorporação de PET na fabricação das misturas asfálticas. Nesse contexto, são apresentados cada um desses trabalhos, a partir de uma descrição sucinta dos procedimentos e técnicas adotadas para a obtenção das propriedades das misturas.

4.7.1 Trabalho 01

O estudo apresentado por Rader (2018) baseia-se na análise laboratorial das propriedades de misturas asfálticas modificadas com determinados teores 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. Para a utilização do pó, foi utilizado o material passante na peneira de 2 mm e retido na de 0,42 mm (ver Figura 12). Já o *flake* foi utilizado de acordo com sua forma comercial. As misturas foram enquadradas na faixa C do DNIT com seus limites e tolerâncias de acordo com a norma DNIT-ES 031/2006 (DNIT, 2006), e a distribuição dos agregados se deu a partir de uma série de peneiras com abertura de malhas distintas entre si. Os agregados provieram de rocha basáltica, cuja coleta foi realizada na unidade de produção do município de Cruz Alta – RS.

Figura 12 – Dimensões do pó de PET após peneiramento



Fonte: Rader (2018)

Foram desenvolvidas cinco diferentes misturas asfálticas. Todas as misturas constituíram-se basicamente de agregados graúdos, agregados miúdos, cal dolomítica e ligante asfáltico (CAP 50/70), distinguindo-se apenas pelo teor e tipo de PET. A primeira delas, denominada referência, teve sua composição constituída de brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra. A segunda, designada 0,7% pó de PET, apresentou substituição de 0,7% do pó de pedra por pó de PET, assim como a terceira mistura, 0,7% *flake* de PET, que substituiu 0,7% do pó de pedra por *flake* de PET. A quarta e a quinta mistura, denominadas 1,5% pó de PET e 1,5% *flake* de PET, respectivamente, apresentaram substituição de 1,5% do pó de pedra por 1,5% de pó de PET e 1,5% de *flake* de PET, na devida ordem. Todos os materiais foram submetidos à realização da análise granulométrica e densidades.

O método de dosagem seguiu a metodologia Marshall. A realização da moldagem e dos ensaios seguiram as especificações exigidas pelas normativas. Cinco grupos de três corpos de prova de cada mistura foram moldados, cada grupo com um teor de CAP distinto, totalizando 15 corpos de prova para cada mistura, 75 no total. Os teores adotados para o grupo de 3 CPs da mistura de referência foram: 4%, 4,5%, 5%, 5,5% e 6%. Posteriormente, com o teor de ligante da mistura referência determinado (= 5,4%), foram moldados os grupos de CPs para o restante das misturas com os respectivos teores: 4,5%, 5%, 5,4%, 6% e 6,5%.

As misturas foram submetidas aos ensaios de estabilidade, fluência e relação estabilidade/fluência Marshall, resistência a tração por compressão diametral (RT), dano por umidade induzida e módulo de resiliência (MR). Para a determinação da estabilidade e fluência, foram utilizados 3 CPs para cada uma das misturas

desenvolvidas. A compactação destes CPs foi realizada na temperatura de 150°C, enquanto os agregados foram aquecidos a 170°C e o ligante asfáltico a 160°C.

4.7.2 Trabalho 02

De forma análoga ao que foi realizado por Rader (2018), Arao (2016) utilizou o material PET triturado (*flake*) nos diâmetros 10 mm e 2 mm, nos teores de 0,5% e 1,0% adicionadas ao CBUQ e, também, a substituição de 2,5% do pó de pedra por pó de PET, juntamente com a adição de 0,5% de PET triturado no diâmetro de 10 mm. Foram utilizados três tipos de agregados: brita 1, brita 0 e pó de pedra.

Com base nos ensaios de caracterização dos agregados e do ligante asfáltico CAP 30/45, foram feitas as dosagens das misturas asfálticas, pelo método Marshall, e a confecção de corpos de prova, o que possibilitou a realização dos ensaios mecânicos de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e de vida de fadiga.

Foram confeccionadas 6 tipos de misturas, definidas da seguinte forma:

- M1: CBUQ convencional;
- M2: CBUQ com 0,5% de flakes de PET de 2 mm;
- M3: CBUQ com 1,0% de flakes de PET de 2 mm;
- M4: CBUQ com 0,5% de flakes de PET de 10 mm;
- M5: CBUQ com 1,0% de flakes de PET de 10 mm;
- M6: CBUQ com 0,5% de flakes de PET de 10 mm e substituição de pó de pedra por 2,5% de pó de PET.

Os CPs convencionais (referente à mistura M1) foram compactados nos teores: 4,5%; 5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5%. Vale ressaltar que os parâmetros volumétricos foram encontrados para esses teores. A partir da determinação do teor ótimo, foram compactados os 72 corpos de prova para os ensaios mecânicos, para as seis misturas diferentes, cada um com aproximadamente 1200g, compactados a 75 golpes em cada face (correspondente para a camada de rolamento), com teor de ligante de 5,5%, aproximadamente. A execução dos ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall foram realizados após um banho dos corpos de prova por 40 minutos a 60°C.

4.7.3 Trabalho 03

Serra *et al.* (2018) avaliaram o comportamento de misturas asfálticas usinadas a quente com substituição parcial do agregado miúdo por material triturado oriundo de garrafa PET nas proporções de 1%, 2% e 3%. Foram confeccionados corpos de prova para obtenção da estabilidade Marshall, resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR).

Os agregados (brita 1, brita 0 e pó de brita), provenientes da mina Malvina da Granorte, na cidade de Perizes – MA, foram caracterizados em laboratório por meio dos ensaios de granulometria e o ensaio de densidade real e aparente.

Conhecendo a granulometria dos agregados, foram dosadas misturas de acordo com a faixa C especificada na norma DNIT 141/2010 – ES. A fim de comparação, foi executado um traço de referência de concreto asfáltico a quente convencional, composto por 60% de pó de brita, 35% de brita 0 e 5 % de brita 1.

Após a determinação da dosagem dos agregados para a definição do teor ótimo de ligante da mistura de referência, foram confeccionados traços com teores de 4%, 4,5% e 5% de ligante. Determinado o teor ótimo, consideraram-se traços com substituição do pó de brita nas porcentagens predefinidas de resíduo PET triturado. Para a análise das propriedades volumétricas e de estabilidade, utilizaram-se 3 CPs de cada mistura.

4.7.4 Trabalho 04

A pesquisa realizada por Rocha *et al.* (2017) compreendeu o estudo de amostras de misturas asfálticas variando o teor de plástico em relação ao peso do agregado. Por meio dos parâmetros volumétricos da mistura asfáltica e do ensaio Marshall, determinou-se o teor ótimo de ligante (CAP 30/45) para cada fração de PET, sendo possível moldar os corpos de prova para realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência.

A primeira parte da pesquisa consistiu em obter, preparar e caracterizar os materiais utilizados para a moldagem dos corpos de prova. Os agregados utilizados no trabalho são britados, de natureza granítica, provenientes da pedreira localizada no município de Jaraguá-SP. Utilizou-se o PET em partículas de 2,5 mm a 4,36 mm, sempre procurando manter o tamanho no centro dessa faixa. Para isso, as garrafas

foram cortadas em filetes, por meio de um filetador manual, os quais eram cortados com tesoura no tamanho desejado. Com os agregados e o ligante caracterizados, foi realizado o ensaio de dosagem Marshall, no qual os corpos de prova foram preparados a 4%, 4,5%, 5%, 5,5% e 6% de cimento asfáltico de petróleo (CAP), além da adição de 0%, 0,25%, 0,50%, 0,75%, e 1% (todas as porcentagens em peso de agregado) de material plástico. As misturas foram realizadas pelo processo seco (o qual abrange o modificador com agregados antes da adição do ligante à mistura). Para as misturas com 0,50% e 1,0% de PET, foi utilizada uma temperatura de mistura de agregado com o PET de 170°C. Porém, esta não foi suficiente para fazer o agregado ser revestido pelas partículas de PET, como desejado, uma vez que elas ficaram soltas na mistura, fazendo o papel de finos. Dessa forma, para as demais misturas, decidiu-se aumentar a temperatura para 220°C.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência foram realizados para 3 corpos de prova para cada condição experimental, já com os teores ótimos determinados. Dessa forma, a pesquisa foi composta por 130 corpos de prova: para cada dosagem, foram utilizados 5 teores de ligante e, para cada um destes, foram preparados 4 CPs, totalizando 20 amostras para cada teor de PET e, para cada ensaio, foram moldados 3 CPs para cada teor de PET, após a determinação do teor ótimo de ligante.

4.7.5 Trabalho 05

Os materiais utilizados na pesquisa desenvolvida por Queiroz (2016) são: agregados naturais, de origem granítica, Cimento Asfáltico de Petróleo convencional, resíduos de plástico (obtidos por intermédio de trituração de garrafas plásticas diversas, na forma de granulado) e cal. Os agregados naturais obtidos são: brita 3/4", brita 1/2" e brita 3/8", como agregado graúdo, e pós de pedra, como agregado miúdo. O CAP utilizado foi o 50/70. Os agregados naturais, a cal e o CAP 50/70 foram fornecidos por uma usina de asfalto, localizada no município de João Pessoa/PB. O plástico PET utilizado provém da trituração de garrafas plásticas diversas, cedidas por uma indústria localizada em Alhandra/PB.

O método de trabalho realizado por Queiroz (2016) consistiu na realização de ensaios de caracterização dos materiais utilizados, determinação do teor de projeto de ligante asfáltico, confecção das misturas asfálticas com teor de PET e realização

dos ensaios de módulo de resiliência, deformação permanente, entre outros, em seus respectivos teores de projeto de ligante asfáltico. A adição de PET nas misturas foi realizada nas proporções 0,00; 0,33; 0,50; 0,75 e 1,00% em relação ao peso dos agregados.

Após a definição da faixa granulométrica e a definição das proporções de cada material constituinte das misturas propostas, 5 grupos de corpos de prova foram moldados para a determinação dos parâmetros volumétricos, cada qual com um teor de CAP. Cada grupo apresentou um mínimo de três amostras, resultando em um total de 15 corpos de prova para cada ensaio Marshall.

5 ANÁLISE E RESULTADOS

Com base nos trabalhos apresentados na revisão da literatura, este capítulo busca discutir os resultados dos ensaios executados em laboratório, utilizando-se o método de dosagem Marshall. Objetiva-se, desta forma, avaliar o comportamento das misturas de referência e das misturas que tiveram substituição de parte dos agregados por pó e *flake* de PET. Para fins de comparação, os resultados são apresentados em tabelas para cada um dos trabalhos analisados, conforme se segue.

5.1 Análise dos Resultados dos Trabalhos

Neste item, a priori, é feita uma análise dos resultados dos trabalhos, individualmente, levando-se em consideração o teor de PET adicionado às misturas, o percentual de ligante adotado, a estabilidade e fluência, além das propriedades mecânicas das misturas ensaiadas.

5.1.1 Trabalho 01

Uma vez que se procurou manter o mesmo teor de ligante para as misturas com a mesma porcentagem de resíduo, a Tabela 1 apresenta os valores do teor de ligante e suas respectivas massas de acordo com cada mistura estudada.

Tabela 1 – 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% <i>flake</i> PET	5,2	65,8
1,5% <i>flake</i> PET	5,7	72,5

Fonte: Rader (2018)

É possível verificar acima que, para as misturas com maior quantidade de resíduos PET (1,5% pó PET e 1,5% *flake* PET), maior o teor de ligante. Se comparadas à mistura de referência, essa elevação no teor de ligante corresponde a

5,56%. Em contrapartida, observa-se que o teor de ligante diminui quando se adiciona menos resíduo. Comparando as misturas com adição de pó e *flake* PET na proporção de 0,7% com a mistura de referência, nota-se uma diminuição no teor de ligante de 3,7%.

A Tabela 2 apresenta os valores encontrados para os parâmetros de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração (RT) por compressão diametral e módulo de resiliência (MR) para cada mistura.

Tabela 2 – Estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e relação MR/RT

Mistura	Estabilidade (kgf)	Fluência (0,01pol)	RT (MPa)	MR (MPa)	Relação MR/RT
Referência	1734	15,33	1,93	9157,3	4756,73
0,7% pó PET	1770,67	10,17	1,77	9434,4	5324,52
1,5% pó PET	1534	23,43	1,55	8738,1	5654,58
0,7% <i>flake</i> PET	1473	13,9	1,69	9721,4	5736,13
1,5% <i>flake</i> PET	1171,33	18,03	1,36	8178,5	6031,61

Fonte: Rader (2018)

A partir dos dados expostos e assumindo que o valor especificado em norma para a estabilidade é de 500 kgf, confirma-se que todas as misturas apresentam valores acima do especificado. A mistura de referência apresentou um valor significativamente elevado, perdendo somente para mistura com 0,7% de resíduo PET. Além disso, observa-se que houve uma redução da estabilidade da mistura com 0,7% de pó de PET (1770,67 kgf) para a mistura com 0,7% de *flake* de PET (1473,00 kgf), tal como ocorre para as misturas com proporção equivalente a 1,5% de resíduos. Verifica-se, também, que quanto maior a porcentagem de pó de PET adicionada à mistura, menor é a estabilidade. Bem como, é possível identificar que quanto maior o teor de *flake* de PET menor é a estabilidade. Logo, pode-se concluir que a rigidez das misturas modificadas se reduz quando comparada ao valor da mistura de referência.

Para os valores relacionados à fluência, nota-se que todas as misturas estão dentro dos padrões recomendados (8 a 16 centésimos de polegadas), exceto as misturas com 1,5% de pó e *flake* PET. Identifica-se, portanto, que quanto maior o percentual de resíduo de pó ou *flake* na mistura, maior é o valor de fluência obtido, o

que leva a concluir que as misturas com maior quantidade de resíduo apresentam possíveis incrementos em sua capacidade elástica.

Bernucci *et al.* (2008) estabelecem valores entre 0,5 e 2,0 MPa para a resistência à tração. Considerando os dados resultantes no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, percebe-se que todas as misturas dentro da faixa especificada pela literatura mencionada. Como se observa na Tabela 2, o aumento na quantidade de resíduo é inversamente proporcional aos resultados de resistência.

Bernucci *et al.* (2008) revelam ainda que, para misturas de concreto asfáltico ensaiados a 25°C, valores entre 2000 e 8000 MPa são considerados típicos para o módulo de resiliência (MR) e que menores valores correspondem às misturas modificadas por polímeros ou borracha. Assim sendo, com base nos dados obtidos no ensaio, verifica-se que nenhuma mistura atendeu à especificação supracitada. Contata-se, também, que o MR variou de forma inversa à adição dos resíduos. Nesse sentido, equivale dizer que as misturas com maiores percentuais de PET apresentam maiores índices de deformações elásticas recuperáveis.

A relação entre os dos últimos parâmetros analisados – o módulo de resiliência e a resistência a tração por compressão diametral – vem sendo usada por muitos autores como um critério da vida de fadiga. Bernucci *et al.* (2008) destacam que essa relação exhibe dados relacionados à rigidez e à resistência, onde se busca pequenos valores desta razão, ao passo que se procura menor rigidez para evitar o trincamento prematuro do revestimento e a alta resistência à tração, relacionada a uma maior resistência à fadiga. De posse dos valores apresentados acima, para a relação MR/RT, percebe-se que as mistura com adição de PET possuem valores superiores à mistura de referência.

5.1.2 Trabalho 02

O teor de ligante provável de projeto calculado por Arao (2016) é igual a 5,2%; porém, optou-se por utilizar o percentual apresentado na Tabela 3.

Os resultados dos ensaios mecânicos de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração e módulo de resiliência são apresentados na Tabela 4.

De acordo com Arao (2016), os ensaios de estabilidade obtiveram resultados satisfatórios. As misturas M2, M4 e M5 apresentaram valores muito próximos entre si e maiores em relação à mistura convencional (M1). A mistura M3, por sua vez,

resultou em um aumento de estabilidade significativo. Já a mistura M6, por ter pó de PET em substituição ao pó de pedra em sua composição, apresentou um valor de estabilidade menor.

Tabela 3 – Descrição das misturas e teor de ligante

Mistura	Descrição	Teor de ligante (%)
M1	CBQU convencional	5,5
M2	0,5% de <i>flakes</i> de PET de 2 mm	5,5
M3	1,0% de <i>flakes</i> de PET de 2 mm	5,4
M4	0,5% de <i>flakes</i> de PET de 10 mm	5,5
M5	1,0% de <i>flakes</i> de PET de 10 mm	5,4
M6	0,5% de <i>flakes</i> de PET de 10 mm e substituição de pó de pedra por 2,5% de pó de PET	5,5

Fonte: Arao (2016)

Tabela 4 – Estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e relação MR/RT

Mistura	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	RT (MPa)	MR (MPa)	Relação MR/RT
M1	1518	7	1,38	6278	4549
M2	1588	7	1,25	7251	5801
M3	1753	8	1,87	5160	2759
M4	1589	9	1,4	5466	3904
M5	1591	8	1,73	5624	3251
M6	1466	9	1,78	6289	3533

Fonte: Arao (2016)

Pode-se verificar, neste estudo, que quanto maior o teor de *flakes* de PET presente na mistura, maior é a estabilidade da mistura e, conseqüentemente, maior a sua rigidez.

Quanto à fluência, todas as misturas obtiveram valores semelhantes. Entretanto, as misturas M4 e M6 destoaram das demais nesse quesito, mostrando que a deformação dessas últimas é maior.

Os resultados indicam uma tendência de aumento da resistência à tração com o aumento da quantidade de PET na mistura. A mistura com 0,5% de *flakes* de PET

de 2 mm gerou um resultado de RT menor do que a mistura convencional. A mistura M4 (0,5% de *flakes* de PET de 10 mm) apresentou um resultado semelhante à M1 (convencional) e à M6, que possui os mesmos *flakes* de PET que a M4 teve um melhor comportamento. As misturas M3 e M5, com maior proporção de PET em sua composição, resultaram em valores significativamente altos de resistência.

Os valores de Módulo de Resiliência encontrados são bem similares, exceto a mistura M2, que apresentou um resultado mais alto. Se comparadas à M1, as misturas M3, M4 e M5 obtiveram valores menores de módulo de resiliência, apresentando-se mais flexíveis. É possível verificar para as misturas M2 e M3 (com PET no tamanho de 2 mm), que o aumento de percentual de resíduo corresponde a uma redução do MR. Ocorrência similar não é vista para as misturas M4 e M5, compostas por resíduos PET de dimensões de 10 mm. Na mistura M6, com a substituição do pó de pedra pelo pó de PET, o MR alcançou um valor um pouco maior, justificando a rigidez da mistura.

5.1.3 Trabalho 03

O teor ótimo de ligante encontrado por Serra *et al.* (2018) para o traço de referência (PET 0%) foi de 4,7% de CAP. Assim sendo, o teor de ligante assumido para os traços com substituição do pó de brita por 1%, 2% e 3% de resíduo PET triturado foi de 4,7%, conforme se observa na Tabela 5. Essa apresenta ainda o resultado da média dos valores obtidos nos ensaios de estabilidade Marshall, módulo de resiliência, executado conforme a norma DNIT 135/2010 de resistência à tração, prescrito na norma DNIT- ME 135/2010 e na relação MR/RT.

Tabela 5 – Teor de ligante, estabilidade Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e relação MR/RT

Mistura	Teor de ligante (%)	Estabilidade (kgf)	RT (MPa)	MR (MPa)	Relação MR/RT
PET 0%	4,7	1006	1,46	10046	6880,82
PET 1%	4,7	1165	1,18	8840	7491,52
PET 2%	4,7	1133	1,43	9448	6606,99
PET 3%	4,7	1083	1,55	10056	6487,74

Fonte: Serra *et al.* (2018)

A Estabilidade Marshall tem valores superiores ao valor mínimo estabelecido em norma (500 kgf) e diminui em função do teor de PET adicionado na mistura. Entretanto, aquelas com adição de resíduo apresentam resultados melhores se comparadas à convencional, o que comprova que há uma melhoria na resistência do concreto asfáltico ao se incorporar o PET. Vale acrescentar ainda que essa melhoria não é muito significativa, uma vez que a porcentagem de PET adicionada é baixa.

Baseando-se em literaturas de referência e nos limites especificados na norma DNIT- ME 135/2010, toda as misturas se encontram acima de 0,65 MPa. É importante constatar que há um pequeno acréscimo da RT com a adição de 3% de resíduo triturado, e o valor encontrado, nesse caso, apresenta melhor resultado do que a mistura-padrão. É perceptível também que, para o estudo realizado por Serra *et al.* (2018), a RT aumenta com o aumento na quantidade de PET incorporado às misturas.

Ao analisar os resultados referentes ao módulo de resiliência (MR), há de se considerar que os valores obtidos estão acima do intervalo estabelecido em norma para uma mistura asfáltica da faixa C ($2000 \leq MR \leq 8000$). A rigidez das misturas diminui com a adição de PET, quando se analisa a adição de 0%, 1% e 2% de resíduo triturado. Para 3%, o valor obtido para MR é similar àquele resultante da mistura convencional.

5.1.4 Trabalho 04

Os parâmetros Marshall para a mistura asfáltica com 0%, 0,25%, 0,5%, 0,75% e 1% de PET no teor ótimo de ligante bem como os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à tração e módulo de resiliência são mostrados na Tabela 6.

Para as misturas com 0,50% e 1,0% de PET, processadas a uma mesma temperatura, nota-se que o teor de ligante aumenta com o aumento de resíduo adicionado. Isso pode observado também para as misturas com 0,25% e 0,75% de PET.

Ao analisar a estabilidade da mistura, torna-se nítido que para aquelas aquecidas a 170° C e 220° C, o valor da estabilidade diminui em relação à mistura convencional. Entretanto, fazendo uma comparação entre os teores de cada

temperatura, constatou-se que a estabilidade aumenta com o aumento do teor de PET adicionado. Além disso, pode-se verificar que os teores aquecidos a 170°C apresentam uma redução menos expressiva em relação à mistura de referência (com 0% de PET).

Com relação à fluência Marshall, para as misturas modificadas, aquecidas a 170°C, observa-se que há um aumento dos valores se comparados àquele obtido pela mistura convencional. Em contrapartida, para as misturas aquecidas a 220°C, o efeito foi contrário, ou seja, a fluência diminuiu quando comparada à mistura-padrão.

Há de se considerar que para as misturas aquecidas a 170°C (0,5% e 1% de PET), o valor de fluência diminuiu com a adição de resíduo à mistura. Para as misturas modificadas aquecidas a 220°C, o valor de fluência permanece inalterado com a adição de PET.

No que se refere à resistência à tração, nota-se que não há variação significativa entre os valores obtidos para as misturas com temperatura de aquecimento à 170°C. Já para aquelas cujo aquecimento se deu a 220°C, os valores foram significativamente elevados, mostrando-se mais resistentes do que a convencional. Conclui-se, portanto, que a temperatura é um parâmetro que influi de forma relevante a resistência à tração.

Tabela 6 – Teor de ligante, estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e relação MR/RT

Mistura	Teor de ligante (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	RT (MPa)	MR (MPa)	Relação MR/RT
PET 0%	5,2	1070,7	2,5	1,239	4312,53	3481,93
PET 0,25%	5,3	673,01	2,2	1,689	4989,9	2954,41
PET 0,5%	5,6	866,76	3,4	1,023	3350,53	3275,7
PET 0,75%	5,4	759,69	2,2	1,481	4568,63	3084,84
PET 1%	5,7	957,51	3	1,157	3292	2845,48

Fonte: Rocha *et al.* (2017)

O módulo de resiliência das misturas aquecidas a 170°C é menor se comparado ao resultante da mistura-padrão. Além disso, não há variação no valor de MR entre os teores de 0,50% e 1,0% de PET. As misturas com 0,25% e 0,75% de PET apresentam maiores valores de MR, indicando, dessa forma, que, quando há uma melhor adesão na mistura, ela torna-se mais rígida e que menores teores de

plástico incorporados apresentaram maior rigidez. Isso pode ser justificado pelo fato de que misturas com maiores teores de PET têm maior deformação elástica sob carregamentos cíclicos em comparação com a mistura normal.

O resultado da relação MR/RT mostra que, para todas as misturas com PET incorporado, os valores, próximos de 3000, estão dentro da faixa especificada em norma, o que as caracteriza como misturas com boa flexibilidade e resistência à tração.

5.1.5 Trabalho 05

A Tabela 7 mostra os valores obtidos para o teor de ligante, e os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à tração e o módulo de resiliência realizados por Queiroz (2016). A relação MR/RT também é apresentada.

Tabela 7 – Teor de ligante, resistência à tração, módulo de resiliência e relação MR/RT

Mistura	Teor de ligante (%)	RT (MPa)	MR (MPa)	Relação MR/RT
PET 0%	3,7	0,75	2767	3690
PET 0,33%	3,3	0,7	3922	5602
PET 0,5%	3,4	0,62	4009	6466
PET 0,75%	3,5	0,72	3997	5551
PET 1%	4,2	0,6	3413	5688

Fonte: Queiroz (2016)

Constata-se que a mistura com 1% de PET apresenta teor de projeto maior dentre as demais, demonstrando, pelo menos na fase de dosagem, que valores excessivos de resíduos podem comprometer o desempenho das misturas ou demandarem uma maior quantidade de ligante asfáltico. As misturas com 0,33%, 0,50% e 0,75% de PET apresentam teores de projeto similares.

Queiroz (2016) não apresentou resultados referentes à estabilidade e à fluência Marshall. Dessa forma, diferentemente dos trabalhos expostos anteriormente, aqui não serão discutidos tais parâmetros.

Os valores de RT obtidos foram bem próximos, independentemente do teor de PET adicionado. Observa-se que as misturas modificadas apresentaram resultados inferiores ao padrão em termos de RT.

Os valores de MR encontrados foram relativamente altos, estando fora da faixa estabelecida por norma. Observa-se um aumento do MR para as misturas aditivadas com PET até o acréscimo de 0,5% de resíduo. Entretanto, todas as misturas modificadas obtêm MR maiores que a mistura sem qualquer adição de polímero.

A relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração (MR/RT) é considerada um indicador da vida de fadiga de uma mistura asfáltica, uma vez que agrega informações de rigidez e resistência. Menores valores obtidos nessa relação são desejáveis, pois indicam uma maior vida de fadiga, visto que se busca baixa rigidez de modo a evitar a alta absorção de tensões que levam ao trincamento prematuro do revestimento e à alta resistência à tração, que, por sua vez, está associada a uma maior resistência à fadiga.

Os valores mostrados na Tabela 7 determinam uma redução na vida de fadiga para as misturas com PET incorporado, tendo em vista os valores mais elevados da relação MR/RT.

5.2 Comparação dos Resultados

Busca-se, aqui, comparar os resultados dos trabalhos analisados, a fim de estabelecer uma relação entre a porcentagem de teor de PET incorporado às misturas asfálticas e os parâmetros mecânicos obtidos do ensaio Marshall e dos demais experimentos realizados em laboratório. Vale ressaltar que os teores de 0% (correspondente à mistura-padrão), 0,5% e 1% de PET incorporados são comuns em quase todos os trabalhos, tornando-os, assim, passíveis de comparação. Portanto, a Tabela 8 resume os resultados retirados desses trabalhos pesquisados, considerando a adição dos teores supramencionados (0%, 0,5% e 1% de PET), a partir da qual é possível analisar as devidas comparações. As comparações são realizadas em função do teor ótimo de ligante asfáltico, estabilidade e fluência Marshall (quando executadas), resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR) e a razão MR/RT. É apresentada, também, uma análise em função dos resultados obtidos das misturas originais.

As misturas-padrões sem nenhuma adição de PET são ensaiadas por todos os trabalhos. Os Trabalhos 02, 04 e 05 avaliam a incorporação de 0,5% de

politereftalato de etileno às misturas asfálticas, enquanto o percentual de adição de 1% é analisado comumente pelos Trabalhos 02, 03, 04 e 05.

É importante frisar que o Trabalho 02 apresenta dois resultados para cada uma das propriedades estudadas, equivalente a misturas incorporadas com *flakes* de PET de 2 mm e misturas com *flakes* de PET de 10 mm, respectivamente.

Tabela 8 – Propriedades e resultados das misturas aditivadas com 0%, 0,5% e 1% de PET

Misturas com 0% de PET adicionado (Misturas – padrão)							
TRABALHO	PROPRIEDADES/RESULTADOS						
	CAP	Teor de Ligante (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	RT (Mpa)	MR (Mpa)	MR/RT
1	50/70	5,4	1734,0	3,9	1,930	9157,33	4756,73
2	30/45	5,5	1518,0	7	1,380	6278,00	4549,00
3	50/70	4,7	1006,0	-	1,460	10046,00	6880,82
4	30/45	5,2	1070,7	2,5	1,239	4312,53	3481,93
5	50/70	3,7	-	-	0,750	2767,00	3690,00
Misturas com 0,50% de PET adicionado							
TRABALHO	PROPRIEDADES/RESULTADOS						
	CAP	Teor de Ligante (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	RT (Mpa)	MR (Mpa)	MR/RT
2	30/45	5,5	1588,0	7	1,250	7251,00	5801,0
			1589,0	9	1,400	5466,00	3904,0
4	30/45	5,6	866,76	3,4	1,023	3350,53	3275,7
5	50/70	3,4	-	-	0,620	4009,00	6466,0
Misturas com 1,0% de PET adicionado							
TRABALHO	PROPRIEDADES/RESULTADOS						
	CAP	Teor de Ligante (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	RT (Mpa)	MR (Mpa)	MR/RT
2	30/45	5,4	1753,0	8	1,870	5160	2759,00
			1591,0	8	1,730	5624	3251,00
3	50/70	4,7	1165,0	-	1,180	8840	7491,52
4	30/45	5,7	957,51	3	1,157	3292	2845,48
5	50/70	4,2	-	-	0,600	3413	5688,00

Fonte: O autor

5.2.1 Teor de ligante de projeto

Nos Trabalhos 02 e 03, não houve a modificação do CAP, e, sim, a adição de PET diretamente na mistura, diferentemente de como é realizado na maioria das pesquisas que envolvem polímeros. Sendo assim, o teor de ligante ótimo é definido experimentalmente somente para a mistura de referência, e o mesmo é adotado para as misturas modificadas com PET.

É possível identificar na Tabela 8 que, para as misturas originais, o teor de ligante de projeto varia de 3,7% (Trabalho 05) a 5,5% (Trabalho 02). O valor médio obtido, nesse caso, é 4,9%, podendo-se dizer, então, que apenas três amostras estão acima deste valor médio calculado. Vale enfatizar que o valor de 3,7%, encontrado pelo Trabalho 05, é bastante discrepante em relação aos demais, o que resulta em um pavimento mais ruidoso com menor desempenho funcional.

Para as misturas com a incorporação de 0,5% de PET, identifica-se que a porcentagem de ligante ótimo obtida nos trabalhos é relativamente igual, exceto para o Trabalho 05, que apresenta um teor igual a 3,4%. O Trabalho 05 também perde para os demais em teor de ligante, quando se avaliam as misturas aditivadas com 1% de PET. Vale ressaltar o trabalho 03, que também apresenta um resultado razoável – 4,7% de teor de ligante.

Verificando os Trabalhos 03 e 05, observa-se que o CAP utilizado nos mesmos é o 50/70, que possui por si só uma consistência mais mole, fazendo com que as misturas necessitem de uma menor quantidade de ligante asfáltico para a garantia de uma flexibilidade adequada.

5.2.2 Estabilidade Marshall

A norma estabelece um valor mínimo para a estabilidade igual a 500 kgf. Constata-se, portanto, que, em todos os trabalhos apresentados, esse valor é superado, e, assim sendo, as misturas contêm valores acima do especificado.

Para as misturas convencionais, apenas o Trabalho 05 não avaliou a estabilidade Marshall. Contudo, considerando as demais misturas, nota-se que os valores de estabilidade variam de 1006 kgf a 1734 kgf, de tal forma que duas das amostras apresentam resultados acima da média, o que confere a tais misturas uma maior rigidez.

Quando se trata das misturas com 0,5% de material PET, os resultados dispostos no Trabalho 02 apresentam valores de estabilidade que equivalem a, aproximadamente, o dobro do valor obtido pelo Trabalho 04, apesar de possuírem um teor de CAP similar. Isso confirma, mais uma vez, a alta rigidez das misturas ensaiadas do Trabalho 02. Dessa forma, quanto maior o valor da estabilidade obtido, pior é o desempenho do asfalto, tornando-o mais rígido.

Tal rigidez pode ser responsável pelo rompimento do revestimento, ligeiramente percebido por meio do aparecimento de trincas. Além disso, através das fendas na camada de revestimento, a água penetra para o interior das demais camadas do pavimento, reduzindo, por conseguinte, a sua capacidade de deformabilidade, e, consequentemente, diminuindo a capacidade de suporte da estrutura, promovendo, assim, a sua degradação.

As misturas modificadas do Trabalho 04 apresentam menor rigidez, se comparadas às outras misturas asfálticas, para um mesmo percentual de adição de resíduo. Isso se dá pois os valores de estabilidade Marshall são significativamente menores. Logo, verifica-se que o teor de CAP 30/45 adotado é suficiente para proporcionar a flexibilidade da mistura.

No Trabalho 02, tanto as misturas constituídas de *flakes* com dimensões de 2 mm, quanto aquelas com *flakes* de 10 mm apresentam resultados elevados e insatisfatórios, quando comparados aos valores resultantes expostos pelos Trabalhos 03 e 04.

5.2.3 Fluência Marshall

Somente os Trabalhos 01, 02 e 04 apresentam resultados de fluência Marshall. Assim sendo, considerando as misturas de referência, tem-se que os valores de fluência encontrados estão dentro do limite estabelecido por norma (8 a 16 centésimos de polegadas ou 2,03 a 4,06 mm), com exceção do Trabalho 02.

Para as misturas modificadas com PET, verifica-se que apenas o Trabalho 04 obtém resultados dentro dos valores estabelecidos.

Há de se considerar que as misturas com maior quantidade de resíduo apresentam possíveis melhorias em sua capacidade elástica. Entretanto, deve-se atentar para o fato de que a fluência excessiva da mistura asfáltica do revestimento combinada à ação do tráfego e de temperaturas elevadas pode comprometer o desempenho do pavimento, contribuindo para o afundamento plástico em trilhas de roda (FABBRI, 2000).

Assim, o resultado apresentado pelo Trabalho 02 mostra um elevado valor de fluência, ineficaz para a obtenção de um pavimento durável, promovendo a deformabilidade do revestimento e surgimento de patologias, tais como o afundamento plástico acima mencionado e ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Afundamento plástico de trilha de roda



Fonte: DNIT (2003)

5.2.4 Resistência à Tração (RT)

Bernucci *et al.* (2008) destacam valores de RT entre 0,5 e 2,0 MPa para as misturas asfálticas a quente recém-moldadas. Baseando-se na Tabela 8 acima, é possível afirmar que os valores encontrados para a RT, apesar de bem distintos para um mesmo teor de PET adicionado, estão dentro da faixa especificada na literatura considerada.

Para as misturas convencionais, o valor de RT varia de 0,750 MPa a 1,930 MPa. Assim sendo, três misturas possuem valores de resistência superiores à média. Nesse caso, os resultados são os ideais para as misturas asfálticas, uma vez que em geral uma maior resistência na ruptura é também associada a uma maior resistência à fadiga.

O Trabalho 05 se destaca por apresentar valores significativamente baixos em relação aos demais trabalhos. É possível observar, ainda no Trabalho 05, que um aumento no percentual de adição de PET proporciona uma redução da Resistência à Tração, que, de certa forma, é uma desvantagem. Assim, há uma maior probabilidade de ocorrência de trincas e fendas por fadiga, panelas ou buracos nos pavimentos, oriundos do acúmulo das solicitações do tráfego ao longo do tempo.

Um revestimento composto por misturas com baixa resistência à tração está susceptível à deterioração progressiva, devido ao surgimento de patologias, como as trincas mostradas na Figura 14.

Figura 14 – Trincas no pavimento



Fonte: DNIT (2003)

No Trabalho 02, um aumento no percentual de PET corresponde a um aumento na RT, bem como no Trabalho 04. Logo, os Trabalhos 02 e 04, com adição de PET, apresentam resultados satisfatórios.

Levando em conta as misturas com 0,5% de *flakes* de PET de 2 mm e 10 mm do Trabalho 02, verifica-se, para as misturas com resíduos triturados de 10 mm, que a RT é maior. O contrário é observado quando se analisa as misturas com 1% de material PET.

5.2.5 Módulo de Resiliência (MR)

Com base nos resultados expostos na Tabela 8, conclui-se que as misturas dos Trabalhos 01 e 03 não atendem às especificações apresentadas por Bernucci *et al.* (2008), estando, portanto, fora da faixa estabelecida (2000 a 8000 MPa).

Todas as outras misturas, independentemente do teor de PET incorporado, apresentam resultados satisfatórios. Para as misturas aditivadas com 0,5% de resíduos, os valores de MR variam de 3350,53 MPa a 7251 MPa, enquanto, para aquelas que possuem 1% de PET, os valores de MR estão na faixa entre 3292 MPa e 8840 MPa.

O Trabalho 04, dentre todos, é aquele que apresenta os menores resultados de MR para as misturas aditivadas, o que mostra a eficiência das misturas quando adicionados os resíduos de PET.

No geral, comparando os valores de MR obtidos nos Trabalhos 02, 04 e 05 entre as misturas com 0,5% e 1% de PET, observa-se que um aumento no teor de resíduo gera uma redução no Módulo de Resiliência. Assim sendo, as misturas com maiores percentuais de PET apresentam maiores índices de deformações elásticas recuperáveis, absorvendo, dessa forma, mais tensões em uma estrutura de pavimentos.

Há de se considerar que maiores valores de Módulo de Resiliência contribuem para a oxidação ou enrijecimento do ligante asfáltico e resultam no aumento de rigidez dos revestimentos. Por consequência, essa rigidez afeta a capacidade do pavimento de resistir às deformações provocadas pelo tráfego intenso, promovendo o surgimento de trincas e defeitos, que aceleram o seu processo de degradação progressiva e comprometem a sua vida útil.

Com base nos resultados apresentados pelos Trabalhos 02, 04 e 05 (com menores valores de MR), é possível afirmar que a adição de PET é uma alternativa eficiente na busca pela flexibilidade e bom desempenho das misturas asfálticas, proporcionando a execução de revestimentos de boa qualidade e maior durabilidade.

5.2.6 Relação MR/RT

A relação entre o Módulo de Resiliência e a Resistência à Tração permite avaliar o comportamento das misturas asfálticas com relação ao trincamento. A razão entre esses parâmetros vem sendo usada como indicador da vida de fadiga das misturas, uma vez que agrega informações de rigidez e resistência, sendo mais desejável um pequeno valor da razão, dado que, com frequência, se busca: rigidez baixa a fim de se evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro do revestimento e alta resistência à tração, uma vez que, em geral, uma maior resistência na ruptura é também associada a uma maior resistência à fadiga (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Nesse sentido, baseando-se na relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração resultantes dos experimentos realizados, para as misturas de

referência (sem nenhuma adição de PET), essa razão encontra-se entre 3690 a 6880,82. Para as misturas com 1% de resíduo polimérico, o valor de MR/RT varia entre 3275,7 e 6466, enquanto, para as misturas aditivadas com 1% de PET, entre 2759 e 7491,52.

O Trabalho 04 apresenta também os menores resultados da razão MR/RT para as misturas modificadas com PET. Isso comprova que a incorporação de material PET proporciona a baixa rigidez das misturas asfálticas. Em contrapartida, o Trabalho 03 exibe os maiores valores de MR/RT.

Conclui-se, portanto, que, quanto menor o valor de MR/RT, melhor o comportamento mecânico da mistura, pois se une flexibilidade a uma boa resistência à tração. Assim sendo, os Trabalhos 02 (para as misturas aditivadas com resíduos de 10 mm) e 04 estão de acordo com a literatura, com resultados expressivos e relevantes para a garantia do bom desempenho dos pavimentos, evitando o trincamento do revestimento e o aparecimento de outros defeitos na sua superfície.

5.2.7 Misturas-Padrão

Considerando as misturas com percentual de 0,5% de PET incorporado, a Tabela 9 tem por finalidade comparar os resultados obtidos dessas últimas com suas respectivas misturas-padrão ou originais. Toma-se, como base, o teor de ligante ótimo de projeto e as propriedades mecânicas, conforme se pode verificar.

Vale ressaltar que os resultados das misturas convencionais para cada um dos trabalhos estão em negrito na Tabela.

Uma vez que no Trabalho 02 houve adição de PET diretamente na mistura, o teor de ligante de projeto não se alterou. Portanto, o valor assumido para a mistura modificada com 0,5% de PET, equivalente a 5,5%, é o mesmo obtido para a mistura de referência.

No Trabalho 04, observa-se que a adição percentual de resíduos corresponde a um aumento do teor do CAP 30/45, enquanto, no Trabalho 05, a incorporação do PET resulta em uma menor quantidade do ligante asfáltico (CAP 50/70). Como já discutido anteriormente, há uma diferença significativa entre os valores desses dois trabalhos, em decorrência do tipo de ligante adicionado e em função de sua consistência e dureza. Assim sendo, o Trabalho 04 comprova que o uso de resíduos poliméricos interfere no comportamento das misturas, proporcionando às mesmas

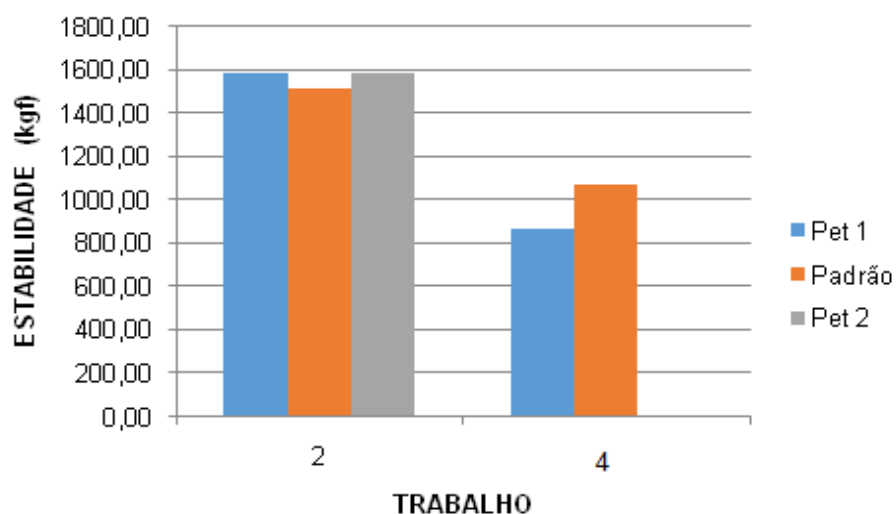
um melhor desempenho, o que não pode ser confirmado para o Trabalho 05 para o teor de PET considerado.

Tabela 9 – Propriedades e resultados das misturas aditivadas com 0,5% de PET e a mistura-padrão

Misturas com 0,50% de PET adicionado/Misturas-Padrão							
TRABALHO	PROPRIEDADES/RESULTADOS						
	CAP	Teor de Ligante (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	RT (MPa)	MR (MPa)	MR/RT
2	30/45	5,5	1588	7	1,25	7251	5801
			1589	9	1,4	5466	3904
		5,5	1518	7	1,38	6278	4549
4	30/45	5,6	866,76	3,4	1,023	3350,53	3275,7
		5,2	1070,7	2,5	1,239	4312,53	3481,93
5	50/70	3,4	-	-	0,62	4009	6466
		3,7	-	-	0,75	2767	3690

Fonte: O autor

Gráfico 3 – Estabilidade para as misturas com 0,5% de PET e misturas-padrão



Fonte: O autor

No que se refere à estabilidade Marshall, observa-se no Gráfico 3 que a adição de *flakes* de PET de 2 mm e 10 mm de dimensões no Trabalho 02 resulta em maiores valores de estabilidade, que, por sua vez, tornam as misturas mais rígidas. Apesar desse último não apresentar um bom resultado para o teor de PET considerado, o Trabalho 04 mostra que a estabilidade diminui consideravelmente com o acréscimo de 0,5% de resíduos, o que torna as misturas mais flexíveis,

susceptíveis às ações do tráfego intenso de veículos e às condições climáticas impostas.

É importante ressaltar que, no Trabalho 02, as misturas designadas por PET 1 equivalem àquelas com *flakes* de dimensões de 2 mm, enquanto as misturas referidas como PET 2 possuem resíduos triturados de 10 mm de tamanho.

Quanto à fluência Marshall, apenas o Trabalho 04 assume valores dentro do que é especificado em norma, a partir do qual se identifica que misturas modificadas exibem um melhor comportamento elástico se comparadas às misturas-padrão. Em contrapartida, os resultados apresentados pelo Trabalho 02 mostram que para misturas aditivadas com *flakes* de 2 mm, a fluência não se altera, e, para a adição de *flakes* de 10 mm, o valor de fluência aumenta 2 mm em relação ao da mistura convencional. Nesse sentido, no Trabalho 02, os resultados obtidos, contrariamente ao Trabalho 04, determinam que a adição de PET não acarreta melhorias no comportamento das misturas.

Dentro deste escopo, baseando-se na revisão da literatura e nas vantagens inerentes ao uso do PET na pavimentação, é possível afirmar que o Trabalho 02 comprova experimentalmente a eficácia deste material.

É perceptível que, ao se avaliar todos os trabalhos no quesito resistência à tração, os mesmos demonstram que a adição de resíduos na proporção de 0,5% gera valores de RT menores quando comparados aos valores obtidos das misturas-padrão, exceto no Trabalho 02 para a incorporação de PET com dimensões de 10 mm. Nesse caso, a RT de 1,4 MPa é um pouco maior em relação à da mistura convencional (1,38 MPa), e é demonstrado, somente para este trabalho, que o aumento da RT com a adição de PET é responsável pela resistência à fadiga das misturas asfálticas.

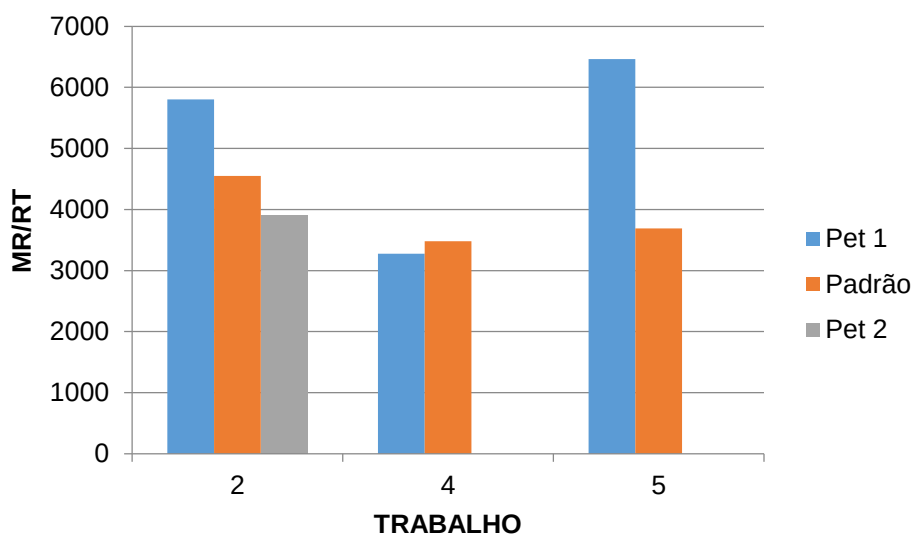
Com relação ao Módulo de Resiliência, o Trabalho 02 (para a adição de *flakes* de 10 mm) e o Trabalho 04 estabelecem uma relação inversamente proporcional entre teor de PET adicionado e MR. A incorporação de resíduos corresponde à redução do Módulo de Resiliência, que, de acordo com a revisão da literatura, é exatamente o que se espera, uma vez que a utilização de materiais poliméricos auxilia na absorção das tensões atuantes na estrutura dos pavimentos.

A relação MR/RT é de suma importância para a avaliação da rigidez e vida de fadiga das misturas, visto que apenas os Trabalho 02 e 04 apresentam resultados eficazes, uma vez que os valores de MR/RT são menores se comparados aos da

misturas-padrão. Assim sendo, tais misturas avaliadas apresentam-se mais flexíveis, o que indica que teriam uma maior vida de fadiga. Ademais, isso pode ser um bom indicativo de qualidade, uma vez que as misturas com asfalto modificado com polímero podem ser usadas em revestimento de pavimentos com alta solicitação de tráfego.

É possível visualizar a resposta MR/RT no Gráfico 4, onde fica perceptível no Trabalho 02, que as misturas com *flakes* de 10 mm apresentam um menor valor da razão em relação à mistura-padrão, bem como é visto no Trabalho 04.

Gráfico 4 – MR/RT para as misturas com 0,5% de PET e misturas-padrão



Fonte: O autor

Busca-se, também, avaliar os trabalhos em comuns, com 1% de teor de PET adicionado. Assim sendo, a Tabela 10 exprime os resultados das propriedades analisadas e comparadas nesta pesquisa. De forma similar ao que foi feito anteriormente, tem-se como referência os resultados das misturas convencionais a fim de se verificar as vantagens apresentadas pela incorporação de resíduos poliméricos.

Nos Trabalhos 02 e 03, como a adição de PET foi executada de forma direta na mistura, não houve mudanças significativas no valor do teor de ligante ótimo. Os Trabalhos 04 e 05 possibilitaram comprovar que misturas modificadas com polímeros exigem uma maior quantidade de CAP. No Trabalho 04, isso já tinha se confirmado acima, para o teor de 0,5% de PET. Entretanto, para o Trabalho 05, esse

comportamento ainda não tinha sido identificado. Ou seja, no Trabalho 05, para 0,5% de PET, as misturas se apresentavam mais rígidas em comparação à padrão. Ao adicionar 1% de PET (em maior porcentagem), a mistura exibe um comportamento distinto, se mostrando mais eficiente quando comparada à padrão. Isso demonstra que o comportamento de melhoria das misturas se dá para teores de PET adequados à cada mistura.

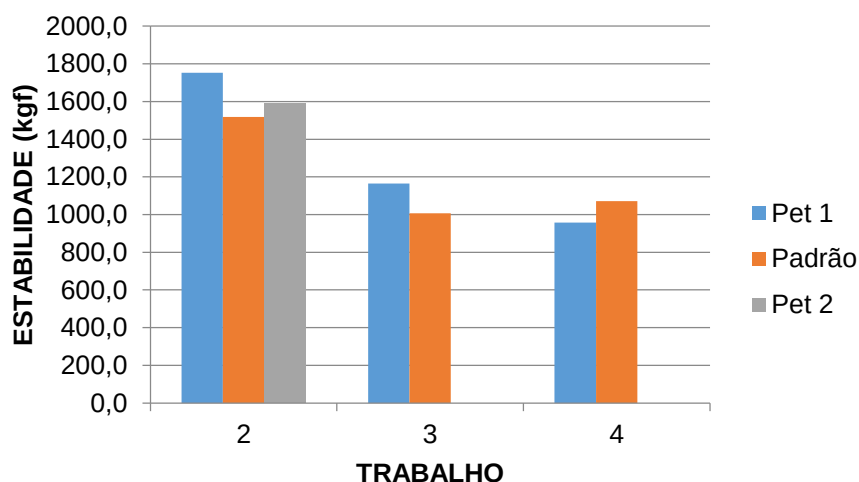
Tabela 10 – Propriedades e resultados das misturas aditivadas com 1% de PET e a mistura-padrão

Misturas com 1,0% de PET adicionado/Misturas-Padrão							
TRABALHO	CAP	PROPRIEDADES/RESULTADOS					
		Teor de Ligante (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	RT (MPa)	MR (MPa)	MR/RT
2	30/45	5,4	1753,0	8	1,870	5160	2759,00
			1591,0	8	1,730	5624	3251,00
		5,5	1518	7	1,38	6278	4549
3	50/70	4,7	1165,0	-	1,180	8840	7491,52
		4,7	1006	-	1,46	10046	6880,82
4	30/45	5,7	957,51	3	1,157	3292	2845,48
		5,2	1070,7	2,5	1,239	4312,53	3481,93
5	50/70	4,2	-	-	0,600	3413	5688,00
		3,7	-	-	0,75	2767	3690

Fonte: O autor

O Gráfico 5 ilustra melhor os resultados obtidos quanto à estabilidade.

Gráfico 5 – Estabilidade para as misturas com 1% de PET e misturas-padrão



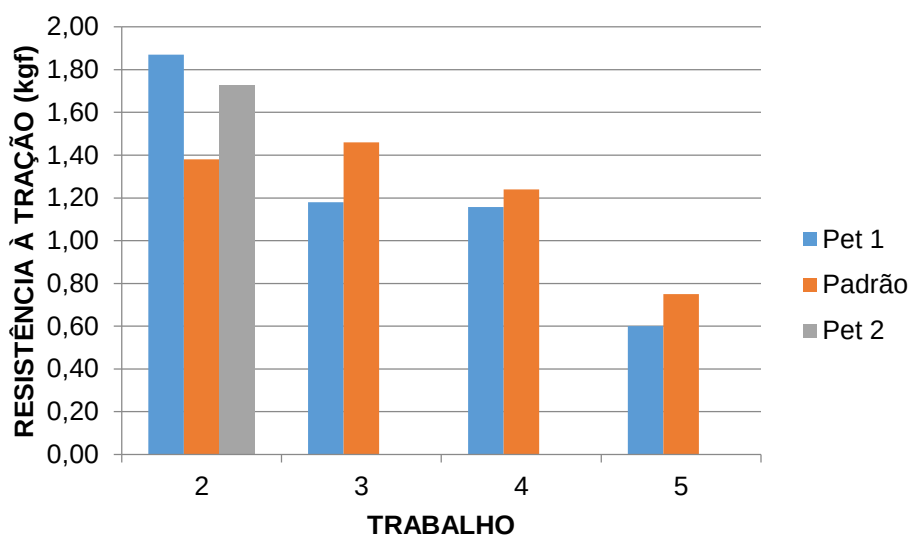
Fonte: O autor

Neste contexto, observa-se que somente o Trabalho 04 confirmou a eficiência do uso do PET na pavimentação, obtendo-se menor valor de estabilidade para a mistura modificada em relação à de referência. As misturas dos demais trabalhos apresentam resultados insatisfatórios, pois a adição de PET, nesse caso, promove aumento da rigidez das misturas quando comparadas às misturas convencionais.

Tal como avaliado para 0,5% de PET incorporado, somente o Trabalho 04 obtém valores de fluência dentro dos limites especificados. Dessa forma, para esse trabalho em particular, a mistura aditivada com 1% de PET apresenta propriedades elásticas melhores às da mistura convencional. Os elevados valores obtidos de fluência para as demais misturas podem ser justificados pela alteração nas características do teor de CAP.

No que se refere à Resistência à Tração (cujos resultados estão contidos no Gráfico 6), o Trabalho 02 apresenta resultados compatíveis com a revisão teórica da literatura, o que comprova que a incorporação de material PET melhora o desempenho das misturas, uma vez que maiores valores de RT são identificados em relação às suas respectivas misturas-padrão.

Gráfico 6 – RT (em MPa) para as misturas com 1% de PET e misturas-padrão



Fonte: O autor

Os Trabalhos 02, 03 e 04, no quesito Módulo de Resiliência, mostram que a adição de PET na proporção de 1% confere às misturas maior deformação e menor rigidez quando comparadas às misturas convencionais correspondentes.

Quanto à avaliação da vida de fadiga, a relação MR/RT obtidas nos Trabalhos 02 e 04 demonstram que as misturas aditivadas têm melhor comportamento flexível e absorvem as tensões atuantes de maneira expressiva, o que contribui para uma vida útil e de fadiga maior se comparadas às das misturas comuns sem adição de PET.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção, em especial, são apresentadas as considerações finais deste estudo, que teve o objetivo geral pautado na comparação entre misturas de concreto asfáltico com adição de resíduos de PET e misturas convencionais. Neste contexto, apontam-se, a seguir, alguns comportamentos verificados no decorrer da realização deste trabalho.

Foi possível verificar que a incorporação de resíduos PET de garrafas pós-consumo na pavimentação asfáltica, além de minimizar os problemas atuais da disposição inadequada de tais materiais, traz inúmeras vantagens em termos de resistência, flexibilidade e durabilidade dos pavimentos.

Com base nos experimentos mecânicos realizados na literatura, conclui-se que as misturas aditivadas com pó e/ou *flakes* de PET, se comparadas às respectivas misturas originais, sem qualquer adição de polietileno tereftalato, apresentaram, no geral, resultados satisfatórios, comprovando a eficácia da utilização e aplicação de tal polímero.

Na maioria dos trabalhos, foi possível observar que o aumento de teor de PET resultou em um aumento no percentual de ligante ótimo de projeto.

Em termos de fluência, somente o Trabalho 04 obteve resultados compatíveis com aqueles estabelecidos em norma, para as misturas modificadas. Uma vez que os valores obtidos para as demais misturas foram maiores, inclusive em relação às misturas convencionais, deve-se atentar para o fato de que a fluência excessiva combinada à ação do tráfego e de temperaturas elevadas pode comprometer o desempenho do pavimento, contribuindo para a deformação progressiva e o consequente afundamento plástico em trilhas de roda.

No que se refere à estabilidade, todas as misturas superaram o valor mínimo especificado por norma, equivalente a 500 kgf. Entretanto, nem todas as misturas modificadas apresentaram resultados satisfatórios se comparados aos valores resultantes das misturas de referência. Contudo, constatou-se, em partes, que um aumento percentual de PET às misturas corresponde a menores valores de estabilidade, diminuindo a rigidez das mesmas. Isso contribui para a eficácia do desempenho das misturas modificadas com o resíduo provenientes da moagem de garrafas PET pós-consumo.

Dado que uma maior resistência na ruptura está associada a uma maior resistência à fadiga, os Trabalhos 02 e 04, com adição de PET, apresentam resultados satisfatórios em termos de Resistência à Tração. Neste contexto, observa-se nos mesmos que um aumento no percentual de PET corresponde a um aumento na Resistência à Tração das misturas asfálticas modificadas.

Quanto ao Módulo de Resiliência, identifica-se que elevados valores obtidos resultam em enrijecimento do ligante asfáltico e no aumento da rigidez dos revestimentos, interferindo de forma negativa na capacidade do pavimento de resistir às deformações provocadas pelo tráfego intenso. Contrapondo essa consideração, os Trabalhos 02, 04 e 05, com misturas com 0,5% e 1% de PET, mostram que um aumento no teor de resíduo gera uma redução no Módulo de Resiliência, tornando a mistura mais flexível e mais susceptível às solicitações impostas ao revestimento asfáltico.

Por fim, relacionando o MR e a RT, tem-se que a razão entre tais propriedades permite definir a vida de fadiga dos revestimentos, avaliando o comportamento das misturas em relação ao surgimento de patologias como as trincas e fendas. Sabendo-se que para a garantia do bom desempenho dos pavimentos e comportamento mecânico satisfatório das misturas, buscam-se, simultaneamente, baixa rigidez e elevada resistência à tração. Assim sendo, o Trabalho 04 assume esse papel, dado que a razão MR/RT obtida das misturas modificadas é a menor.

Comparando os resultados das misturas aditivadas com pó e *flakes* de PET com as misturas convencionais, é possível verificar, de um modo geral, que a adição de PET influi positivamente no comportamento das misturas, sendo que os resíduos são capazes de manter e até mesmo melhorar as propriedades do revestimento dos pavimentos, cumprindo-se o objetivo principal desta pesquisa.

Conclui-se, então, que o PET apresenta potencial para ser utilizado como aditivo em misturas asfálticas com ligante asfáltico convencional. Entretanto, fica a ressalva de que melhorias devem ser executadas, já que houve algumas divergências entre os resultados de alguns trabalhos, mostrando que há uma lacuna a ser estudada e explorada neste campo de pesquisa.

7 REFERÊNCIAS

- ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas. Solução para pavimentar sua cidade.** Rio de Janeiro: Abeda, 2001.
- ABTAHI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; HEJAZI, S. M. Fiber-reinforced asphalt-concrete—a review. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 6, p. 871-877, 2010.
- Airey, G. D. **Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens.** Fuel, v.82, p. 1709-1719, 2003.
- AQUARONE, E. **Biotecnologia Industrial: Engenharia Bioquímica.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.
- ARAO, M. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a Inserção de Polietileno Tereftalato (PET) Triturado.** 2016. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro/RJ. 2016.
- ARAÚJO, L. E. O. **Estudo das interações químicas, físicas e reológicas de ligante asfáltico modificado a temperatura intermediária com fibras de poliéster reciclado.** 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus/AM. 2013.
- ASPHALT INSTITUTE. **Superpave Mix design: Superpave series.** SP-2. 3. ed. [S.I.]:[s.n.], 2001.
- ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook.** Manual series n.4. Lexington, KY, USA, 1987. Versão traduzida, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA DE PLÁSTICOS. 2005. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br>>. Acesso em: 10 abril 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **Panorama: Indústria do PET no Brasil.** 2013. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/uploads/File/Market%20Overview%202013.pdf>>. Acesso em: 10 abril 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9935: Agregados – Terminologia,** Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- _____. **NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação - Apresentação.** Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfálticas: materiais, projeto e restauração**. Ed Oficina de textos: São Paulo, Brasil, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008.475p.

BRINGEL, R. M. **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos**. 2007. 174f. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica), Programa de Pós-Graduação em Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE. 2007.

CARDOSO, A. P. P. **Estudo em laboratório do comportamento mecânico de misturas betuminosas utilizadas em pistas experimentais**. 2002. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 2002.

CAVALCANTI, L. S. **Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vila de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. 2010. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2010.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 151p., il.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. ANUÁRIO. **CNT dos Transportes - Estatísticas Consolidadas 2017**. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/>>. Acesso em: 15 maio 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Brasília, 2017. p.406, il.

SILVA, C. T. **Avaliação de metodologia de obtenção do ácido tereftálico via reciclagem química do PET**. 2012. 95f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2012.

DEBIRTOLLI, F. B. Acompanhamento da Implantação de Pavimentação Asfáltica na rodovia de São Miguel do Oeste entre: as estacas 79 e 94. **Repositório de Relatórios – Engenharia Civil**, n. 2, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006a. 274 p. (IPR. Publ., 719).

_____. **DNIT-ES 031: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**, 2006b. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e>

manuais/normas/especificacao-deservicos-es/dnit031_2006_es.pdf> Acesso em: 10 maio 2019.

_____. **DNER-ME 043:** Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall, 1995a. Disponível em: < <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me043-95.pdf> > Acesso em: 10 maio 2019.

_____. **DNIT 005:** Defeitos no pavimentos flexíveis e semi-rígidos – terminologia, 2003, Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/terminologiater/dnit005_2003_ter.pdf> Acesso em: 10 maio 2019.

_____. **DNIT-ME 135:** Determinação da módulo de resiliência – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 2010a. Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT135_2010_ME.pdf> Acesso em: 10 maio 2019.

_____. **DNIT-ME 136:** Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 2010b. Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT136_2010_ME.pdf> Acesso em: 10 maio 2019.

_____. **DNIT-ME 141:** Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço, Rio de Janeiro – RJ, 2010b. Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit141_2010_es.pdf/view > Acesso em: 10 maio 2019.

DIAS, M. R. **Utilização de Mistura Asfáltica com Borracha pelo Processo da Via – Seca Execução de um Trecho Experimental Urbano em Porto Alegre – RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 2005.

FARIAS M. M.; PALMEIRA E. M. Agregados para construção civil. *In:* ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2010. v. 1, p. 483-526.

FRANCISCO, A. **Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis.** 2012. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção), Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança/SP. 2012.

FRANKLIM, T. N. **Avaliação da Adesividade Ligante – Agregado e Misturas Asfálticas por Técnicas de Análise de Superfícies.** 2007. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2007.

GIRALDI, A. L. F. M. **Compósitos híbridos de poli (tereftalato de etileno)(PET)/fibra de vidro (FV)/modificador de impacto (E-MA-GMA).** 2008. 109f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP. 2008.

GONÇALVES, F. J. P. **Estudo do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados**. 2002. 467p. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 2002.

GREEN, P. J. Binders. In: Nicholls, J.C. (eds.) **Asphalt Surfacing**. E&FN Spon, Londres, Inglaterra. 1998.

GUILHERME, D. D. P.; VELOSO, A. A.; COSTA, M. A. A.; SILVA, E. J.; SILVA, M. J. C. **Avaliação Funcional do pavimento flexível: Estudo de Caso – Trecho da Rodovia RN-016**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. 2017. Disponível em: <http://www.confea.org.br/media/contecc2017/civil/45_afdpfedctdrr.pdf>. Acesso em: 10 maio 2019.

HERMES, T. B. **Impacto do alto tráfego em pavimento dimensionado para baixo tráfego-estudo de caso: Coronel Barros/RS**. 2013. 81f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí/RS. 2013.

LEWANDOWSKI, L. H. **Polymer Modification of Paving Asphalt Binders**. In: Rubber Chemistry and Technology: Polymers in Asphalt. 1994.

LOUZADA, N. S. L. **Experimental study of soils reinforcement with crushed Polythylene Terephthalate (PET) residue**. 2016. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2016.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de misturas asfálticas; efeito da compactação por impacto e giratória**. 2004. 461 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2004.

MELO, J. W. **Produção e caracterização de pó de pet-poli (tereftalato de etileno) obtido a partir de garrafas pós-consumo**. 2004. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, UFOP, CETEC, UEMG, Belo Horizonte/MG. 2004.

MENARIA, Y.; SANKHLA, R. **Uso de resíduos de plástico em pavimentos flexíveis - Estradas verdes**. Open Journal Of Civil Engenharia, Vol.5, pp.299-311, 2015.

MOTHÉ, M. G. **Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica**. 2009. 182f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2009.

MOTTA, L. M. G. **Considerações a respeito de pavimentos e tráfegos em vias urbanas.** In: **Reunião de pavimentação urbana**, 6^a. 1995, Santos. Anais...Santos, Associação Brasileira de Pavimentação, Santos. p 25-52. 1995.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M. **Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas.** In: Congresso Panamericano de engenharia de trânsito e transporte, 11, 2000, Gramado. Anais... Rio de Janeiro: ANPET, p. 1.007-17. 2000.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** 2005. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP. 2005.

QUEIROZ, B. O. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas modificadas com politereftalato de etileno (PET).** 2016. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa/PB. 2016.

RADER, A. R. S. **Estudo da adição de resíduos de garrafas pet pós-consumo em misturas asfálticas à quente.** 2018. 99f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí/RS. 2018.

RIBEIRO, T. P. Estudo descritivo das principais patologias em pavimento flexível. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 1, p. 733-754, 2017.

ROCHA, B. B. J.; ROMANI, J. P. F.; TANNOUNS-JUNIOR, R.; OLIVEIRA, V. L. **Estudo de viabilidade do uso de garrafas plásticas na composição do revestimento asfáltico.** 2017. 164 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul/SP. 2017.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do trincamento dos pavimentos.** 1991. 208p. Tese (Doutorado em Engenharia), Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 1991.

ROMÃO, W. Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, 2009.

ROSSI, A. C. **Etapas de uma obra de pavimentação e dimensionamento de pavimento para uma via na Ilha do Fundão.** 2017. 65p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2017.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Projetos Rodoviários.** 1. ed. São Paulo: Pini, 2007.

_____. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: PINI, 2001. v. 2. 761p.

_____. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997.

SERRA, G. A., GUIMARÃES, A. C. R., SILVEIRA, V. L., BARROS, A. M. S., REIS, A. C. C. **Estudo da adição de resíduos de polietileno tereftalato (PET) como agregado alternativo para misturas**. XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Gramado. 2018.

SILVA, A. S.; MARQUES, V. P. **Estudo Comparativo entre o CBQU convencional e o CBQU com adição do pó de borracha**. 2018. 75p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil), Unievangélica, Anápolis/GO. 2018.

SILVA, J. A. A. **A utilização do politereftalato de etileno (PET) em misturas asfálticas**. 2015. 141f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB. 2015.

SILVA, L. S. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos: influência da adição de polímeros e comportamento frente à radiação UV**. 2005. 155f. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 2005.

SOJOBI, A. O.; NWOBODO, E. S.; ALADEGBOYE, J. O. **Reciclagem de polietileno Tereftalato (PET) Resíduos de garrafas plásticas em betão betuminoso asfáltico**. Cogent Engineering, Vol.3, pp.1-28, 2016.

SULYMAN, M.; HAPONIUK, J.; FORMELA, K. Utilization of recycled polyethylene terephthalate (PET) in engineering materials: a review. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 7, n. 2, p. 100, 2016.