



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS  
MODIFICADAS COM POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)**

**BISMAK OLIVEIRA DE QUEIROZ**

JOÃO PESSOA – PB  
SETEMBRO DE 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS  
MODIFICADAS COM POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)**

Dissertação de Mestrado submetida ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil e Ambiental da  
Universidade Federal da Paraíba como  
parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre

**BISMAK OLIVEIRA DE QUEIROZ**  
**ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo**

JOÃO PESSOA – PB  
SETEMBRO DE 2016

Q3a      Queiroz, Bismak Oliveira de.  
Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas  
Modificadas com politereftalato de etileno (PET) / Bismak  
Oliveira de Queiroz.- João Pessoa, 2016.  
125 f. : il.-  
  
Orientador: Profº. Drº. Ricardo Almeida de Melo.  
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT  
  
1. Revestimento - Asfalto. 2. Mistura Asfáltica Porosa.  
3. Politereftalato de Etileno (PET). 4. Ligante Asfáltico Modificado.  
5. Processo Seco. I. Título.

UFPB/BC

CDU – 693.78(043)

**"AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS  
MODIFICADAS COM POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)"**

**BISMAK OLIVEIRA DE QUEIROZ**

Dissertação aprovada em 30 de setembro de 2016

Período Letivo: 2016.2



**Prof. Dr. RICARDO ALMEIDA DE MELO – UFPB**  
Orientador



**Prof. Dr. GIVANILDO ALVES DE AZEREDO**  
Examinador Interno



**Profª. Drª. VERÔNICA TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO**  
Examinador Externo

João Pessoa/PB  
2016

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico esse trabalho aos meus pais, Edezio e Marizete, aos meus irmãos, Edezio Filho, José Walter e Carlos Daniel, às minhas irmãs, Daniele e Maria Eduarda, aos meus primos Givanildo, Inácio Neto e Ivanildo, e ao meu sobrinho Bernardo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Edezio e Marizete pelo exemplo de seres humanos que são;

Ao meu primo Givanildo por estar sempre ao meu lado;

As minhas Tias Elza, Eulina e Francisca e ao meu Tio Fernando por sempre terem me ajudado de todas as formas possíveis;

Aos amigos Adriano e Gabriel pela convivência diária;

Aos amigos da graduação, e hoje colegas de profissão, pelo incentivo;

Aos colegas do mestrado por dividirem as dificuldades enfrentadas ao longo destes dois anos e seis meses;

Ao meu professor orientador Ricardo Almeida de Melo pela paciência, motivação e pelos conhecimentos transmitidos ao longo dessa caminhada e também pelo exemplo de profissional que é;

A todos os funcionários e a professora Carmem Lúcia Moreira Gadelha do laboratório de Saneamento da UFPB;

A todos os funcionários do Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) e do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV) da UFPB, especialmente João, Marcos e Delmarcos pela ajuda na realização dos ensaios e também pelo incentivo;

Ao colega Sérgio pela ajuda na realização dos ensaios e especialmente pelas idas à Campina Grande;

Aos alunos de iniciação científica Lucas Giovanni, Lucas Matheus, Kildenberg e Vinícius pela ajuda na realização dos ensaios;

A todos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG pela disponibilização do espaço, especialmente ao mestrando Daniel pelo auxílio na realização dos ensaios de viscosidade rotacional, MR, FN e fadiga;

A todos do laboratório de Oficina Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPB, especialmente ao professor Rodinei Medeiros Gomes, pela disponibilização do espaço e auxílio para fabricação de alguns equipamentos utilizados neste trabalho;

À Capes pela bolsa de mestrado;

À PETROBRAS, pelo auxílio financeiro, destinado à reforma da infraestrutura física e compra de equipamentos para o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV) da UFPB;

Às empresas, NOVATEC, REPET NORDESTE RECICLAGEM LTDA E BRASQUÍMICA PRODUTOS ASFÁLTICOS LTDA pela doação dos materiais utilizados neste trabalho.

E, finalmente, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para conclusão deste trabalho.

*Temer jamais!*



## RESUMO

A água acumulada sobre a superfície do pavimento é uma das responsáveis pela ocorrência de acidentes em rodovias, por reduzir o atrito na interface pneu-pavimento. A adoção de misturas asfálticas porosas pode aumentar a segurança viária, pois seu uso favorece a aderência entre os pneus dos veículos e o pavimento, especialmente em pista molhada, tendo em vista a sua alta capacidade de drenagem. Diante disso, esta pesquisa objetivou analisar o uso de resíduos de politereftalato de etileno (PET) como aditivo para misturas asfálticas porosas. O método de trabalho consistiu na realização de ensaios de caracterização dos materiais utilizados, determinação do teor de projeto de ligante asfáltico, confecção de três tipos de misturas asfálticas (convencional, com adição de PET e com asfalto polímero) e realização de ensaios de escorrimento, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, deformação permanente, vida de fadiga e permeabilidade para as misturas asfálticas, em seus respectivos teores de projeto de ligante asfáltico. A adição de PET nas misturas foi realizada via processo seco nas proporções 0,00; 0,33; 0,50; 0,75 e 1,00% em relação ao peso dos agregados. As misturas asfálticas com asfalto modificado por polímero foram tomadas como referência, tendo em vista a preferência do uso desse tipo de ligante em misturas porosas. Em termos de dosagem, adições de PET em até 0,75% resultaram na redução do teor de projeto de ligante asfáltico. Além disso, o PET contribuiu para a inibição do escorrimento do ligante e favoreceu o desempenho das misturas em relação ao dano por umidade induzida. As misturas aditivadas com PET apresentaram um aumento no módulo de resiliência e uma tendência de maior vida de fadiga para baixos níveis de tensões e elevadas repetições de carga. Porém, mostraram-se suscetíveis à deformação permanente, mesmo tendo apresentado um maior enrijecimento. Quanto a permeabilidade, é necessário a realização de mais ensaios de modo a garantir uma melhor confiabilidade nos resultados. De todo modo, pôde-se verificar que o PET pode apresentar viabilidade de ser utilizado como aditivos em misturas asfálticas porosas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Revestimento, mistura asfáltica porosa, politereftalato de etileno (PET), ligante asfáltico modificado, processo seco.

## **ABSTRACT**

The accumulated water on pavement surfaces is one of the factors responsible for the occurrence of traffic accidents, as it reduces the tire-pavement interface friction. The use of porous asphalt mixtures can increase road safety because it increases the adherence between a vehicle's tires and the pavement, especially in a wet highway, owing to its high drainage capacity. Accordingly, this research had the purpose of analyzing the use of polyethylene terephthalate (PET) waste as an alternative of additives to porous asphalt mixtures. The work method consisted of materials characterization, determination of the optimum binder content, production of three kinds of asphalt mixtures (conventional, with the addition of PET, and with polymer asphalt) and the performance of draindown tests, moisture susceptibility, resilient modulus, flow number, fatigue test, permeability to the asphalt mixtures, in their respective optimum binder contents. The PET was added to the mixtures by a dry process in the proportions of: 0; 0,33; 0,5; 0,75 e 1% regarding to the weight of the aggregates. The asphalt mixtures with polymer asphalt were taken as reference. Considering the mixtures design, additions of 0,75% PET up carried out the lowest optimum binder content. Besides that, the addition of PET contributed for a binder draindown inhibition and improved the mixtures performance regarding to moisture susceptibility. The PET additivated mixtures presented an increasing in the resilient modulus and a tendency of a longer fatigue life at low tension levels and high number of load applications. However, the mixtures are susceptible to rutting, even though presenting stiffening. Concerning to permeability, the execution of only one test became inconclusive. Although, it was verified that PET can present viability of being used as additive porous asphalt mixtures.

**KEY-WORDS:** Surface course, porous asphalt mixtures, polyethylene terephthalate (PET), modified asphalt binder, dry process.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percolação de água em: a) pavimento asfáltico poroso, b) pavimento asfáltico com revestimento poroso e c) pavimento asfáltico convencional .....	22
Figura 2 - Corpo de prova cilíndrico extraído de pista experimental: revestimento poroso executado sobre um revestimento denso, ambos de concreto de cimento Portland .....	23
Figura 3 – Melhoria das condições de visibilidade ocasionada pelo uso de revestimento poroso: à direita veículo trafegando em trecho com revestimento denso convencional e à esquerda o mesmo veículo trafegando em trecho com revestimento poroso .....	24
Figura 4 - Revestimento poroso composto por duas camadas de granulometrias distintas .....	26
Figura 5 - Sentido do fluxo d'água e regiões do pavimento onde há colmatção resultante da deformação permanente .....	27
Figura 6 - Estrutura química do PET .....	34
Figura 7 – Esquema de forças atuantes num pneu em movimento sobre o pavimento ..	39
Figura 8 – Componentes da força de atrito na interação pneu-pavimento .....	40
Figura 9 - Níveis de textura da camada de revestimento de um pavimento .....	41
Figura 10 - Influência da textura na interação pneu-pavimento .....	42
Figura 11 – Interferência do filme d'água na interface pneu-pavimento e pressões “elastohidrodinâmicas” .....	43
Figura 12 – Esquema do experimento de Darcy .....	46
Figura 13 - Esquema de funcionamento de um permeâmetro para misturas asfálticas ..	50
Figura 14 - Curva típica obtida no ensaio de creep dinâmico .....	54
Figura 15 - Tensões no pavimento e surgimento de trincas na parte inferior do revestimento asfáltico .....	55
Figura 16 - Máquina Los Angeles .....	59

Figura 17 - Viscosímetro rotacional .....	62
Figura 18 - Planilha eletrônica utilizada para composição das misturas .....	63
Figura 19 - Preparo das misturas asfálticas aditivadas com PET .....	65
Figura 20 - PET granulado após peneiramento. ....	65
Figura 21 – Ensaio de resistência à tração indireta .....	68
Figura 22 - Ensaio Cântabro .....	69
Figura 23 - Ensaio de escorrimento .....	70
Figura 24 - Etapas do condicionamento dos corpos de prova para determinação da resistência à tração para avaliação do dano por umidade induzida .....	72
Figura 25 - Arranjo e equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida para determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas .....	74
Figura 26 - Ensaio creep dinâmico - determinação do Flow Number (FN) .....	75
Figura 27 - Permeâmetro para determinação da permeabilidade de misturas asfálticas	76
Figura 28 - Aparatos para moldagem dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade .....	77
Figura 29 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade .....	78
Figura 30 - Curvas granulométricas obtidas para os agregados e para a cal .....	80
Figura 31 - Curva viscosidade versus temperatura para os ligantes asfálticos.....	82
Figura 32 – Faixas granulométricas testadas na fase de pré-dosagem .....	84
Figura 33 - Faixas granulométricas utilizadas na pesquisa .....	85
Figura 34 - Volume de vazios versus teor de ligante asfáltico .....	87
Figura 35 - Massa específica aparente versus teor de ligante asfáltico .....	88
Figura 36 - Resistência à tração indireta versus teor de ligante asfáltico .....	89

Figura 37 - Desgaste Cântabro versus teor de ligante asfáltico.....	90
Figura 38 - Teor de projeto de ligante asfáltico para as misturas propostas .....	92
Figura 39 - Resultados do ensaio de escorrimento .....	93
Figura 40 - Resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados para avaliação do dano por umidade induzida.....	95
Figura 41 - Resistência à tração retida por umidade induzida das misturas propostas ..	96
Figura 42 - Falhas adesiva e coesiva .....	97
Figura 43 - Módulo de resiliência das misturas propostas .....	99
Figura 44 - Relação MR/RT das misturas propostas.....	101
Figura 45 – Aspecto do corpo de prova após o ensaio creep dinâmico.....	102
Figura 46 - Flow Number das misturas propostas .....	103
Figura 47 - Vida de fadiga versus diferença de tensões das misturas propostas .....	105
Figura 48 - Corpo de prova Marshall convencional e moldado para ensaio de permeabilidade.....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de densidade e absorção e abrasão Los Angeles para os agregados graúdos.....	81
Tabela 2 - Volume de vazios em função do teor de CAP para cada mistura .....	83
Tabela 3 – Misturas asfálticas estudadas .....	86
Tabela 4 – Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico para as misturas propostas .....	91
Tabela 5 - Relação MR/RT para as misturas propostas.....	101
Tabela 6 - Constantes obtidas na regressão linear .....	106
Tabela 7 - Diferença de tensões e vida de fadiga das misturas propostas .....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AMP – Asfalto modificado por polímero

ASTM – *American Society for Testing Materials*

$\Delta h$  - Diferença de pressão

CAP - Cimento asfáltico de petróleo

CPA – Camada porosa de atrito

DC – Deformação controlada

DMT – Densidade máxima teórica

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

$E_{CPM}$  - energia específica aplicada ao corpo-de-prova Marshall

FN – *Flow Number*

$G_{mb}$ : massa específica aparente da mistura asfáltica

HDPE - *High density polyethylene*

IFI - *International Friction Index*

i- Gradiente hidráulico

K – Coeficiente de permeabilidade

L - Altura da amostra ensaiada

LABEME – Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da UFPB

LAPAV – Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

LDPE - *Low density polyethylene*

LEP - Laboratório de Engenharia de Pavimentos e Geotécnica

MD - Módulo dinâmico

MR - Módulo de resiliência

N – Vida de fadiga

$N_G$  - Número de golpes por face do corpo de prova

QM - Quociente Marshall

RBV - relação betume/vazios

RT - Resistência à tração indireta

RTR – Resistência à Tração Retida por Umidade Induzida

SMA – *Stone Matrix Asphalt*

TC - Tensão controlada

TRLPD - *Triaxial Repeated Load Permanent Deformation*

UFCG - Universidade Federal da Campina Grande

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

V - Velocidade média do escoamento do fluido

VAM: vazios do agregado mineral

VCB - vazios com betume

Vv – Volume de vazios



## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 – INTRODUÇÃO</b>	17
1.1 Considerações iniciais	17
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 Estrutura da dissertação	20
<b>Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	21
2.1 Misturas asfálticas porosas	21
2.2 Uso de aditivos em misturas asfálticas	29
2.2.1 Uso de Resíduos de polietileno tereftalato (PET) como aditivos em misturas asfálticas	34
2.3 Segurança viária	36
2.4 Permeabilidade em misturas asfálticas	45
2.5 Deformação permanente em misturas asfálticas	51
2.6 Fadiga em misturas asfálticas	54
<b>Capítulo 3 – MÉTODO DE TRABALHO</b>	58
3.1 Materiais utilizados	58
3.2 Caracterização dos materiais	58
3.2.1 Análise granulométrica	58
3.2.2 Abrasão <i>Los Angeles</i>	58
3.2.3 Absorção e densidade do agregado graúdo	59
3.2.4 Massa específica real	61
3.2.5 Viscosidade rotacional	62
3.3 Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico	62
3.3.1 Definição das faixas granulométricas	63
3.3.2 Moldagem dos corpos de prova	64
3.3.3 Determinação do Volume de vazios ( $V_v$ )	66
3.3.4 Resistência à Tração indireta (RT)	67
3.3.5 Ensaio Cântabro	69
3.4 Ensaio realizados a partir da determinação do teor de projeto de ligante asfáltico	70

3.4.1 Escorrimento de ligante asfáltico em misturas asfálticas não compactadas .....	70
3.4.2 Dano por umidade induzida .....	71
3.4.3 Módulo de Resiliência (MR) .....	73
3.4.4 Ensaio de deformação permanente – <i>Creep</i> Dinâmico – Determinação do <i>flow number</i> .....	75
3.4.5 Vida de Fadiga .....	76
3.4.6 Permeabilidade .....	76
Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	80
4.1 Caracterização dos materiais .....	80
4.1.1 Análise granulométrica .....	80
4.1.2 Absorção e densidade e Abrasão <i>Los Angeles</i> do agregado graúdo .....	80
4.1.3 Massa específica real .....	81
4.1.4 Viscosidade rotacional .....	81
4.2 Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico .....	82
4.2.1 Definição das faixas granulométricas .....	82
4.2.2 Determinação do Volume de vazios (Vv) .....	86
4.2.3 Resistência à Tração indireta (RT) .....	89
4.2.4 Ensaio Cântabro .....	90
4.3 Ensaio realizado no teor de projeto de ligante asfáltico .....	93
4.3.1 Escorrimento de ligante asfáltico em misturas asfálticas não compactadas .....	93
4.3.2 Dano por umidade induzida .....	94
4.3.3 Módulo de Resiliência (MR) .....	98
4.3.4 Ensaio de deformação permanente – <i>Creep</i> Dinâmico – Determinação do <i>flow number</i> .....	102
4.3.5 Vida de fadiga .....	105
4.3.6 Permeabilidade .....	108
Capítulo 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	115

## **Capítulo 1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1 Considerações iniciais**

O setor de transporte é um grande aliado da economia de uma nação na medida que é responsável diretamente pelos custos dos produtos. Nesse sentido, entende-se que o nível de competitividade de uma nação é dado também pelas condições da infraestrutura de transportes.

No caso brasileiro, o transporte rodoviário, historicamente, tem sido majoritário no transporte de pessoas e mercadorias. Isso implica dizer que através das rodovias brasileiras ocorre a movimentação de aproximadamente 60% da carga e 90% dos passageiros (MEDINA e MOTTA, 2015). Contudo, dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) revelam uma infraestrutura rodoviária com apenas 12,2% das estradas de rodagem pavimentadas, valor consideravelmente inferior ao encontrado em países desenvolvidos, os quais variam de 50 a 80%, conforme apontam Medina e Motta (2015).

De acordo com a pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) no ano de 2015, 57,3% das rodovias pavimentadas avaliadas apresentam algum tipo de deficiência, seja no pavimento, na sinalização ou na geometria da via, onde 6,3% encontra-se em estado péssimo, 16,1% é considerado ruim e 34,9% é considerado regular. Nos quesitos segurança e desempenho, 42,7% das rodovias pesquisadas possuem condições adequadas, sendo classificadas como em ótimo ou bom com relação ao seu estado geral.

Em relação a condição da superfície do pavimento, a pesquisa da CNT mostrou que o desgaste é a característica predominante, tendo sido encontrado em 39,8% dos trechos avaliados. Trincas ou remendos foram identificados em 19,9% dos trechos e afundamentos, ondulações ou buracos em 4,4%. Em 35,4% dos trechos o pavimento encontra-se em boas condições e em 0,5% este encontra-se totalmente destruído (CNT, 2015).

A citada pesquisa ainda identificou melhorias em alguns trechos, resultado da conservação e da melhoria do pavimento realizadas em algumas rodovias. Porém, a infraestrutura rodoviária brasileira ainda está aquém do necessário para garantir reduções

nos custos de transporte e, dessa maneira, contribuir para elevar o nível de competitividade do Brasil.

Considerando a importância do modal rodoviário para o desenvolvimento de países como o Brasil, onde este é responsável em grande parte pelo transporte de pessoas e mercadorias, é importante à concepção de pavimentos que de fato conservem a sua vida útil de projeto e que proporcionem aos seus usuários conforto e segurança, além de serem economicamente e ambientalmente viáveis.

O revestimento destas estruturas, por ser a camada mais nobre, necessita por vezes ser adaptado às condições de clima e tráfego específicas. Os chamados revestimentos porosos, pela sua alta capacidade de drenagem, são preferencialmente adotados em situações onde há uma maior exigência quanto a segurança com relação ao tráfego em pista molhada, especialmente em regiões sujeitas a chuvas intensas, cujas características de curta duração e grandes volumes precipitados contribuem para que haja um acúmulo de água na superfície do revestimento asfáltico. Também são muito utilizados em pavimentos aeroportuários.

A água acumulada na superfície do revestimento asfáltico oferece grande risco a segurança dos que trafegam sob chuvas intensas, pois, segundo Mayora e Piña (2009), este acúmulo permite a formação de uma lâmina d'água, que atuando como um lubrificante, provoca a redução do atrito na interface pneu-pavimento e, conseqüentemente, a redução da resistência à derrapagem, sendo esta uma das causas de acidentes em rodovias.

Asi (2007) destaca que, em todo o mundo, anualmente, mais de um milhão de pessoas são mortas em acidentes de trânsito. Embora muitas causas de acidentes estejam relacionadas a erros dos motoristas, o autor aponta que a redução da resistência à derrapagem das rodovias também contribui para este fato comprovado pelo aumento do número de acidentes em períodos chuvosos.

Por outro lado, a adoção de algumas soluções específicas pode gerar custos adicionais, o que pode onerar obras, inclusive inviabilizando-as em situações onde os recursos são limitados. Em se tratando de revestimentos porosos, que, de acordo com Buddhavarapu, Smit e Prozzi (2015), apresentam um custo por tonelada de 20 a 50% superior em relação a misturas asfálticas densas convencionais, cita-se o fato de neste tipo de revestimento ser recomendado a utilização de ligantes asfálticos modificado por

polímero, que, embora apresentem um bom desempenho quando comparado aos ligantes asfálticos convencionais, por apresentar-se com um custo mais elevado, seu uso pode ser desencorajado. Além disso, destaca-se também o fato dos revestimentos porosos não exercerem função estrutural.

Nesse sentido, a presente pesquisa propõe o uso de resíduos de politereftalato de etileno (PET) como um aditivo alternativo para misturas asfálticas porosas – Camada Porosa de Atrito (CPA) – visando uma alternativa mais econômica de pavimentação, tendo em vista a grande produção em todo o mundo, que no final da década de 90 atingiu algo em torno de  $2,4 \times 10^{10}$  Kg (SHIMAMOTO *et al.*, 2011), bem como o apelo ambiental atrelado a este termoplástico, uma vez que ambientalistas o consideram bastante nocivo ao meio ambiente por obstruir galerias, rios e córregos, prejudicando o sistema de drenagem das águas das chuvas e corroborando para o agravamento das consequências de enchentes (DIAS e TEODÓSIO, 2006).

Essa proposta busca, portanto, contribuir para a melhoria da infraestrutura rodoviária brasileira, tendo como foco principal a oferta de segurança aos usuários, pela sua importância, conforme discutido anteriormente. Ao mesmo tempo, procura reduzir potenciais fontes de impacto ambiental, dando-lhes mais uma destinação, evitando o descarte inadequado e saturação de aterros sanitários.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar o desempenho de misturas asfálticas porosas com asfalto convencional e aditivadas com resíduos de PET, via processo seco.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos compreenderam:

- Avaliação do desempenho do PET como aditivos em misturas asfálticas porosas;
- Avaliação das propriedades de misturas asfálticas porosas com ligante asfáltico convencional e modificado por polímero;
- Análise comparativa do desempenho das misturas estudadas.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos, a saber:

- Capítulo 1 – Introdução: são apresentados as considerações iniciais e os objetivos da pesquisa.
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: traz da literatura as discussões pertinentes acerca do tema abordado na dissertação.
- Capítulo 3 – Método de trabalho: neste capítulo são descritos os materiais e os métodos utilizados para atingir os objetivos da pesquisa.
- Capítulo 4 – Resultados e discussões: nesta seção, os resultados obtidos após realização dos ensaios laboratoriais são apresentados e discutidos.
- Capítulo 5 – Conclusões e sugestões: é apresentado os pareceres conclusivos da dissertação e deixado sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

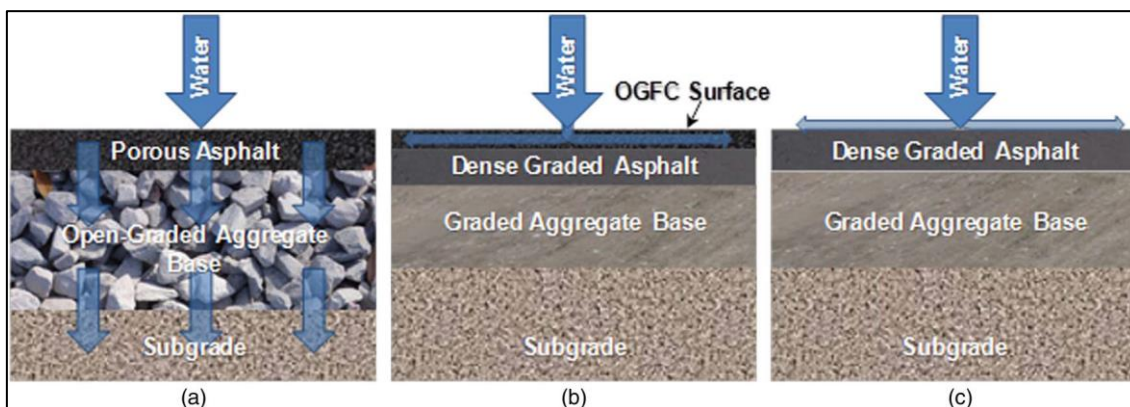
### 2.1 Misturas asfálticas porosas

Surgidas a partir da necessidade de se obter um revestimento asfáltico que proporcionasse um maior atrito entre o pneu e o pavimento, misturas asfálticas porosas – ou abertas - consistem na mistura de ligante asfáltico, aditivos e uma alta proporção de agregado graúdo, com limitada quantidade de finos, apresentando uma elevada quantidade de vazios com ar permeáveis (15 a 20%), tornando possível a percolação de água através delas (PINHEIRO, 2004; MANSOUR e PUTMAN, 2013). Lyons e Putman (2013) afirmam ainda que tais misturas podem apresentar pouca ou nenhuma quantidade de agregados finos.

A especificação brasileira DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999) estabelece cinco faixas granulométricas e teor de ligante asfáltico variando de 4 a 6% para Camada Porosa de Atrito (CPA). Os agregados graúdos devem apresentar adequada cubicidade (índice de forma  $\geq 0,5$ ) e serem resistentes ao desgaste, com valor de abrasão *Los Angeles* igual ou inferior a 30%, podendo ser utilizado agregado com valores maiores, desde que comprovado seu adequado desempenho em utilização anterior. O ligante utilizado é o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) modificado por polímero do tipo SBS. A mistura deve apresentar Volume de vazios (Vv) de 18 a 25%; desgaste máximo, obtido no ensaio cântabro, de 25% e resistência à tração por compressão diametral mínima de 0,55 MPa (DNIT, 1999).

O elevado teor de vazios das misturas asfálticas porosas permite que a água precipitada sobre o revestimento dos pavimentos seja drenada de forma mais rápida que em revestimentos de misturas convencionais densas (PUTMAN e KLINE, 2012). A Figura 1 mostra o esquema de como se dá a percolação de água através de um pavimento asfáltico poroso, pavimento asfáltico com revestimento poroso e pavimento asfáltico convencional.

Figura 1 - Percolação de água em: a) pavimento asfáltico poroso, b) pavimento asfáltico com revestimento poroso e c) pavimento asfáltico convencional



Fonte: Putman e Kline (2012)

Nos pavimentos que apresentam revestimentos impermeáveis, a água precipitada sobre a superfície é canalizada para a sarjeta através da declividade transversal da via. Nos pavimentos revestidos por misturas asfálticas porosas, a água atravessa esta camada até encontrar outra camada impermeável, sendo então drenada lateralmente para a sarjeta. No caso de um pavimento asfáltico poroso, a água precipitada atravessa todas as camadas do pavimento até o subleito (PUTMAN e KLINE, 2012).

Klenzendorf *et al.* (2011) alertam que um pavimento integralmente poroso pode apresentar problemas relacionados à integridade estrutural, tendo em vista a presença de porosidade ao longo de toda a estrutura. Deste modo, a opção de pavimento com revestimento poroso sobre uma camada impermeável surge como opção mais vantajosa, por permitir que o pavimento apresente capacidade drenante sem, no entanto, comprometer sua capacidade estrutural.

Não apresentando função estrutural, as misturas asfálticas porosas geralmente são executadas complementarmente na forma de camadas delgadas sobre revestimentos existentes de concreto asfáltico ou de cimento Portland, sendo estes os responsáveis pela função estrutural (PINHEIRO, 2004). A Figura 2 mostra um corpo de prova cilíndrico extraído de uma pista experimental com revestimento poroso executado sobre um revestimento denso, ambos de concreto de cimento Portland.



Figura 2 - Corpo de prova cilíndrico extraído de pista experimental: revestimento poroso executado sobre um revestimento denso, ambos de concreto de cimento Portland



Fonte: Tian *et al.* (2014)

O aumento da permeabilidade, característico das misturas asfálticas porosas, reduz a espessura da lâmina de água sobre a superfície do pavimento. Essa redução pode representar ganhos de segurança ao diminuir o *spray*, proveniente do borrfio de água pelos pneus dos veículos, a reflexão da luz dos faróis noturnos, melhorando as condições de visibilidade, além de minimizar as chances de ocorrer o fenômeno de aquaplanagem, que ocorre quando o contato pneu-pavimento é nulo, ocasionando a derrapagem do veículo em movimento ou ao frear (OLIVEIRA, 2003; PUTMAN e KLINE, 2012). A Figura 3 mostra a melhoria das condições de visibilidade ocasionada pelo uso de revestimento poroso ao comparar o mesmo veículo trafegando em trecho com esse tipo de revestimento e em trecho com apenas revestimento denso convencional.

Figura 3 – Melhoria das condições de visibilidade ocasionada pelo uso de revestimento poroso: à direita veículo trafegando em trecho com revestimento denso convencional e à esquerda o mesmo veículo trafegando em trecho com revestimento poroso



Fonte: Barret (2008)

Além das melhorias providas pelos revestimentos porosos no tocante ao aumento da segurança ao trafegar em pista molhada, pode-se verificar também vantagens do uso desses revestimentos em pavimentos na condição seca, como o aumento do atrito e da resistência à derrapagem, proporcionando um aumento da aderência pneu-pavimento; e a redução do ruído gerado na interação pneu-pavimento (SURESHA, GEORGE e SHANKAR, 2010; PUTMAN e KLINE, 2012; MANSOUR e PUTMAN 2013).

Segundo Rasmussen *et al.* (2007), a porosidade pode absorver parte do ruído gerado na interação pneu-pavimento, especialmente para índices superiores a 20%. Bernhard e Wayson (2005) afirmam que o princípio de absorção sonora dos revestimentos porosos é similar aos de barreiras acústicas instaladas em edifícios. Além disso, a porosidade reduz os mecanismos de bombeamento de ar, que é um dos responsáveis pela geração de ruído na interação pneu-pavimento (BERNHARD e WAYSON 2005; RASMUSSEN *et al.*, 2007).

Knabben (2012), em estudo desenvolvido sobre o ruído gerado na interação pneu-pavimento e a absorção sonora em diferentes revestimentos de pavimentos, verificou, mediante resultados de ensaios realizados em campo, que a CPA apresentou o menor nível de pressão sonora gerado dentre os revestimentos estudados. No mesmo estudo, resultados de ensaios de absorção sonora, realizados em laboratório, mostraram que todas as misturas porosas apresentaram boa capacidade de absorção acústica.

Paje *et al.* (2008) atribuem, principalmente, à porosidade a diferença observada no comportamento quanto a absorção sonora de misturas asfálticas densas (Volume de

vazios de 2 a 6%) e semidensas (Volume de vazios de 6 a 12%). Misturas mais porosas (volume de vazios de 20 a 30%) apresentam maior capacidade de absorção sonora, constituindo, portanto, uma solução de mitigação do ruído gerado na interação pneu-pavimento.

A porosidade, porém, pode gerar efeitos negativos nas misturas asfálticas, pois revestimentos que apresentam alto Vv são mais suscetíveis ao desgaste, que é a perda progressiva de agregados do revestimento asfáltico. Esse mecanismo se dá devido à perda de adesão entre o ligante asfáltico e o agregado ou devido à fraca coesão do mástique asfáltico que envolve o agregado (RASMUSSEN *et al.*, 2007; SURESHA, GEORGE e SHANKAR, 2010; LYONS e PUTMAN, 2013).

No caso das misturas porosas, o desgaste é mais impactante porque a porosidade permite uma oxidação mais rápida do ligante asfáltico, acentuando o processo de envelhecimento, pois o oxigênio tem acesso a uma maior área da mistura. A porosidade, ainda, expõe a mistura a uma maior exposição à umidade (RASMUSSEN *et al.*, 2007; SURESHA, GEORGE e SHANKAR, 2010; LYONS e PUTMAN, 2013).

Outra patologia atrelada à porosidade das misturas é o escorrimento do ligante asfáltico. Para Huber (2000 *apud* LYONS e PUTMAN, 2013), o escorrimento do ligante em misturas asfálticas é atribuído à falta de finos necessários para promover a permeabilidade e ao excesso do teor de ligante asfáltico adicionada para aumentar a durabilidade das misturas. Esse fenômeno, usualmente, ocorre em temperaturas de construção e produção, mas, também, pode ocorrer em altas temperaturas de serviço (LYONS e PUTMAN, 2013).

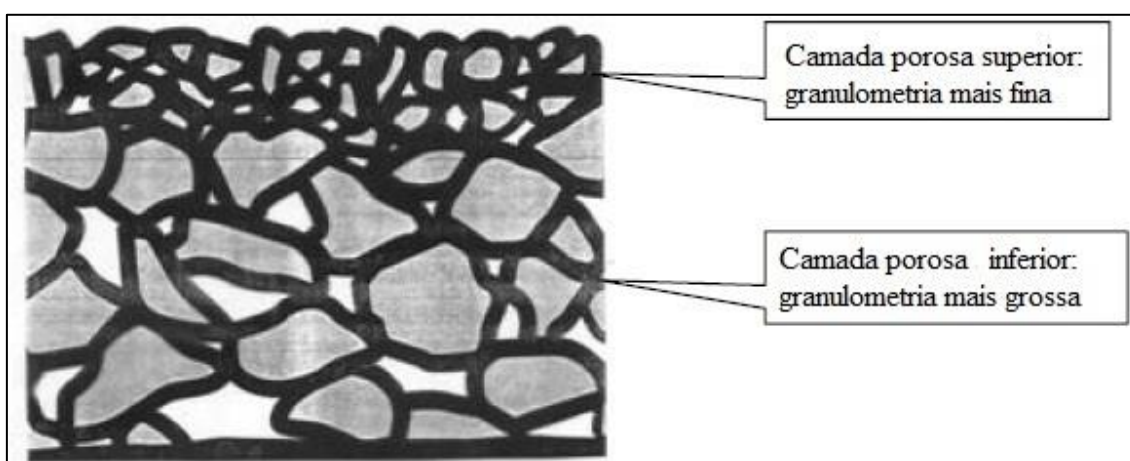
Lyons e Putman (2013) explicam que a alta temperatura do pavimento provoca o amolecimento do ligante asfáltico, que sob influência da força gravitacional, flui verticalmente através dos poros da mistura, até atingir uma região mais fria do pavimento, cerca de 12,5mm do topo do revestimento. Esse fluxo gera um desequilíbrio de ligante na massa asfáltica, resultando em duas regiões distintas: (i) com demasiada quantidade de ligante asfáltico, tornando a mistura asfáltica impermeável, reduzindo seu potencial de permeabilidade; (ii) com quantidade de ligante reduzida e, conseqüentemente, mais suscetível ao desgaste (HANZAH, HASAN e VEN, 2012; LYONS e PUTMAN, 2013).

Hanzah, Hasan e Ven (2012) verificaram a redução de permeabilidade em misturas asfálticas porosas, através do aumento do tempo de percolação e da redução do coeficiente de permeabilidade, em função do tempo e da temperatura. Foi constatado, pelos autores, que as duas variáveis – tempo e temperatura – corroboram para a redução da permeabilidade, que ocorre de forma mais acentuada no início (primeira semana – as medidas de permeabilidade foram realizadas regularmente por um período de até 60 dias) e nas temperaturas mais elevadas (30 e 35°C – as temperaturas estudadas foram: 15, 20, 30 e 35°C).

Martin, Putman e Neptune (2014) apontam como uma outra causa da redução de permeabilidade em misturas porosas o processo de colmatação, desenvolvido ao longo do tempo de utilização da rodovia, quando sedimentos, oriundos das águas pluviais, do vento e dos veículos, são depositados sobre o revestimento do pavimento. De acordo com esses autores, ao atingir o nível máximo de colmatação dos poros, a mistura porosa passa a ser totalmente impermeável, portando-se, do ponto de vista hidrológico, como uma mistura densa convencional, perdendo a função para qual foi projetada.

De acordo com Hamzah e Hardiman (2005) o efeito da colmatação pode ser minimizado pela adoção de um revestimento poroso composto por duas camadas de granulometrias distintas, conhecido como revestimento poroso duplo. A Figura 4 mostra um esquema desse tipo de revestimento.

Figura 4 - Revestimento poroso composto por duas camadas de granulometrias distintas



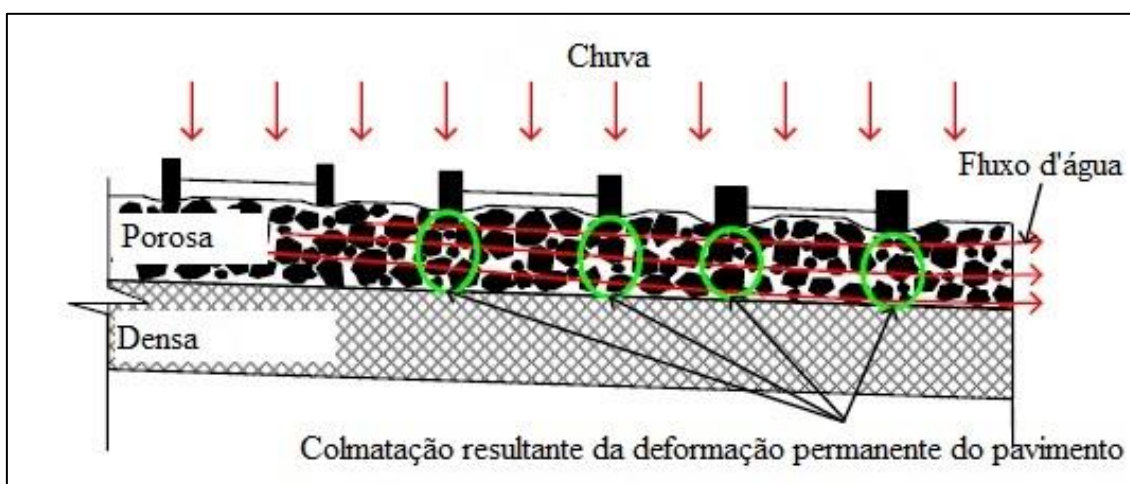
Fonte: Adaptado de Van Bochove (1996) *apud* Hamzah e Hardiman (2005)

Na parte superior do revestimento poroso duplo tem-se uma camada porosa de granulometria mais fina que, sobreposta a outra camada mais espessa e de granulometria mais grossa, atua como uma espécie de filtro, evitando que os sedimentos depositados

sobre o revestimento atinjam a camada imediatamente inferior. Esse processo de filtragem faz com que apenas a camada do topo sofra colmatação, sendo facilmente removida pelas técnicas de limpeza em campo, garantindo as características requeridas para um revestimento poroso (HAMZAH e HARDIMAN, 2005).

Ainda em relação a redução da permeabilidade em misturas porosas, Chen *et al.* (2015) chamam a atenção para o processo de colmatação resultante da deformação permanente do pavimento. A Figura 5 mostra as regiões do pavimento onde ocorre a colmatação devido as deformações em trilha de roda e que corroboram para a redução da permeabilidade.

Figura 5 - Sentido do fluxo d'água e regiões do pavimento onde há colmatação resultante da deformação permanente



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2015)

Umiliaco e Benedetto (2013) destacam o antagonismo peculiar de misturas porosas: apresentarem simultaneamente propriedades mecânicas e hidráulicas adequadas. Estes autores argumentam que, se por um lado, uma boa permeabilidade está relacionada a um alto índice de vazios e uma granulometria aberta, por outro, as propriedades mecânicas das misturas estão atreladas à coesão e ao atrito entre os agregados e, conseqüentemente, ao baixo índice de vazios e granulometria contínua.

Para Alvarez, Martin e Estakhri (2008; 2010) e Liao *et al.* (2014), a dosagem de uma mistura asfáltica porosa deve estar ancorada no princípio, denominado por esses autores, de densidade de equilíbrio, segundo o qual, a mistura deve apresentar uma densidade tal que apresente condições de desenvolver suas características de funcionalidade (aumento da permeabilidade, redução do ruído gerado na interação pneu-

pavimento e aumento da aderência dos pneus dos veículos ao revestimento) sem, no entanto, comprometer sua durabilidade.

De acordo Alvarez, Martin e Estakhri (2008) os métodos para determinação do teor de projeto de ligante asfáltico de misturas porosas têm como foco suas propriedades volumétricas, especialmente a densidade. Deste modo, os autores chamam atenção para a necessidade de controle das densidades em campo, com o objetivo de garantir uma boadequada compactação, tendo em vista que uma compactação executada de maneira inadequada é corresponsável pelo processo de desgaste de misturas asfálticas.

Lu, Luo e Harvey (2011) verificaram diferenças de comportamento de misturas asfálticas porosas a partir da utilização de diferentes métodos de compactação. Segundo esses autores, essas diferenças variam de acordo com a dimensão do agregado. Assim, os autores recomendam que o método de compactação para misturas asfálticas porosas seja selecionado em função da dimensão máxima característica do agregado.

Além da permeabilidade, a granulometria dos agregados também exerce influência na forma como as misturas asfálticas porosas se comportam perante as solicitações das cargas de tráfego. Devido a sua elevada porosidade, essas misturas são mais suscetíveis à deformação plástica se comparadas as misturas asfálticas densas (MANSOUR e PUTMAN, 2013). Porém, conforme concluíram esses autores, as deformações plásticas em misturas porosas podem estar mais relacionadas às propriedades do ligante e dos agregados do que propriamente a granulometria de projeto utilizada.

Suresha, George e Shankar (2010) encontraram resultados inesperados ao relacionar resultados de ensaios de deformação permanente, através de simuladores de tráfego em placas moldadas em laboratório ensaiadas a uma temperatura de 50°C, com a granulometria das misturas avaliadas pelos mesmos. Uma dada mistura, que apresentou granulometria satisfatória quanto aos pontos de contato entre agregados, o que sugere um desempenho satisfatório frente à deformação permanente determinado pelo esqueleto mineral, conforme é consensual na literatura, apresentou baixa resistência à deformação permanente. Enquanto outra mistura apresentou bom comportamento frente à deformação permanente, apesar de não ter apresentado esqueleto mineral apropriado conforme apontado pelo critério que avalia os pontos de contato entre agregados. Esses resultados

inesperados podem confirmar a conclusão de Mansour e Putman (2013), no tocante a relação entre granulometria e resistência a deformação permanente.

Mallick *et al.* e Suresa *et al.* (2000; 2010 *apud* Mansour e Putman, 2013) ponderam que a granulometria de uma mistura obtida a partir de pontos de contato entre agregados pode apresentar resultados inconsistentes de resistência à deformação permanente para misturas asfálticas porosas, pois misturas que atendem a esse critério são mais suscetíveis a deformações plásticas e vice-versa, conforme verificado por Suresha, George e Shankar (2010).

## **2.2 Uso de aditivos em misturas asfálticas**

Uma forma de melhorar o desempenho das misturas asfálticas é através da incorporação de aditivos, dentre os quais os polímeros e as fibras são os mais comumente utilizados para este fim. A incorporação de aditivos em misturas asfálticas pode ser feita através de duas maneiras, conhecidas na literatura por processo úmido e processo seco. Basicamente, no processo úmido os aditivos são misturados com o ligante asfáltico, em temperatura e tempo especificados, antes de serem misturados com os agregados; enquanto que no processo seco os aditivos são adicionados diretamente na mistura (MOGHADDAM e KARIM, 2012; LYONS e PUTMAN, 2013).

Segundo Polacco *et al.* (2004) e Sangita *et al.* (2011), os benefícios proporcionados pela incorporação de aditivos estão atrelados a natureza química e a quantidade do agente modificador utilizado. De um modo geral, é verificado uma melhora em termos de deformação permanente, suscetibilidade térmica e trincas por fadiga e térmicas, o que resulta em misturas asfálticas mais duráveis e rodovias com maior vida de serviço, justificando a aplicação destes materiais.

Ambas as maneiras (úmido e seco) de incorporação de aditivos em misturas asfálticas apresentam vantagens. No caso da adição de polímeros ocorrerem diretamente no ligante asfáltico, há geralmente um aumento da rigidez e uma melhora em termos de suscetibilidade térmica do ligante, tornando as misturas asfálticas mais resistentes a deformações permanentes em climas quentes. Também é possível obter vantagens através da adição de polímeros diretamente nas misturas asfálticas, os quais atuam formando uma película em torno do agregado, aumentando a sua rugosidade, resultando em misturas asfálticas de boa qualidade (AWWAD e SHBEEB, 2007).

Os polímeros utilizados como modificadores de ligante asfáltico são agrupados da seguinte forma: elastômeros termoplásticos, plastômeros e polímeros reativos. Os primeiros são responsáveis por conferir propriedades elásticas ao ligante modificado, contribuindo para a resistência a deformação permanente devido a alta recuperação elástica do ligante asfáltico resultante. Os plastômeros modificam o ligante formando uma estrutura tridimensional resistente, modificando sua consistência, deixando-a mais rígida e, conseqüentemente, menos deformável sob aplicação de cargas (AIREY, 2002; POLACCO *et al.*, 2004).

Glover (2007) cita os polímeros utilizados em misturas asfálticas e suas respectivas vantagens e desvantagens:

- Estireno butadieno (radial e linear SBS) – boa resistência à fadiga, alta taxa de fluência, porém suscetível a oxidação;
- Polietileno (PE) – expansão térmica elevada, porém apresenta baixa rigidez;
- Polibutadieno (PB) - excelente resistência ao desgaste, resistência ao impacto, mas baixa resistência;
- Etileno acetato de vinila (EVA) - estabilidade à estocagem, viscoso em altas temperaturas, mas pode apresentar baixa resistência à fluência. Este polímero é recomendado para zonas de baixa temperatura;
- Etileno acrilato de metila (EMA);
- Polipropileno (PP) - boa resistência química e à fadiga, porém oxidável;
- Epóxis e uretanos, borracha de pneu - podem ser classificados como polímeros elastômeros, com elevado grau de recuperação elástica (SBS, SBR, borracha moída); e plastômeros, com elevada rigidez e resistência à deformação (EVA, EMA, Uretanos e PP).

O polímero mais utilizado como modificador de ligante asfáltico para aplicação em pavimentação é o estireno-butadieno-estireno (SBS). Este polímero pertence ao grupo dos elastômeros termoplásticos, apresenta estrutura molecular linear e radial, onde os blocos de estireno se unem para formar uma rede fisicamente reticulada. Integrantes do grupo dos plastômeros, tem-se, principalmente o polietileno (PE), o etileno-acetato de vinila (EVA) e o etileno-butil de acrilato (EBA). Os copolímeros etileno são preferíveis ao PE em aplicações de pavimentação, devido ao fato deste último apresentar baixa compatibilidade com o ligante asfáltico. Como exemplo de polímeros reativos tem-se



elastômeros termoplásticos obtidos a partir de anidrido maléico e copolímeros contendo resina epóxi (AIREY, 2002; POLACCO *et al.*, 2004).

O uso de aditivos comerciais em misturas asfálticas, porém, pode representar aumento nos custos de obras de pavimentação, o que fatalmente pode limitar a ampliação da malha rodoviária. Diante deste dilema, o uso de aditivos obtidos a partir de resíduos - de vidro, de escória de aciaria, pneus e plásticos, especialmente resíduos de borracha de pneus e polímeros reciclados - em substituição aos aditivos comerciais é uma alternativa, representando, inclusive, benefícios ambientais, por dar um destino nobre a possíveis poluentes (MOGHADDAM, KARIM e SYAMMAUN, 2012; MOGHADDAM e KARIM, 2012).

Lyons e Putman (2013) consideram aditivos estabilizantes a partir de resíduos de borracha como sendo o mais eficiente inibidor de escorrimento do ligante asfáltico em pavimentos com altas temperaturas de serviço (60°C). Jun e Chaoen (2009), porém, indicam que a aplicação de misturas asfálticas porosas com asfalto borracha seja restrita às vias sujeitas a tráfego leve, por essas misturas serem potencialmente mais suscetíveis a desagregação.

Vasudevan *et al.* (2012) propuseram uma nova matéria prima para utilização em pavimentos flexíveis obtida a partir de polímeros e agregados britados. Para tal, resíduos de plásticos utilizados em embalagens, formados principalmente por polietileno, poliestireno e polipropileno, foram utilizados para revestir os agregados. Ao material resultante foi adicionado ligante asfáltico e analisado suas propriedades enquanto mistura asfáltica, além da análise feita do agregado modificado. Neste caso, foi verificado uma melhora nas propriedades do agregado revestido com plástico quanto a sanidade, resistência à abrasão e adesividade ao ligante asfáltico, que, segundo os autores, se dá devido ao recobrimento e preenchimento dos poros do agregado pelo plástico derretido, evitando exposição deste à umidade e absorção de água. Com relação a análise das propriedades da mistura asfáltica, foi observado um aumento na estabilidade Marshall diretamente proporcional à quantidade de resíduo de plástico utilizado e valores de fluência e vazios preenchidos com betume dentro dos valores recomendados.

Vasudevan *et al.* (2012) ainda atribuem o bom desempenho de misturas asfálticas aditivadas com polímero a estrutura tridimensional resultante das reações químicas entre as moléculas destes materiais e os constituintes do asfalto. Polímeros são hidrocarbonetos

de cadeia longa, já o asfalto é uma mistura complexa de asfaltenos e maltenos, também, com hidrocarbonetos de cadeia longa; que ao se misturarem, parte do asfalto se difunde através do plástico, promovendo uma forte ligação com o agregado, o que dificulta a remoção do ligante asfáltico. Os autores explicam que o plástico, além de preencher os poros dos agregados e ligar-se conjuntamente com este, forma uma forte ligação orgânica com o asfalto.

Sangita *et al.* (2011) também verificaram uma melhora das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com resíduos de polímero. No estudo destes autores, resíduos de borracha nitrílica e polietileno, numa proporção de 1:4 e tamanho máximo de 2,00mm, foram utilizados como agentes modificadores de misturas asfálticas, através de processo seco nas quantidades de 6, 8, 12 e 15%. Resultados de estabilidade Marshall, fluência e adesividade apontaram 8% como a quantidade ótima de agente modificador. As misturas moldadas nos teores ótimos de ligante asfáltico (5,4%) e resíduos de polímero (8%) apresentaram, ainda, desempenho superior se comparadas às misturas convencionais com relação ao dano por umidade induzida e a resistência à deformação permanente, além de terem apresentado tendência de maior rigidez, constatado pelo aumento do módulo de resiliência em todas as temperaturas ensaiadas.

Attaelmanan, Feng e Al (2011), modificaram um CAP, cuja penetração foi  $81 \times 10^{-1}$  mm, através de adição de polietileno de alta densidade (HDPE) em forma de pélete nas proporções de 1, 3, 5 e 7%. O HDPE propiciou uma redução na penetração e um aumento no ponto de amolecimento do CAP, sugerindo um aumento da resistência a deformação em temperaturas mais elevadas. Ductilidade, suscetibilidade térmica e durabilidade também sofreram alterações positivas devido à adição de HDPE, o que demonstra bom desempenho do CAP modificado em relação às intempéries climáticas.

Al-Hadidy e Yi-qiu (2009a) e Attaelmanan, Feng e Al (2011) melhoraram as propriedades reológicas do CAP através da adição de polímero. Utilizando polietileno de baixa densidade (LDPE) nas proporções de 2, 4, 6, e 8%, ao invés de HDPE, aqueles autores obtiveram um aumento no ponto de amolecimento de 26% com adição de 6% de LDPE ao CAP, enquanto Attaelmanan, Feng e Al (2011) obtiveram um aumento de 69% no ponto de amolecimento com 5% de HDPE. Outro aspecto positivo verificado por Al-Hadidy e Yi-qiu (2009a) para os CAP modificados foi a redução do escorrimento, assim como Al-Hadidy e Yi-qiu (2009b), que adicionaram 1, 3, 5 e 7% de pó de polipropileno, obtido a partir de degradação térmica (pirólise) e moagem mecânica, ao CAP.

Após sofrer degradação térmica, o LDPE apresenta elevada quantidade de grupos reativos que por sua vez reagem quimicamente com as moléculas de asfalto elevando a consistência do mesmo, o que pode justificar o aumento do ponto de amolecimento do CAP modificado (AL-HADIDY e YI-QIU, 2009a; AL-HADIDY e YI-QIU, 2009b).

De um modo geral, os trabalhos de Al-Hadidy e Yi-qiu (2009a), Al-Hadidy e Yi-qiu (2009b), Attaelmanan, Feng e Al (2011), Sangita *et al.* (2011) e Vasudevan *et al.* (2012) mostram um aumento na estabilidade Marshall e uma redução na fluência, o que resulta num aumento do Quociente Marshall (QM), relação entre estes parâmetros, indicando uma boa resistência a deformação permanente como resultado da adição de polímero, independentemente do tipo ou modo de adição.

Sangita *et al.* (2011) verificaram o melhor comportamento de misturas asfálticas modificadas com polímero quando comparadas a misturas convencionas em relação a deformação permanente através de resultados do ensaio *Creep* dinâmico e do uso de simulador de tráfego em laboratório, onde foi medido e analisado o afundamento em trilha de roda a cada 20.000 ciclos em placas com dimensões 300×150×50mm submetidas a uma carga de roda de 31kg, movendo-se a 24 passadas por minuto a 50°C.

Vasudevan *et al.* (2012) determinaram deflexões em campo com uso da viga Benkelman em seis rodovias diferentes construídas entre os anos de 2002 e 2006, das quais cinco apresentaram, em sua estrutura, revestimento asfáltico com plástico. Nestes casos, os valores de deflexão obtidos foram considerados dentro dos valores aceitáveis, diferentemente, do pavimento com revestimento asfáltico convencional. Os autores relacionam este bom desempenho em campo aos resultados de estabilidade e fluência Marshall obtidos em laboratório, que estão relacionados com as propriedades viscoelástica das misturas asfálticas, e explicam que o plástico utilizado para revestir os agregados reage com o ligante, promovendo uma forte ligação e modificando a estrutura do ligante, o que ajuda a manter as propriedades viscoelástica das misturas asfálticas.

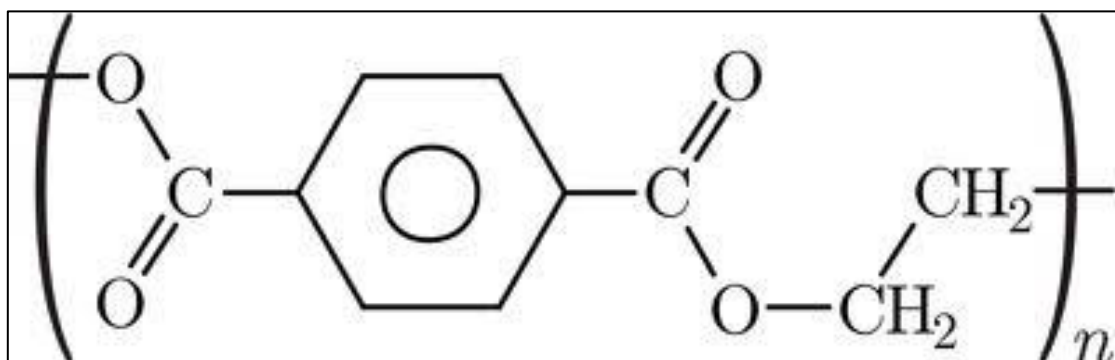
Al-Hadidy e Yi-qiu (2009a) e Attaelmanan, Feng e Ai (2011) observaram um aumento no módulo de rigidez e de ruptura de misturas asfálticas com uso de polietileno, o que, segundo eles, está relacionado a maior viscosidade do ligante modificado com este polímero, através de ensaios de flexão realizados em vigas com dimensões de 300×50×48mm a temperatura de 0 e -10°C, o que pode implicar numa redução do surgimento de trincas no pavimento em baixas temperaturas.

Polacco *et al.* (2004) recomendam a utilização de polímeros em misturas asfálticas nas quantidades de 4 a 6%, em relação ao peso do ligante asfáltico, sob o risco de perda de qualidade e inviabilidade econômica ao se utilizar quantidades superiores. Al-Hadidy e Yi-qiu (2009a), por exemplo, observaram redução na estabilidade e aumento na fluência Marshall para misturas com 8% de LDPE, em relação as misturas com 2, 4 e 6% deste mesmo material. Sangita *et al.* (2011), por outro lado, obtiveram o valor de QM máximo com 8% de polímero, o que, de todo modo, demonstra que quantidades mais elevadas de polímero adicionado em misturas asfálticas podem prejudicar o bom desempenho desses materiais, conforme defende Polacco *et al.* (2004).

### 2.2.1 Uso de Resíduos de polietileno tereftalato (PET) como aditivos em misturas asfálticas

Polietileno tereftalato (PET) é uma resina de polímero termoplástico pertencente à família do poliéster. O PET é utilizado na fabricação de garrafas de bebidas, fibras sintéticas, pratos e talheres descartáveis e alguns recipientes de plástico (AHMADINIA *et al.*, 2011). A Figura 6 mostra a estrutura química do PET.

Figura 6 - Estrutura química do PET



Fonte: Bing, Thomas e Lawrence (2006) *apud* Mohammed e Hussein (2014)

Moghaddam e Karim (2012) destacam o uso de resíduos de plásticos (polímeros) em misturas asfálticas, os quais podem ser aplicados como substitutos dos agregados, modificadores do ligante asfáltico ou aditivos na mistura. Ahmadinia *et al.* (2012) aplicaram resíduos de PET – passante 100% na peneira de 1,18mm - obtidos da trituração de garrafas plásticas como aditivos em misturas asfálticas do tipo Matriz Pétreas Asfáltica (do inglês *Stone Matrix Asphalt* - SMA), via processo seco. As misturas aditivadas com PET apresentaram melhor desempenho em relação à deformação permanente, verificado através de simuladores de tráfego em placas moldadas em laboratório ensaiadas a uma temperatura de 45°C, e ao escorrimento do ligante. As melhorias apresentadas em relação

à deformação permanente, segundo esses autores, estão associadas a um aumento na rigidez das misturas, ocasionado pelas propriedades semicristalinas do PET, as quais permanecem inalteradas durante o processo de mistura. No caso do escoamento do ligante, os resíduos de PET utilizado, ao permanecerem na forma de cristais, provocam um aumento na área superficial que absorve o ligante excedente, resultando na redução do escoamento do ligante, explicam os autores.

Moghaddam, Karim e Syammaun (2012), ao contrário de Ahmadinia *et al.* (2012), afirmam que o PET rígido pode tornar as misturas mais flexíveis e, consequentemente, mais deformáveis quando sob aplicação de carga. Tal afirmação é fundamentada nos resultados de módulo de resiliência de misturas asfálticas do tipo SMA com adição de PET passante na peneira de 2,36mm, nas proporções de 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1%, em relação ao peso dos agregados, adicionado via processo seco. Moghaddam, Karim e Syammaun (2012), também verificaram que a adição de PET proporcionou uma melhora nas propriedades elásticas das misturas, resultando no aumento da vida de fadiga. Moghaddam e Karim (2012) explicam que para contribuir para o aumento da vida de fadiga, além da melhora nas propriedades elásticas das misturas, o PET absorve parte da energia oriunda da repetição de cargas, retardando o surgimento e a propagação de trincas nas misturas asfálticas.

Rahman e Wahab (2013), porém, substituíram os agregados retidos entre as peneiras 1,18 e 2,36mm por PET, de 5 a 25% em peso da mistura, e verificaram que a presença deste material reduziu a rigidez das mesmas e conferiu um bom comportamento frente à deformação permanente. Neste caso, a substituição de 20% foi a que gerou menor deformação permanente, metade da deformação encontrada para a mistura com CAP não modificado, para as condições ensaiadas.

Mohammed e Hussein (2014a) avaliaram o comportamento de misturas asfálticas compostas por asfalto modificado por partículas finas de PET – passante na peneira nº200. Os autores verificaram, que a polimerização do asfalto com PET elevou a rigidez da mistura e melhorou à adesão entre agregados e ligante, minimizando os danos induzidos pela umidade.

Outro aspecto de grande valia analisado por Mohammed e Hussein (2014a) foi à durabilidade das misturas asfálticas. Da mesma forma, a polimerização do asfalto com PET surtiu um efeito positivo sobre as misturas asfálticas, o que pode ser explicado pela

melhora das propriedades de adesividade agregado-ligante promovida pela polimerização, conforme discutido anteriormente.

Por outro lado, a adição de PET em misturas asfálticas pelo processo seco não se mostrou uma alternativa eficiente para a melhora das propriedades de misturas asfálticas no tocante ao dano por umidade. A forma cristal adquirida pelo PET, após a mistura, retém parte do ligante, reduzindo a espessura do filme de ligante no entorno do agregado, deixando as misturas mais vulneráveis ao dano induzido pela umidade (AHMADINIA *et al.*, 2012).

Embora a polimerização do ligante asfáltico apresente vantagens, a exemplo das apresentadas por Mohammed e Hussein (2014a), existe a dificuldade de realizar este procedimento, relacionada à tendência de separação de fases em altas temperaturas devido à pouca compatibilidade entre polímero e ligante asfáltico. Mohammed e Hussein (2014b) sugerem uma adição máxima de 4% de PET, em relação ao peso do ligante, para produção de asfalto polímero, de modo a garantir uma boa homogeneidade e atender aos requisitos de estabilidade à estocagem e ductilidade.

### **2.3 Segurança viária**

Pavimentos são estruturas projetadas para resistirem aos esforços impostos pelo tráfego de veículos e as intempéries climáticas, de maneira a proporcionar aos seus usuários melhorias nas condições de rolamento, o que pode ser traduzido em duas palavras: conforto e segurança. A utilização de misturas asfálticas porosas, como camada complementar, ganha relevância quando se deseja obter um nível de segurança viária baseado no princípio de fomentar aumento da aderência entre os pneus dos veículos e o pavimento.

Pereira *et al.* (2012) verificaram a necessidade de intervenção no pavimento com a finalidade de beneficiar a segurança viária baseados na análise da aderência pneu-pavimento de trechos de rodovias nos estados de Pernambuco e Paraíba onde foram constatados uma considerável ocorrência de acidentes. A análise foi feita mediante a realização de ensaios de mancha de areia, pêndulo britânico e drenabilidade, além de ter sido determinado o *International Friction Index* (IFI) e analisados a aderência pneu-pavimento, também, das misturas encontradas nos trechos investigados, em laboratório, onde estas foram reproduzidas. Os resultados obtidos pelos autores revelaram uma condição do pavimento inferior ao mínimo sugerido pelo DNIT, para ambas as situações:

textura (0,6mm de altura média de mancha de areia) e atrito (75 BPN - *British Number Pendulum*), estabelecendo uma relação com o alto índice de acidentes no trecho analisado.

Tong e Li (2015) avaliaram a segurança ao se trafegar em uma rodovia sob diferentes condições climáticas. Para tal, foram atribuídos coeficientes de atrito para o pavimento de acordo como este se encontrava frente as condições climáticas consideradas. O coeficiente de atrito mais elevado (0,60) foi atribuído para a situação em que o pavimento se encontrava seco, seguido de 0,50, atribuído para a condição de pavimento molhado, 0,40 para pavimento sob chuva, 0,28 para pavimento sob neve e 0,18 para pavimento sob gelo. O estudo foi realizado através de modelagens onde foram analisados o comportamento de veículos deslocando-se em curva horizontal, em aclave e durante a frenagem. Foi verificado uma tendência de derrapagem do veículo em função da redução do coeficiente de atrito, resultando em desvios de trajetória e maiores tempos e distância de parada, demonstrando a relação do coeficiente de atrito do pavimento e a ocorrência de acidentes.

Kogbara *et al.* (2016) explicam que as mudanças de velocidade e direção e frenagens provocam o surgimento de forças na interação pneu-pavimento que, por sua vez, causam uma reação, denominada atrito, entre o pneu e o pavimento, permitindo a realização dos movimentos veiculares necessários à realização de manobras de maneira segura. Deste modo, o atrito na interface pneu- pavimento é fundamental para manter os veículos em suas trajetórias e evitar acidentes de trânsito. O que, objetivamente, quer dizer que quanto mais atrito estiver disponível melhor serão as condições de trafegabilidade em termos de segurança (HALL *et al.*, 2009; KOGBARA *et al.*, 2016).

Asi (2007) considera o atrito como um fator importante no que diz respeito a ocorrência de acidentes de trânsito em rodovias, embora muitas causas de acidentes estejam relacionadas a negligência dos condutores dos veículos. Esse autor destaca que há aumento do número de acidentes em períodos chuvosos, especialmente após as pancadas de chuvas iniciais, devido à baixa resistência a patinagem dos revestimentos dos pavimentos das rodovias nestes períodos.

Wallman e Åström (2001), da mesma forma, consideram o atrito na interface pneu- pavimento um dos principais fatores que impactam na segurança viária. Para esses autores, manter um determinado nível de segurança requer dos motoristas capacidade de

adaptação às mudanças das condições de atrito, o que se dá, principalmente, através do ajuste da velocidade.

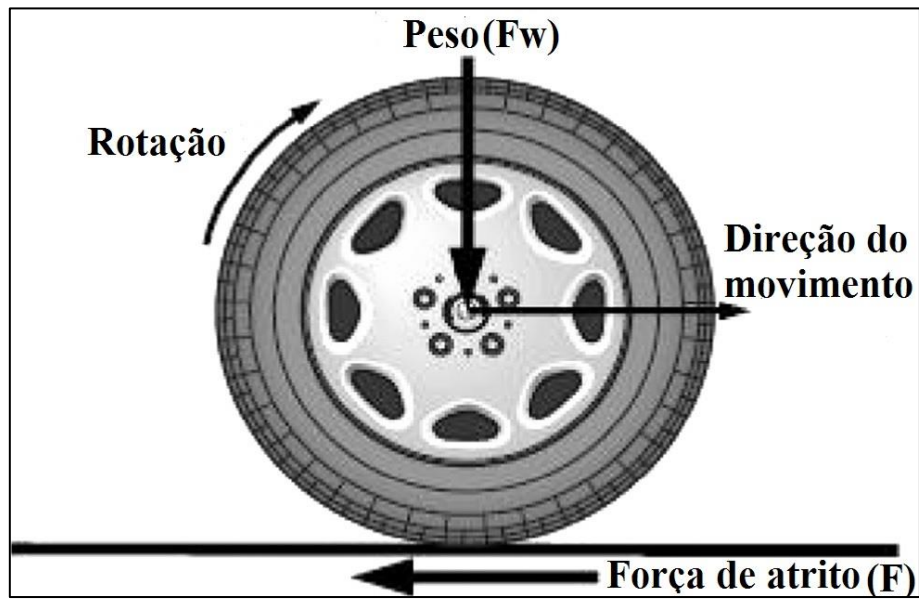
Wallman e Åström (2001), ainda, destacam a relação entre os condutores dos veículos e as condições das rodovias. Segundo os autores, os condutores captam informações visuais, auditivas e sinestésicas, como por exemplo, o aspecto da rodovia, o som oriundo dos pneus e os movimentos laterais e longitudinais dos veículos, e a partir delas elaboram uma percepção do nível de atrito da rodovia. Essa afirmação aponta para uma possível interferência direta das condições do pavimento nos fatores humanos em relação à segurança viária.

Partindo do princípio de que existem três fatores que influenciam o número de acidentes – condições dos pavimentos, veículos e fatores humanos - Lee, Nam e Abdel-Aty (2015) também destacam a importância das condições dos pavimentos na segurança viária. Segundo estes autores, além de ser um dos fatores naturais relacionados a geração de acidentes, as condições dos pavimentos afetam também, de forma simultânea, os demais, o que acaba por endossar a tese de interferência das condições do pavimento nos fatores humanos em relação à segurança viária.

Mayora e Piña (2009) definem atrito como a força resistente ao movimento entre duas superfícies em contato. Assim, trazendo este conceito para o contexto do tráfego rodoviário, o atrito existente na interface pneu-pavimento é a força de resistência ao movimento relativo entre o pneu do veículo e a superfície do pavimento. A Figura 7 mostra a representação das forças atuantes num pneu em movimento sobre o pavimento.



Figura 7 – Esquema de forças atuantes num pneu em movimento sobre o pavimento



Fonte: Adaptado de Hall *et al.* (2009)

De acordo com Hall *et al.* (2009) e Mayora e Piña (2009), a magnitude da força de atrito é medida por coeficiente adimensional, dado pela razão entre a força paralela à superfície de contato e oposta ao sentido do movimento e a força perpendicular a esta superfície, conforme a Equação 1.

$$\mu = \frac{F}{F_w} \quad (1)$$

Em que:

$\mu$ : coeficiente de atrito

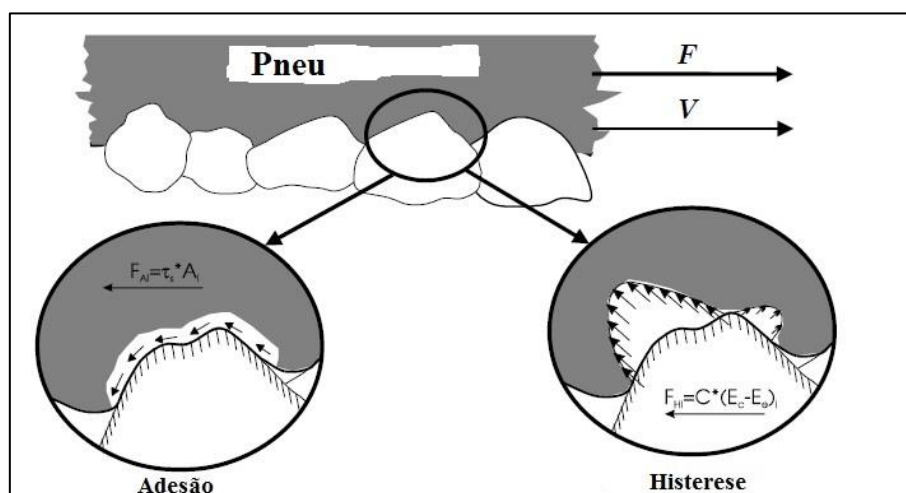
$F$ : força paralela à superfície de contato e oposta ao sentido do movimento;

$F_w$ : força perpendicular à superfície de contato (carga da roda).

O coeficiente de atrito é função das propriedades do revestimento dos pavimentos, dos pneus dos veículos, das condições de cargas, entre outras. Apesar de não indicar, propriamente, a característica de parada dos veículos, fatores humanos e condições climáticas, é uma ferramenta utilizada para determinar as propriedades de atrito dos revestimentos asfálticos, a qual dependem do tipo de agregado, da dosagem da mistura asfáltica e dos métodos construtivos dos pavimentos (ASI, 2007).

A força de atrito encontrada na interação pneu-pavimento é resultado de duas componentes de força, denominadas adesão e histerese (KOGBARA *et al.*, 2016). A Figura 8 mostra o esquema de formação da força de atrito na interação pneu-pavimento.

Figura 8 – Componentes da força de atrito na interação pneu-pavimento



Fonte: Adaptado de Hall *et al.* (2009)

Adesão é o atrito oriundo da ligação entre os pneus dos veículos e o revestimento do pavimento quando estes estão em contato. Esta é função da força cisalhante na interface e da área de contato. Histerese resulta da perda de energia devido a deformação do pneu do veículo, que, ao se deformar, envolve-se em torno da textura do revestimento. Quando o pneu relaxa, parte da energia armazenada é recuperada e outra parte é perdida na forma de calor, resultando em força de atrito (HALL *et al.*, 2009).

Quando a componente tangencial da força que atua na interface pneu-pavimento excede a força de atrito máxima disponível, o veículo perde sua estabilidade direcional e, conseqüentemente, ocorre a derrapagem do mesmo sobre o pavimento. Esta situação é agravada quando na superfície do pavimento há um filme de água, que, atuando como uma espécie de lubrificante, reduz a quantidade de atrito disponível na interface pneu-pavimento, favorecendo a ocorrência de acidentes em períodos chuvosos (MAYORA e PIÑA, 2009).

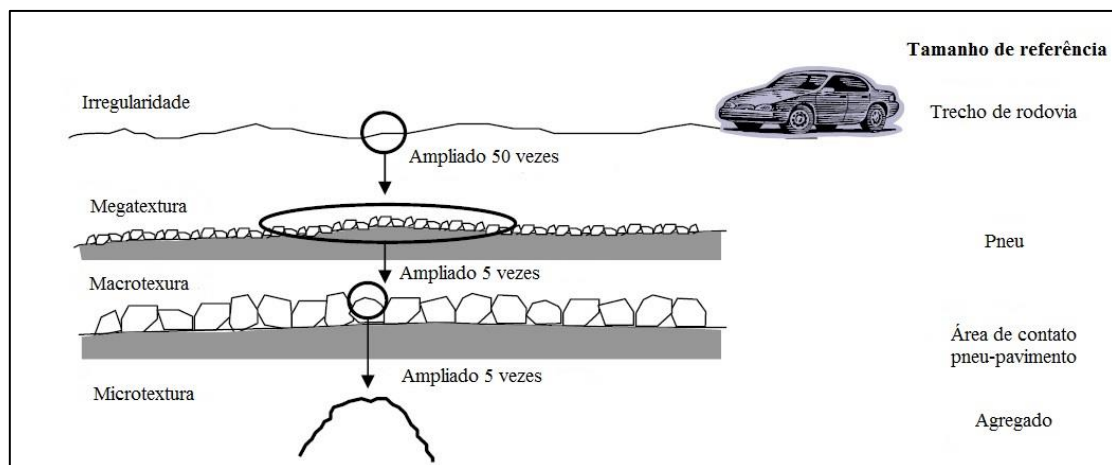
Definida como os desvios da superfície em relação a um plano de referência, a textura da camada de revestimento dos pavimentos desempenha um papel importante na promoção de atrito na interface pneu-pavimento. Os desvios podem ocorrer em quatro diferentes níveis de escala, definidos pelo comprimento de onda ( $\lambda$ ) dos seus

componentes, o que resulta na seguinte divisão (HALL *et al.*, 2009; FLINTSCH *et al.*, 2012 e KOGBARA *et al.*, 2016):

- Microtextura: comprimento de onda de 0 a 0,5 mm;
- Macrotextura: comprimento de onda de 0,5 a 50 mm;
- Megatextura: comprimento de onda de 50 a 500 mm;
- Irregularidade: comprimento de onda de 500mm a 50m.

A figura 9 ilustra os níveis de textura da camada de revestimento de um pavimento.

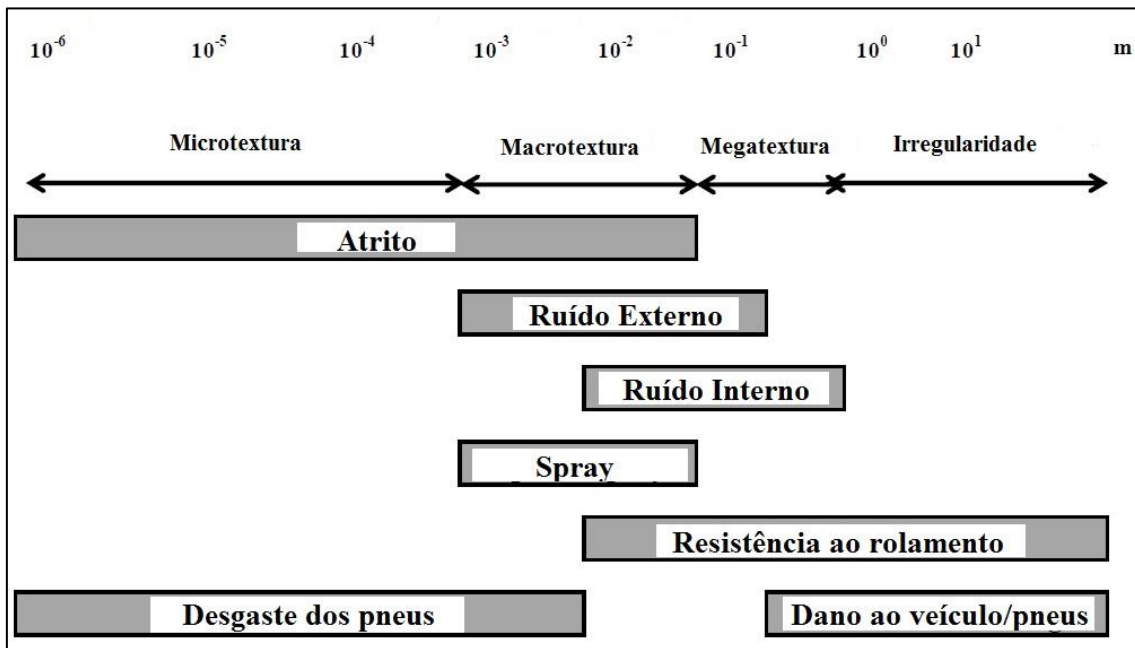
Figura 9 - Níveis de textura da camada de revestimento de um pavimento.



Fonte: Hall *et al.* (2009)

Cada escala de textura contribui à sua maneira para promover o atrito na interface pneu-pavimento, sendo a microtextura e a macrotextura as principais responsáveis. A primeira é responsável pela componente de adesão, enquanto que a segunda é encarregada da componente de histerese (HALL *et al.*, 2009; KOGBARA *et al.*, 2016). A Figura 10 mostra a influência da textura na interação pneu-pavimento.

Figura 10 - Influência da textura na interação pneu-pavimento



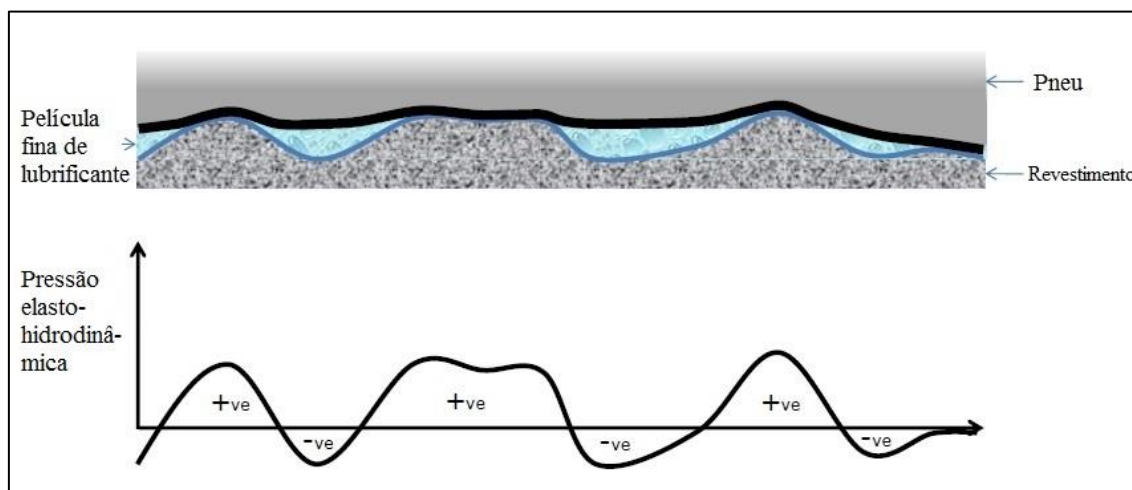
Fonte: Flintsch *et al.* (2012)

Ao contrário da microtextura e da macrotextura, que são fundamentais na promoção de atrito na interface pneu-pavimento (DUNFORD, 2013), a megatextura e a irregularidade são indesejáveis para um bom desempenho do pavimento (DESCORNET, 1989 *apud* KOGBARA *et al.*, 2016). Dunford (2013) explica que a irregularidade, originada a partir de defeitos construtivos ou deformações causadas pelas cargas dos veículos sobre o pavimento, afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade do movimento, a dinâmica das cargas, a drenagem da via e ainda pode levar à perda de contato do veículo com o pavimento. Enquanto que a megatextura, representada por afundamentos, buracos, fendas e trincas, afeta a vibração dos pneus e está relacionada a geração de ruído e a resistência ao rolamento.

A microtextura é uma textura de escala fina que interage com a borracha dos pneus, numa escala molecular, proporcionando adesão. Em relação a condição seca ou molhada em que se encontra o pavimento, a microtextura é de fundamental importância, em ambas as situações, especialmente na segunda, pois a microtextura ajuda a romper o filme d'água entre as partículas dos agregados e a borracha dos pneus, minimizando o efeito lubrificante, e, conseqüentemente, reduzindo as chances de ocorrência de acidentes em períodos chuvosos (HALL *et al.*, 2009; FLINTSCH *et al.*, 2012 e MCQUAID *et al.*, 2013).

A presença do filme d'água entre as partículas dos agregados e a borracha dos pneus faz com que haja diferenças entre as superfícies de contato pneu-pavimento, caracterizadas por pressões “elastohidrodinâmicas” (DUNFORD, 2013). A Figura 11 mostra a representação de como a presença do filme d'água interfere no contato pneu-pavimento, bem como as ditas pressões “elastohidrodinâmicas”.

Figura 11 – Interferência do filme d'água na interface pneu-pavimento e pressões “elastohidrodinâmicas”.



Fonte: Dunford (2013)

Durante o deslocamento do veículo, os pneus arrastam parte da água sobre as partículas componentes da microtextura que, apresentando características suaves e arredondadas, contribuem para a perda de contato entre o pneu e o pavimento, reduzindo, drasticamente, o coeficiente de atrito. Em situações onde a microtextura tende a ser mais áspera, ocorre o rompimento do filme d'água que atua como lubrificante (DUNFORD, 2013).

Mayora e Piña (2009) definem macrotextura como a medida da profundidade da textura do pavimento. Para Kogbara *et al.* (2016), a macrotextura é formada pela forma e pelo tamanho das partículas de agregados que compõem o revestimento do pavimento, bem como pelo espaçamento e pela disposição das partículas de agregado graúdo, além de eventuais ranhuras presentes na camada de revestimento.

A macrotextura desempenha papel importante em termos de segurança, principalmente em situações onde os veículos trafegam a velocidades superiores a 90 km/h em pavimentos molhados, tendo em vista a redução da resistência à derrapagem em função do aumento da velocidade dos veículos quando estes trafegam sob estas condições

e que a extensão em que essa redução ocorre é dada pela macrotextura (HALL *et al.*, 2009; MAYORA e PIÑA, 2009 e KOGBARA *et al.*, 2016).

A macrotextura é responsável diretamente pela drenagem das águas precipitadas sobre os revestimentos dos pavimentos, deixando-as distante da área de contato pneu-pavimento, contribuindo para a segurança ao diminuir o *spray*, proveniente do borrifo de água pelos pneus dos veículos, a reflexão da luz dos faróis noturnos, melhorando as condições de visibilidade, além de minimizar as chances de ocorrer o fenômeno de aquaplanagem (OLIVEIRA, 2003; MAYORA e PIÑA, 2009; e PUTMAN e KLINE, 2012).

De acordo com Ong e Fwa (2007), a aquaplanagem ocorre quando a força resultante da subpressão d'água se iguala à carga vertical aplicada sobre os pneus. Numericamente, é o instante em que a pressão hidrodinâmica, imposta pela água, é igual a pressão dos pneus. Esses autores verificaram uma redução da velocidade na qual ocorre a aquaplanagem quando se considera uma lâmina de água sobre o revestimento, através de modelagem que simula as mudanças que ocorrem nas pegadas dos pneus quando as velocidades dos veículos aumentam até acontecer a aquaplanagem. As velocidades obtidas pelos autores foram comparadas às determinadas a partir de equações, onde foram consideradas simplesmente as deformações e as pressões dos pneus, sugerindo a influência d'água precipitada sobre os revestimentos na ocorrência da aquaplanagem e, consequentemente, de acidentes.

Pensar em segurança viária, portanto, pressupõe investir, inclusive, na infraestrutura, o que envolve, por exemplo, ajuste na dosagem da mistura asfáltica de modo que a microtextura e a macrotextura do pavimento possam contribuir para garantir um nível de aderência pneu-pavimento compatíveis aos exigidos para prover uma maior segurança, especialmente em situações mais favoráveis a ocorrência de acidentes, como no caso de períodos chuvosos, conforme vem sendo exposto. Por outro lado, deve-se levar em conta a relação existente entre as condições do pavimento e os fatores humanos na causa de acidentes de trânsito, levantada por Wallman e Åström (2001) e Lee, Nam e Abdel-Aty (2015), que credita à infraestrutura participação subjetiva na segurança viária.

Pereira *et al.* (2012) destacam a necessidade de se verificar a disponibilidade de agregados que proporcionem uma microtextura adequada e que, em caso negativo, deve-

se optar por misturas que garantam um nível de textura mínimo, ou seja, deve-se buscar na macrotextura as condições de aderência pneu-pavimento desejadas.

## **2.4 Permeabilidade em misturas asfálticas**

A permeabilidade é uma propriedade que expressa a capacidade de percolação de um determinado fluido através de um meio poroso. Em se tratando de misturas asfálticas porosas, onde o fluido em questão é a água, a permeabilidade é uma das principais propriedades, tendo em vista a necessidade de se evitar acúmulo de água sobre a camada de revestimento, sob o risco de surgimento de problemas práticos, como a redução da aderência pneu pavimento e a hidroplanagem, e problemas estruturais como o agravamento da deformação permanente e do trincamento por fadiga, além de danos induzidos diretamente pela umidade, cuja consequência é a perda de adesividade entre agregados e ligante asfáltico (ALVAREZ, MARTIN e ESTAKHRI, 2010; BENEDETTO e UMILIACO, 2014; FERREIA, CASTELO BRANCO e SILVA FILHO, 2014).

De acordo com Alvarez, Martin e Estakhri (2010), para se obter os benefícios proporcionados pelo uso de misturas asfálticas porosas, a dosagem destas deve ser tal que resulte em misturas duráveis e funcionais. Porém, a maioria das metodologias de dosagem de misturas asfálticas não contempla características de funcionalidade.

Para Benedetto e Umiliaco (2014), a determinação da capacidade de permeabilidade das misturas asfálticas é fundamental quando se pensa em solucionar os problemas decorrentes do acúmulo de água sobre as superfícies do pavimento. A permeabilidade, portanto, pode ser considerada um parâmetro indicador de funcionalidade de uma mistura asfáltica e, deste modo, ser incorporada às metodologias de dosagem. No entanto, é necessário superar a falta de conhecimento desta propriedade ou, no caso do Brasil, a ausência de metodologia definida para sua determinação.

O engenheiro francês Henry Darcy (1856) desenvolveu a teoria fundamental da permeabilidade de solos, conhecida como lei de Darcy, segundo a qual a taxa de escoamento de um fluido (água),  $Q$ , através de uma amostra de areia, de seção transversal  $A$ , é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico  $i$  e a área da seção transversal da amostra (CHEN, LI e SHEN, 2006; UMILIACO e BENEDETTO, 2013; VARDANEGA, 2014). A Equação 2 expressa a lei de Darcy.

$$Q = k \times i \times A \quad (2)$$

Em que:

$Q$ : taxa de escoamento do fluido;

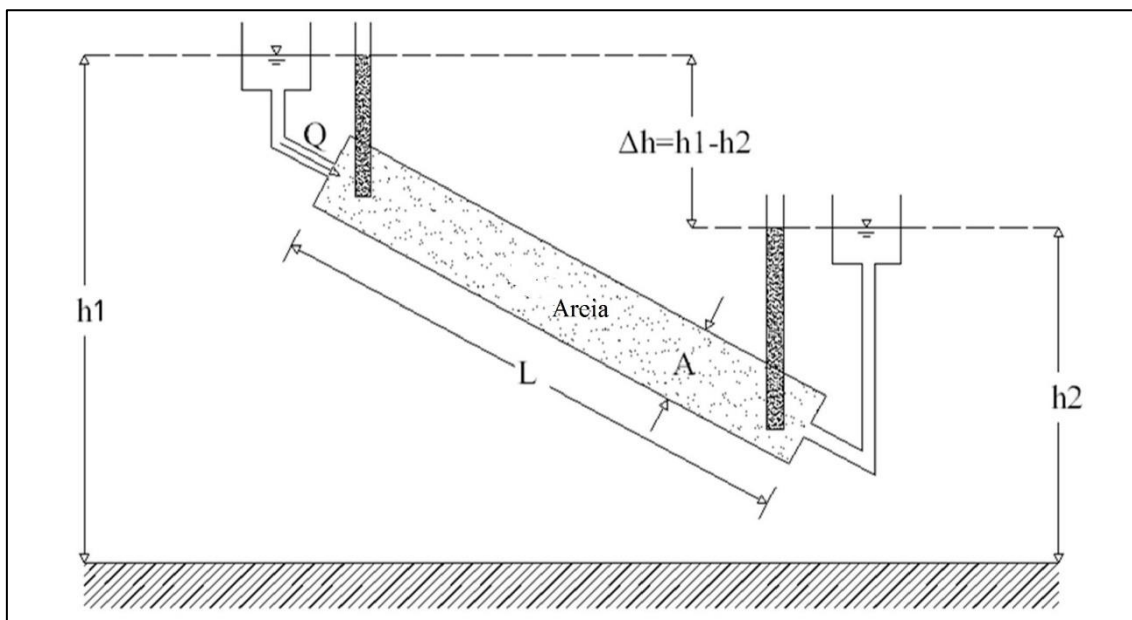
$k$ : coeficiente de permeabilidade;

$i$ : gradiente hidráulico;

$A$ : área da seção transversal da amostra.

O gradiente hidráulico ( $i$ ) é definido como a relação entre a diferença de pressão ( $\Delta h$ ) e a altura da amostra ensaiada ( $L$ ), ou, segundo Cooley (1999), perda de carga por unidade de comprimento. A taxa do fluxo dividido pela área da seção transversal da amostra é igual a velocidade média do escoamento do fluido ( $V$ ). O coeficiente de permeabilidade é expresso em unidade de velocidades para uma determinada carga hidráulica (UMILIACO e BENEDETTO, 2013). A Figura 12 mostra o esquema do experimento do qual surgiu a lei de Darcy – experimento de Darcy.

Figura 12 – Esquema do experimento de Darcy



Fonte: Umiliaco e Benedetto (2013)

Para além da definição, o gradiente hidráulico é um conceito fundamental no estudo da permeabilidade de um determinado material. Tendo em vista que a perda de carga aumenta diretamente com a velocidade de escoamento da água, até o ponto em que



o fluxo é considerado laminar e, a partir deste, é verificado uma não linearidade entre a velocidade de fluxo e a perda de carga, caracterizando o escoamento como turbulento, no qual a lei de Darcy torna-se inválida, este parâmetro representa os meios pelos quais podem ser definidos os limites de aplicação da lei de Darcy (COOLEY, 1999).

A lei de Darcy aplicada a um meio poroso, portanto, é válida quando o fluido se desloca a uma velocidade baixa e não ocorre nenhuma turbulência (UMILIACO e BENEDETTO, 2013). Além disso, Cooley (1999) lista as seguintes condições a serem atendidas para aplicação da lei de Darcy: material homogêneo e saturado, condições de escoamento em estado constante, escoamento laminar e unidirecional e fluido incompressível.

Chen, Li e Shen (2006) citam os meios silte, areia fina e areia média onde o escoamento de água é laminar e, portanto, possíveis de serem aplicados a lei citada. Enquanto que em meios como areia grossa, brita e seixos o escoamento é turbulento, de modo que a lei de Darcy torna-se inválida. Em se tratando de misturas asfálticas, Chen, Li e Shen (2006) consideram esta lei aplicável.

Características como procedimento de compactação, propriedades geométricas do pavimento, a exemplo da espessura das camadas, Volume de vazios, graduação e forma dos agregados governam a permeabilidade de misturas asfálticas (UMILIACO e BENEDETTO, 2013; BENEDETTO e UMILIACO, 2014). Porém, conforme apontam Umiliaco e Benedetto (2013), há uma dificuldade de correlacionar estas características com o coeficiente de permeabilidade.

Xing, Wang e Wei (2013) apresentaram uma correlação entre coeficiente de permeabilidade ( $K$ ) e Volume de vazios ( $V_v$ ), segundo a qual, aquele parâmetro é determinado em função deste através da Equação 3.

$$K = -3,1934 \times V_v^3 + 201,23 \times V_v^2 - 3948,1 \times V_v + 26129 \quad (3)$$

Embora seja o Volume de vazios interconectados que de fato influenciam na permeabilidade de uma mistura asfáltica, Xing, Wang e Wei (2013) optaram em considerar apenas o Volume de vazios totais para determinação do coeficiente de permeabilidade através da relação mencionada anteriormente, tendo em vista a maior

facilidade de determinação deste parâmetro e a relação direta entre volume de vazios e volume de vazios interconectados.

O coeficiente de permeabilidade,  $K$ , por sua vez, varia de material para material sendo, portanto, o parâmetro utilizado quando se deseja obter a permeabilidade de um determinado material (VARDANEGA, 2014). Para o cálculo da permeabilidade tem-se adotado ensaios laboratoriais, através do uso de equipamentos conhecidos na literatura por permeâmetros, e medidas hidráulicas em campo (ALVAREZ, MARTIN e ESTAKHRI, 2010; BENEDETTO e UMILIACO, 2014). A água é o fluido normalmente utilizado em estudos que visam determinar a permeabilidade de misturas asfálticas (VARDANEGA, 2014), embora haja outros métodos que utilizaram ar sob pressão, conforme apontam Ferreira, Castelo Branco e Silva Filho (2014).

Benedetto e Umiliaco (2014) afirmam que a principal vantagem das medidas de permeabilidades em campo é que, neste caso, é dispensado o uso de técnicas destrutivas. Porém, em campo, o escoamento de água pode ocorrer em qualquer direção, de modo que a permeabilidade resultante não pode ser representada pela lei de Darcy. Além disso, a determinação do nível de saturação é imprecisa e há dificuldades de identificar a altura e a seção transversal do escoamento, complementam os autores.

A determinação da permeabilidade de misturas asfálticas em laboratório, com uso de permeâmetros, consiste, basicamente, em submeter a amostra, extraída do campo ou moldada em laboratório, a um fluxo unidirecional de um volume de água e determinar o tempo de escoamento. Há duas modalidades de ensaios laboratoriais para determinação da permeabilidade de misturas asfálticas: à carga variável e à carga constante. Em ambas situações, o coeficiente de permeabilidade é calculado a partir da lei de Darcy. A metodologia do ensaio à carga variável estabelece que seja determinada a variação de carga hidráulica por um determinado intervalo de tempo, enquanto que no ensaio à carga constante, é determinada a taxa de escoamento de água através de uma amostra saturada mantendo-se o nível de água constante. O coeficiente de permeabilidade é determinado através das Equações 4 e 5 para o ensaio à carga variável e à carga constante, respectivamente (COOLEY, 1999; BENEDETTO e UMILIACO, 2014; VARDANEGA, 2014).

$$K = \frac{a \times L}{A \times t} \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (4)$$

Em que:

$K$  = coeficiente de permeabilidade, cm/s;

$a$  = área interna da seção transversal do tubo, cm<sup>2</sup>;

$L$  = espessura média da amostra de ensaio, cm;

$A$  = área da seção transversal da amostra ensaiada, cm<sup>2</sup>;

$t$  = tempo decorrido entre  $h_1$  e  $h_2$ , s;

$h_1$  = carga hidráulica inicial, cm;

$h_2$  = carga hidráulica final, cm.

$$K = \frac{Q \times L}{A \times h \times t} \quad (5)$$

Em que:

$K$  = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

$Q$  = volume de água que atravessa a amostra (cm<sup>3</sup>);

$L$  = altura da amostra (cm);

$h$  = desnível entre a entrada e a saída d'água (cm);

$A$  = área da seção transversal da amostra (cm<sup>2</sup>);

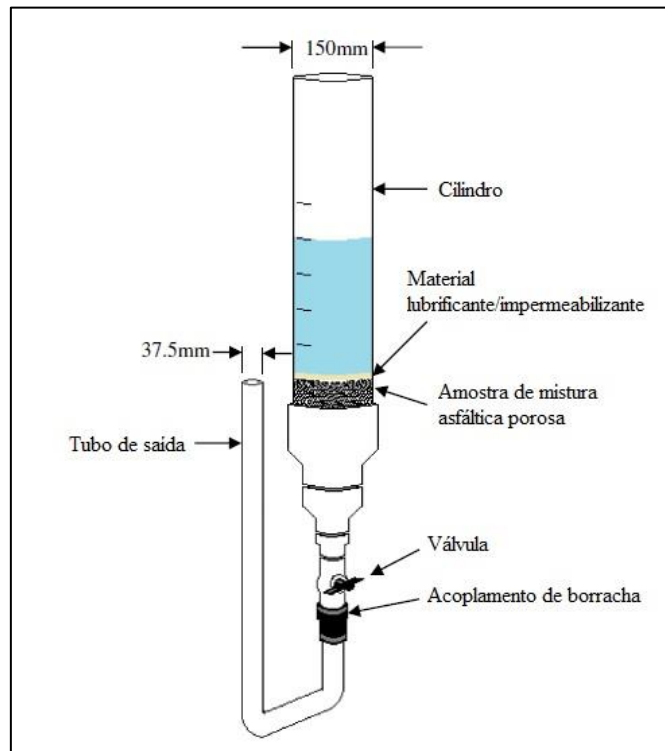
$t$  = tempo decorrido até a quantidade de água atravessar totalmente a amostra (s);

De acordo com Cooley (1999), a modalidade de ensaio de permeabilidade mais indicado para misturas asfálticas porosas é o realizado à carga constante. Chen, Li e Shen (2006), da mesma forma, afirmam que estes ensaios são mais aplicáveis a materiais com permeabilidade relativamente alta ( $K > 0,01$  cm/s), enquanto que os ensaios a carga variável são preferíveis de serem aplicados a materiais menos permeáveis.

Contudo, a literatura tem demonstrado uma tendência de realização de ensaio de permeabilidade para misturas asfálticas porosas contrária às teses defendidas por Cooley (1999) e Chen, Li e Shen (2006). Goh e You (2012), Hanzah, Hasan e Vem (2012), Mansour e Putman (2013), Lyons e Putman (2013), Martin, Putman e Neptune (2014),

Djakafar *et al.* (2015) e Putman e Lyons (2015), por exemplo, determinaram o coeficiente de permeabilidade de misturas asfálticas porosas realizando ensaio à carga variável. A Figura 13 mostra o esquema de funcionamento do permeâmetro para misturas asfálticas utilizados por estes autores.

Figura 13 - Esquema de funcionamento de um permeâmetro para misturas asfálticas



Fonte: Putman e Lyons (2015)

Vardanega (2014), contudo, considera que a principal limitação das metodologias de ensaio laboratoriais para determinação do coeficiente de permeabilidade de misturas asfálticas está na dificuldade de reproduzir em laboratório as condições de campo. Como exemplo, os autores citam o fato destes ensaios serem feitos em amostras completamente saturadas, em conformidade com a lei de Darcy; situação essa dificilmente encontrada em campo.

Chen *et al.* (2015) argumentam que as metodologias laboratoriais para determinação da permeabilidade não representam, de forma adequada, como ocorre o fluxo de água através do pavimento durante eventos chuvosos. A principal razão para isso, segundo os autores, é que a água oriunda da precipitação permeia através dos vazios interconectados da mistura porosa ao longo da seção transversal do pavimento, devido à inclinação transversal do mesmo. A Figura 5 mostra o sentido do fluxo d'água após precipitar-se sobre o pavimento.

No entanto, é importante lembrar que alguns ensaios laboratoriais já consagrados em pavimentação, da mesma forma, apresentam algumas limitações no sentido de não representarem, rigorosamente, o que acontece em campo em laboratório e, mesmo assim, são considerados para avaliação quanto a um determinado parâmetro através da confrontação dos resultados em si. Portanto, o coeficiente de permeabilidade obtido a partir de ensaios realizados em laboratório pode ser considerado um indicativo de funcionalidade de misturas asfálticas porosas.

## **2.5 Deformação permanente em misturas asfálticas**

Deformação permanente é um dos principais defeitos observados em pavimentos flexíveis. Sendo atribuída à camada de revestimento, às subcamadas ou à toda estrutura do pavimento, ocorrem em trilhas de rodas de caminhões, corredores de ônibus urbanos e em pátios de estacionamentos (ZHANG *et al.*, 2013; MEDINA e MOTTA, 2015).

De acordo com Witczak (2007) e Nascimento (2008), a deformação permanente, também conhecida como afundamento de trilha de roda, desenvolve-se a partir da combinação entre densificação (com mudança de volume) e deformação de cisalhamento (sem mudança de volume) devido a aplicação de cargas repetidas do tráfego, podendo, inclusive, ocorrer no subleito do pavimento.

Com base na causa e na camada onde ocorre, Witczak (2007), define três tipos de deformação permanente: (i) densificação unidimensional ou compressão vertical, (ii) fluência lateral ou movimento plástico e (iii) deformação mecânica. No primeiro caso, há um afundamento próximo ao centro de aplicação da carga de roda sem que haja qualquer deslocamento de material na lateral do afundamento. A densificação, geralmente, está atrelada ao excesso de vazios ou a compactação inadequada, permitindo uma pós-compactação quando sujeita as cargas do tráfego, o que resulta num nível de deformação permanente de baixo a moderado. A fluência lateral ou movimento plástico é caracterizada pelo deslocamento lateral de material, em ambos os lados do afundamento, devido a uma força de cisalhamento subdimensionada ou insuficiência de vazios (<3%) na mistura asfáltica. Um baixo teor de vazios na mistura faz com que o ligante asfáltico atue como um lubrificante, ao invés de aglutinante, em climas quentes, resultando num nível de deformação permanente de moderado a alto. A deformação mecânica tem origem na consolidação, densificação e/ou movimento lateral das camadas de base, sub-base e reforço do subleito e geralmente são acompanhadas por um trincamento longitudinal na

superfície do pavimento, que ocorrem no centro e ao longo das bordas externas do afundamento, quando a mistura asfáltica é demasiadamente rígida.

O mecanismo da deformação permanente está associado a deformações plásticas não recuperáveis após a remoção das cargas atuantes no pavimento. Quando a carga de roda é aplicada sobre o revestimento, esta camada e as demais se deformam proporcionalmente ao módulo de elasticidade e a espessura de cada camada nas temperaturas e velocidades de carregamento. Durante o período em que as cargas são cessadas, apenas uma parte do deslocamento é recuperável, de modo que há uma deformação residual em uma ou mais camadas. Com a repetição das cargas, fenômeno natural em se tratando de uma estrutura de pavimento, ocorre o acúmulo das deformações residuais resultando no aumento da deformação permanente (WITCZAK, 2007).

O estudo da deformação permanente em misturas asfálticas é realizado, principalmente, mediante ensaios de compressão uniaxial não-confinados e de simuladores de tráfego em laboratório, com carregamento de roda em movimento de vaivém, utilizado principalmente na fase de dosagem da mistura asfáltica (BERNUCCI *et al.*, 2008; MEDINA e MOTTA, 2015). Além destes, a deformação permanente é avaliada através dos ensaios de Módulo Dinâmico (MD) e *Triaxial Repeated Load Permanent Deformation* (TRLPD), sendo este último pouco realizado no Brasil, devido sua complexidade de execução, embora represente melhor a condição de tensão multiaxial encontrada em campo (BERNUCCI *et al.*, 2008; NASCIMENTO, 2008; ZHANG *et al.*, 2013; BORGES, 2014).

O MD é um método de ensaio utilizado para caracterizar a rigidez e as propriedades visco elásticas de misturas asfálticas através do valor absoluto do módulo complexo ( $|E^*|$ ). O ensaio de MD consiste na aplicação de uma carga uniaxial compressiva senoidal em um corpo de prova cilíndrico em diferentes faixas de temperatura e de frequências de carregamento. As interpretações dos resultados são feitas a partir de curvas mestras, que permitem comparações para uma faixa de frequências e temperaturas (ZHANG *et al.*, 2013; BORGES, 2014). O parâmetro obtido no ensaio de MD é o  $|E^*|$ , calculado através da Equação 6 (ZHANG *et al.*, 2013; BORGES, 2014).

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

Em que

$E^*$ : módulo complexo;

$\sigma_0$  : tensão axial compressiva;

$\varepsilon_0$ : deformação axial recuperável.

Dentre os ensaios de compressão uniaxial utilizados para estudo da deformação permanente de misturas asfálticas destacam-se o *creep* estático (ou simplesmente *creep*) e o *creep* dinâmico. Para realização do *creep* estático aplica-se uma carga compressiva estática e contínua ao longo do tempo em corpos de prova cilíndrico. Então, mede-se a relação da deformação total com o tempo para um determinado carregamento e, a partir deste parâmetro, determina-se a função fluência, dada pela Equação 7 (BERNUCCI *et al.*, 2008; NASCIMENTO, 2008; BORGES, 2014).

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (7)$$

Em que

$D(t)$ : função fluência;

$\varepsilon(t)$ : deformação em função do tempo;

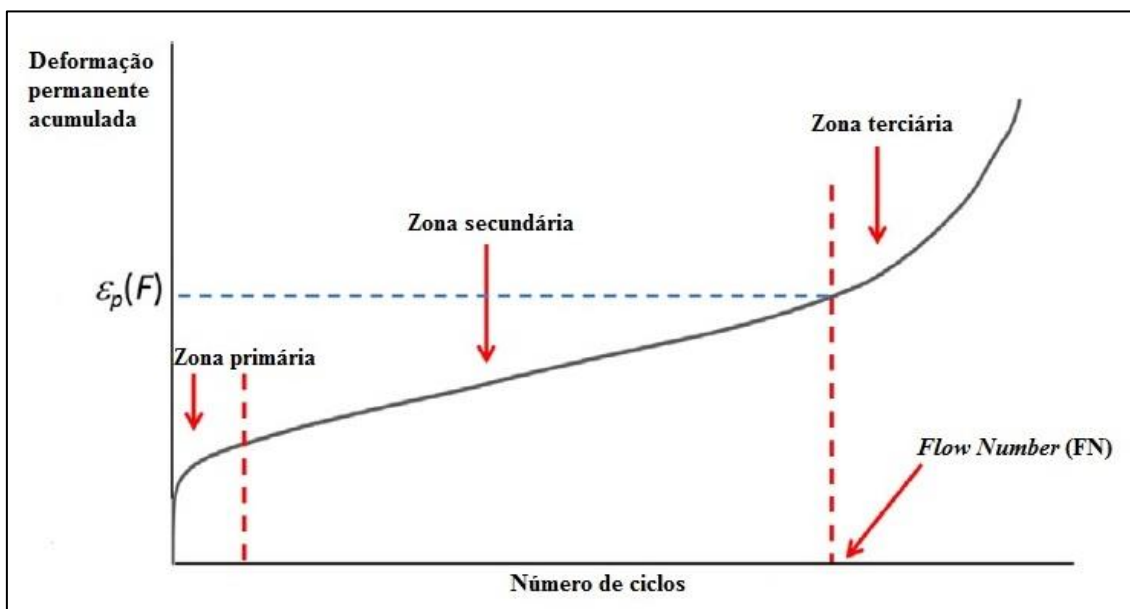
$\sigma_0$  : tensão constante aplicada.

O ensaio uniaxial de carga repetida – *creep* dinâmico – é realizado com aplicação de pulsos de carga ao corpo de prova, a uma determinada frequência, tempo de aplicação de carga e intervalo entre aplicações das cargas, a uma temperatura especificada. Geralmente, tem-se adotado 0,10 segundos como tempo de aplicação de carga, seguido por um repouso de 0,90 segundos, aplicados a uma frequência de 1Hz. Ao final do ensaio obtêm-se a deformação permanente acumulada em função do número de ciclos. Assim como no *creep* estático, a deformação permanente acumulada ( $\varepsilon_p$ ) pode ser dividida em três zonas, a saber:

- Zona primária: região da curva onde a taxa de deformação diminui com o número de ciclos de carregamento;
- Zona secundária: região da curva em que a taxa de deformação é constante com o número de ciclos;
- Zona terciária: região da curva onde a taxa de deformação aumenta com o número de ciclos.

A Figura 14 mostra as zonas da deformação permanente acumulada em uma curva típica obtida no ensaio de *creep* dinâmico, onde são plotadas as deformações permanentes *versus* o número de ciclos de carga.

Figura 14 - Curva típica obtida no ensaio de *creep* dinâmico



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2013)

Os parâmetros obtidos no ensaio *creep* dinâmico incluem (ZHANG *et al.*, 2013):

- *Flow Number* (FN) ou Número de Fluência: número de ciclos de carga no qual o material entra na zona terciária;
- $\varepsilon_p(\text{FN})$ : deformação permanente acumulada, em micro, correspondente ao FN;
- $t(\text{FN})$ : tempo de ensaio, em minutos, correspondente ao FN.

Análogo ao ensaio *creep* estático, onde o *Flow Time* (ou Tempo de Fluência), definido como o ponto inicial de deformação terciária deste ensaio, é o parâmetro utilizado na avaliação do desempenho de misturas asfálticas em relação a deformação permanente, o FN é o parâmetro utilizado quando da realização do ensaio de *creep* dinâmico (NASCIMENTO, 2008).

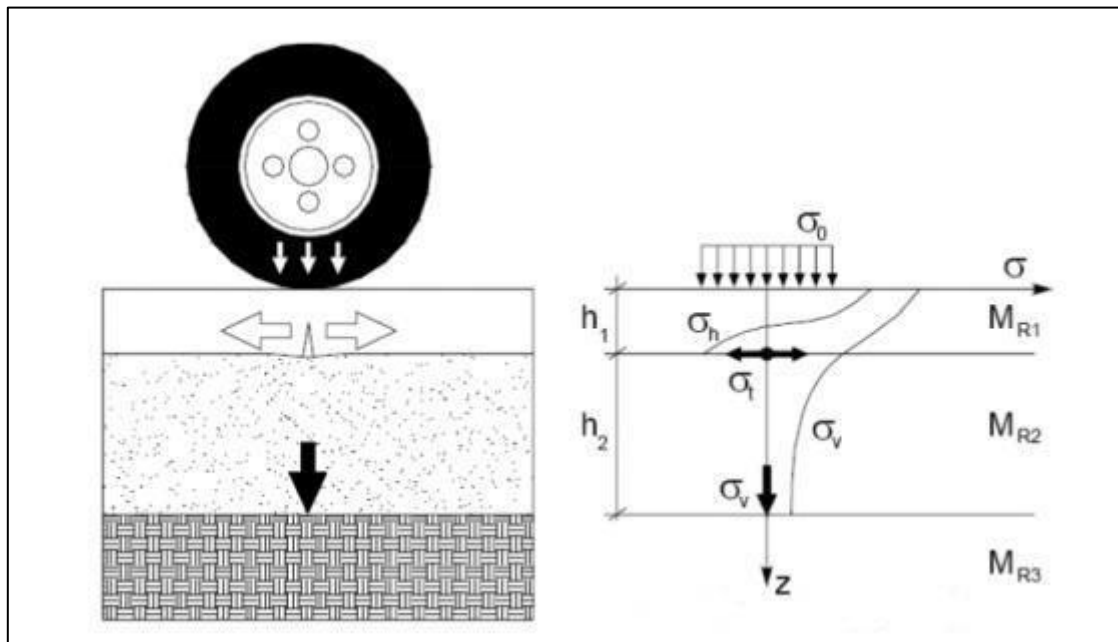
## 2.6 Fadiga em misturas asfálticas

O pavimento é uma estrutura em que as cargas atuantes são transientes, de modo que os danos causados estão relacionados à quantidade de vezes que uma determinada carga solicita a estrutura em um determinado espaço de tempo, do que propriamente a magnitude da mesma atuando de forma monotônica, fenômeno este conhecido como



fadiga. Medina e Motta (2015) explicam que a repetição das cargas das rodas dos veículos solicita a camada de revestimento asfáltico à flexão, o que provoca o surgimento de trincas, geralmente, na parte inferior, que se propagam ascendentemente até atingir a superfície. A Figura 15 ilustra o surgimento de trincas na parte inferior do revestimento asfáltico devido as tensões provocadas pelas cargas de roda.

Figura 15 - Tensões no pavimento e surgimento de trincas na parte inferior do revestimento asfáltico



Fonte: Medina e Motta (2015)

A fadiga, portanto, é um dano caracterizado pelo surgimento de trincas na superfície do pavimento, resultando num defeito conhecido como trincas por fadiga, que provoca sensação de desconforto aos usuários. Além disso, quando não reparadas a tempo, as trincas podem evoluir e resultar em buracos e poros, que contribuem para o surgimento de acidentes e permitem o acesso de umidade às camadas do pavimento (MOGHADDAM e KARIM, 2012).

O ensaio de fadiga pode ser realizado a Tensão Controlada (TC) e Deformação Controlada (DC). No primeiro caso, a tensão aplicada repetidamente e induzida pela força vertical distribuída no friso da geratriz não se altera até a ruptura do corpo de prova. Esta modalidade de ensaio é mais indicada para as situações onde o revestimento asfáltico é mais rígido que a camada de base, pois, por serem mais resistentes, determinam a magnitude das forças. O ensaio realizado a deformação controlada se encerra quando houver uma redução da rigidez inicial, pré-estabelecida, do corpo de prova. Neste caso,

indica-se para as situações onde ocorrem revestimentos asfálticos mais delgados e fracos em relação à base, pois, nestes casos, o revestimento tem sua deformação controlada pela deformabilidade das camadas subjacentes (MEDINA e MOTTA, 2015).

Devido a maior facilidade de execução, Medina e Motta (2015) apontam o ensaio de compressão diametral à tensão controlada como o mais conveniente de ser realizado no Brasil, embora ensaios de flexão sejam preferíveis por melhor representarem as deformações e as tensões nos revestimentos asfálticos. Outras configurações de ensaio incluem flexão em viga e em corpos de prova trapezoidais, torção em amostras cilíndricas e tração uniaxial (CEZARO JUNIOR, 2008; BERNUCCI *et al.*, 2008).

O resultado do ensaio de fadiga é expresso pela razão entre o número de solicitações (N) e o nível de tensões atuantes ( $\Delta\sigma$ ). A vida de fadiga é determinada através da Equação 8 (BERNUCCI *et al.*, 2008; RIBEIRO e SOUZA, 2010).

$$N = k \times \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (8)$$

Em que:

$N$  - número de aplicações de carga necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

$\Delta\sigma$  – diferença de entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro do corpo de prova (MPa);

$k, n$  – constantes obtidas na regressão linear dos pares  $N$  e  $\Delta\sigma$  determinados em ensaios, em escalas logarítmicas.

A diferença de tensões  $\Delta\sigma$  é calculada através da Equação 9 (RIBEIRO e SOUZA, 2010).

$$\Delta\sigma = \frac{8 \times F_v}{100 \times \pi \times D_{CP} \times h_{CP}} \quad (9)$$

Em que:

$F_v$  – força vertical aplicada (N);

$D_{CP}$  – diâmetro do corpo de prova (cm);

$h_{CP}$  – altura do corpo de prova (cm).

## **Capítulo 3 – MÉTODO DE TRABALHO**

### **3.1 Materiais utilizados**

Os materiais utilizados na pesquisa são: agregados naturais, de origem granítica, Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) convencional e modificado por polímero, resíduos de plásticos e cal. Os agregados naturais obtidos foram: brita 3/4”, brita 1/2” e brita 3/8”, como agregado graúdo; e pó de pedra, como agregado miúdo. A cal, além de ser um material de enchimento, é utilizada como agente melhorador de adesividade. O CAP convencional utilizado foi o 50/70 e o Asfalto Modificado por Polímero (AMP) foi o 55/75-E, classificados, respectivamente, conforme as especificações DNIT – EM 095/2006 (DNIT, 2006) e DNIT – EM 129/2011 (DNIT, 2011). 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 AMP 55/75-E foi fornecido por uma empresa atuante no setor de produtos asfálticos sediada no estado da Bahia.

O plástico utilizado foi o PET, obtido a partir da trituração de garrafas plásticas diversas, na forma de granulado. As amostras de PET granulado (ou simplesmente pélete) foram cedidas por uma indústria, localizada no município de Alhandra/PB, que recicla esse material e, após ser processado, transforma-o em matéria prima para a fabricação de fibras de poliéster, resinas, telhas, cordas, entre outras aplicações.

### **3.2 Caracterização dos materiais**

#### **3.2.1 Análise granulométrica**

A análise granulométrica foi realizada através de peneiramento para os agregados e a cal. O ensaio foi realizado conforme a especificação DNER-ME 083/98 (DNIT, 1998). Tendo como princípio determinar as dimensões das partículas e as proporções relativas em que elas se encontram, este ensaio é fundamental para determinar as proporções de cada material na composição da mistura asfáltica.

#### **3.2.2 Abrasão *Los Angeles***

A resistência à abrasão dos agregados, quando sujeitos ao processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos e durante a ação do tráfego, foi avaliada pelo ensaio de abrasão *Los Angeles*, que foi executado segundo a DNER-ME 035/98 (DNIT, 1998). O ensaio consiste em adicionar uma amostra inicial de agregado, juntamente com um determinado número de esferas, quantidade essa dependente da graduação da amostra,

no interior de um cilindro de um equipamento padronizado. A Figura 16 mostra o equipamento utilizado no ensaio de abrasão.

Figura 16 - Máquina *Los Angeles*



Fonte: Do autor (2016)

A amostra é então submetida a um determinado número de revoluções. Em seguida, retira-se a amostra do referido cilindro e determina-se a abrasão *Los Angeles* através da equação 10.

$$A = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (10)$$

Em que:

$A$ : valor da abrasão *Los Angeles*, em [%];

$m_i$ : massa total da amostra seca que é inicialmente adicionada no equipamento, em [g];

$m_f$  : massa da amostra lavada na peneira de 1,7mm e seca, após ser retirada do equipamento, em [g].

### 3.2.3 Absorção e densidade do agregado gráúdo

A absorção e a densidade dos agregados gráúdos foram determinadas de acordo com a especificação DNER-ME 081/98 (DNIT, 1998). Esses parâmetros são

determinados a partir de três determinações de massa: seca, na condição saturada com superfície seca e submersa. A densidade real é obtida através da Equação 11.

$$Dr = \frac{Ms}{Ms - L} \quad (11)$$

Em que:

$Dr$ : valor da densidade real;

$Ms$ : massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em [g];

$L$ : massa submersa do agregado, em [g].

Para o cálculo da densidade aparente usa-se a Equação 12.

$$Dap = \frac{Ms}{Mh - L} \quad (12)$$

Em que:

$D_{ap}$ : valor da densidade aparente;

$M_s$ : massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em [g];

$M_h$ : massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em [g];

$L$ : massa submersa do agregado, em [g].

Por último, determina-se o valor de absorção do agregado através da equação 13.

$$a = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 \quad (13)$$

Em que:

$a$ : valor da absorção, em [%];

$M_s$ : massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em [g];

$M_h$ : massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em [g].

### 3.2.4 Massa específica real

A massa específica do pó de pedra foi determinada segundo o método de ensaio DNER-ME 194/98 (DNIT, 1998), que faz uso do frasco Chapman. Segundo este método de ensaio, introduz-se 500g do material que se deseja obter a massa específica real no referido frasco preenchido com 200cm<sup>3</sup> de água. Em seguida faz-se a leitura atingida no gargalo do frasco, a qual representa o volume ocupado pelo conjunto água mais material ensaiado. A massa específica é calculada através da Equação 14.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (14)$$

Em que:

$\gamma$ : massa específica, em [g/cm<sup>3</sup>];

$L$ : leitura no frasco.

Para a determinação da massa específica da cal usou-se o método de ensaio DNER-ME 084/95 (DNIT, 1995), com a denominação de densidade real. Da mesma forma que para os agregados graúdos, a determinação da densidade da cal é dada pela determinação de massas, cujos valores obtidos são lançados na Equação 15.

$$D = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)} \quad (15)$$

Em que:

$D$ : densidade real do agregado miúdo;

$a$ : massa do picnômetro vazio e seco, em [g];

$b$ : massa do picnômetro mais amostra de agregado, em [g];

$c$ : massa do picnômetro mais amostra de agregado mais água, em [g];

$d$ : massa do picnômetro mais água, em [g].

Para o PET foi adotado o valor de 1,35g/cm<sup>3</sup> para massa específica real, valor este obtido dos trabalhos de Moghaddam, Karim e Syammaun (2012) e Moghaddam, Mohamed e Karim (2014).

### 3.2.5 Viscosidade rotacional

Para os ligantes asfálticos utilizados nesta pesquisa foi realizado o ensaio de viscosidade rotacional conforme a especificação NBR 15184 (ABNT, 2005). Neste ensaio é possível determinar a relação entre viscosidade e temperatura numa ampla faixa de valores utilizando uma única amostra. A Figura 17 mostra o equipamento utilizado para a determinação da viscosidade rotacional.

Figura 17 - Viscosímetro rotacional



Fonte: Do autor (2016)

A viscosidade é determinada através do comportamento do fluido frente a diferentes taxas de cisalhamento, obtidas pela rotação de uma haste mergulhada na amostra em teste. O tipo de haste utilizada depende do material a ser ensaiado. Neste trabalho foi utilizado a haste SC4-21.

### 3.3 Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico

O teor de projeto de ligante asfáltico foi determinado pelo método de dosagem Marshall. Após a definição da faixa granulométrica e a definição das proporções de cada material constituinte das misturas propostas, corpos de prova foram moldados para determinação dos parâmetros volumétricos, especialmente massa específica aparente e



volume de vazios, e realização de ensaios de desgaste Cântabro e resistência à tração indireta.

O teor de projeto de ligante asfáltico para cada mistura foi determinado pela média aritmética dos teores correspondentes ao Volume de vazios de 21,5%, desgaste cântabro mínimo e resistência à tração indireta máxima, de modo a atender as exigências da DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999) para misturas asfálticas porosas. Uma vez determinado o teor de ligante conforme descrito acima, foi verificado se o valor inicialmente encontrado atendia as exigências, quanto aos parâmetros considerados, a partir das respectivas curvas parâmetro *versus* teor de ligante asfáltico. Em caso contrário, ajuste era feito de maneira que o teor de ligante escolhido representasse, simultaneamente, o melhor desempenho da mistura quanto ao Volume de vazios, desgaste cântabro e resistência à tração indireta.

### 3.3.1 Definição das faixas granulométricas

Foi adotada a faixa granulométrica I para CPA, segundo a especificação DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999). A quantidade de cada material constituinte da mistura foi determinada com o auxílio de planilha eletrônica, de forma que a mistura resultante se enquadrasse na faixa granulométrica selecionada. A Figura 18 mostra a planilha eletrônica utilizada para a composição da mistura.

Figura 18 - Planilha eletrônica utilizada para composição das misturas

Origem do agregado:		Natural/Granítico		Especificação:		DNIT 386/1999		Aplicação:		Revestimento/CPA		Faixa:		I							
Peneiras		Porcentagem Passante										Resultados	Situação								
		Especificação			Limites		Materiais Disponíveis														
		Limites	Média	Tolerância	Superior	Inferior	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra	-	Cal										
50,8	2"	100	100	100	7	100	93	100,0	100,0	100,00		100,00	100	Condição Atendida							
38,1	11/2"	100	100	100	7	100	93	100,0	100,0	100,00		100,00	100	Condição Atendida							
19,1	3/4"	100	100	100	7	100	93	99,1	100,0	100,00		100,00	100	Condição Atendida							
12,5	1/2"	100	100	100	7	100	93	57,0	100,0	100,00		100,00	97	Condição Atendida							
9,5	3/8"	80	100	90	7	100	73	19,4	96,1	100,00		100,00	90	Condição Atendida							
4,8	Nº 4	20	40	30	5	45	15	0,8	15,1	96,60		100,00	24	Condição Atendida							
2	Nº 10	12	20	16	5	25	7	0,5	4,0	66,10		100,00	13	Condição Atendida							
0,42	Nº 40	8	14	11	5	19	3	0,4	1,9	33,90		99,95	9	Condição Atendida							
0,18	Nº 80	4	6	5	3	9	1	0,4	1,3	18,00		99,50	7	Condição Atendida							
0,07	Nº 200	3	5	4	2	7	1	0,2	0,7	3,80		70,69	4	Condição Atendida							
Proporções adotadas para cada material (%):												8		80	7	0	5	Soma das diferenças:		18	

Fonte: Do autor (2016)

Foram propostas duas composições de misturas. A primeira delas composta de brita 3/4", brita 3/8", pó de pedra, cal, ligante asfáltico CAP 50/70 e foi aditivada com resíduos de PET. Em outra composição de mistura, a fração brita 3/8" foi substituída pela fração brita 1/2" e o ligante utilizado foi AMP 55/75-E, tendo em vista que a especificação DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999) enfatiza a utilização de ligante asfáltico modificado por polímero em misturas asfálticas porosas. Essa mistura foi utilizada como referência.

### 3.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados seguindo as orientações da metodologia Marshall, a qual faz uso de compactação por impacto. Nesta metodologia, preconizada pela DNER – ME 043/95 (DNIT, 1995), cinco grupos de corpo de prova são moldados, cada qual com um teor de CAP. Cada grupo desses deve apresentar um mínimo de três amostras, resultando num total de 15 corpos de prova para cada ensaio Marshall.

Para a moldagem dos corpos de prova, se faz necessário determinar as temperaturas de mistura e de compactação para o ligante escolhido a partir da curva viscosidade-temperatura do mesmo. De acordo com a especificação DNER – ME 043/95 (DNIT, 1995), o ligante deve ser aquecido a uma temperatura, para ser misturado aos agregados, na qual apresente viscosidade de  $170 \pm 20$  centipoise (cP). A temperatura de compactação da mistura, segundo a mesma especificação, é aquela na qual o ligante apresenta viscosidade de  $280 \pm 30$  centipoise (cP). Bernucci *et al.* (2008) acrescentam que 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 definida para o ligante, sem ultrapassar 177°C.

Após os materiais atingirem a temperatura adequada, foi iniciado o processo de homogeneização da mistura, que foi então colocada no molde e iniciado o processo de compactação por impacto com aplicação de 50 golpes por face do corpo de prova. As misturas asfálticas foram aditivadas com PET nas proporções de 0, 0,33, 0,50, 0,75, e 1%, em relação ao peso dos agregados, via processo seco, seguindo a orientação de Ahmadinia *et al.* (2012), que adicionaram o PET após o ligante ser adicionado aos agregados. Assim, após o ligante ser adicionado aos agregados e a cal, foi feita uma primeira homogeneização da mistura, em seguida, o PET foi adicionado e realizada uma nova homogeneização. A Figura 19 mostra o procedimento de preparo das misturas asfálticas aditivadas com PET.

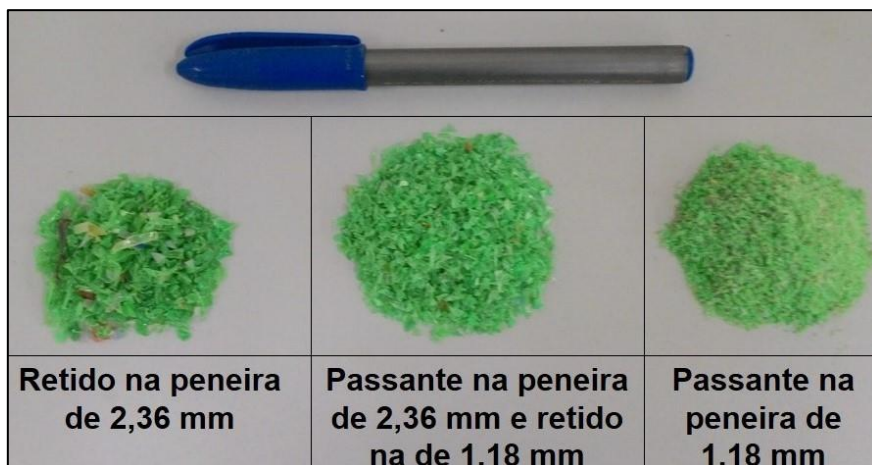
Figura 19 - Preparo das misturas asfálticas aditivadas com PET



Fonte: Do autor (2016)

O PET granulado obtido passou por um tratamento antes de ser utilizado como aditivo nas misturas asfálticas, de maneira de evitar que materiais indesejados fossem incorporados às misturas e de garantir um material mais uniforme. Desse modo, foi realizado um peneiramento com as peneiras de abertura de 2,36 e de 1,18mm, onde o PET utilizado foi o passante naquela peneira e retido nesta. A Figura 20 mostra o material obtido após o peneiramento.

Figura 20 - PET granulado após peneiramento.



Fonte: Do autor (2016)

Os trabalhos de Moghaddam *et al.* (2012) e Rahman e Wahab (2013) foram as referências utilizadas na determinação do tamanho do PET utilizado como aditivos nas misturas asfálticas. O PET foi submetido a mesma temperatura de aquecimento dos agregados no processo de moldagem dos corpos de prova.

### 3.3.3 Determinação do Volume de vazios (Vv)

Após a moldagem, os corpos de prova foram deixados em repouso por um período de aproximadamente vinte e quatro horas à temperatura ambiente, em seguida foram extraídos dos cilindros e medidas as alturas e os diâmetros com paquímetro. Na sequência, foram determinadas, para cada corpo de prova, sua massa seca e submersa em água, para o cálculo da massa específica aparente ( $G_{mb}$ ), de acordo com a DNER – ME 117/94 (DNIT, 1995). Neste trabalho, porém, foi utilizado filme de PVC ao invés de fita adesiva e parafina para envolver os corpos de prova. A massa específica aparente dos corpos de prova foi calculada de acordo com a Equação 16.

$$G_{mb} = \frac{Ms}{Ms - (Ms_{sub} - (Ms_p - Ms))} \quad (16)$$

Em que:

$G_{mb}$ : massa específica aparente do corpo de prova, em [g/cm<sup>3</sup>];

$Ms$ : massa seca do corpo de prova pesado ao ar, em [g];

$Ms_{sub}$ : massa submersa em água do corpo de prova envolto no papel filme, em [g];

$Ms_p$ : massa seca do corpo de prova envolto no papel filme pesado ao ar, em [g].

Com os valores das massas específicas aparentes dos corpos de prova, calculou-se o Volume de vazios das misturas, através da comparação destes resultados com a massa específica máxima teórica, denominada Densidade Máxima Teórica (DMT). A DMT é calculada pela ponderação das massas específicas reais dos materiais que compõem a mistura asfáltica, conforme a Equação 17.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f} + \frac{\%PET}{G_{PET}}} \quad (17)$$

Em que:

$DMT$ : massa específica máxima teórica, em [g/cm<sup>3</sup>];

%a: porcentagem de ligante asfáltico;

%A<sub>g</sub>, %A<sub>m</sub>, %f, %PET: porcentagens do agregado graúdo, agregado miúdo, fíler e PET, respectivamente;

G<sub>a</sub>, G<sub>Ag</sub>, G<sub>Am</sub>, G<sub>f</sub>, G<sub>PET</sub>: massa específicas reais do ligante asfáltico, do agregado graúdo, do agregado miúdo, do fíler e do PET, respectivamente.

O volume de vazios é a relação entre o volume de vazios permeáveis ao ar e o volume total da mistura. Em se tratando de misturas porosas este é um dos principais parâmetros a ser considerado na dosagem, pois se relaciona com a permeabilidade da mistura. Para o cálculo do volume de vazios, e dos demais parâmetros volumétricos, faz-se uso das Equações de 18 a 21.

$$V_v = \frac{DMT - Gmb}{DMT} \quad (18)$$

$$VCB = \frac{Gmb \times \%a}{G_a} \quad (19)$$

$$VAM = V_v + VCB \quad (20)$$

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (21)$$

Em que:

V<sub>v</sub>: volume de vazios, em [%];

VCB: vazios com betume, em [%];

VAM: vazios do agregado mineral, em [%];

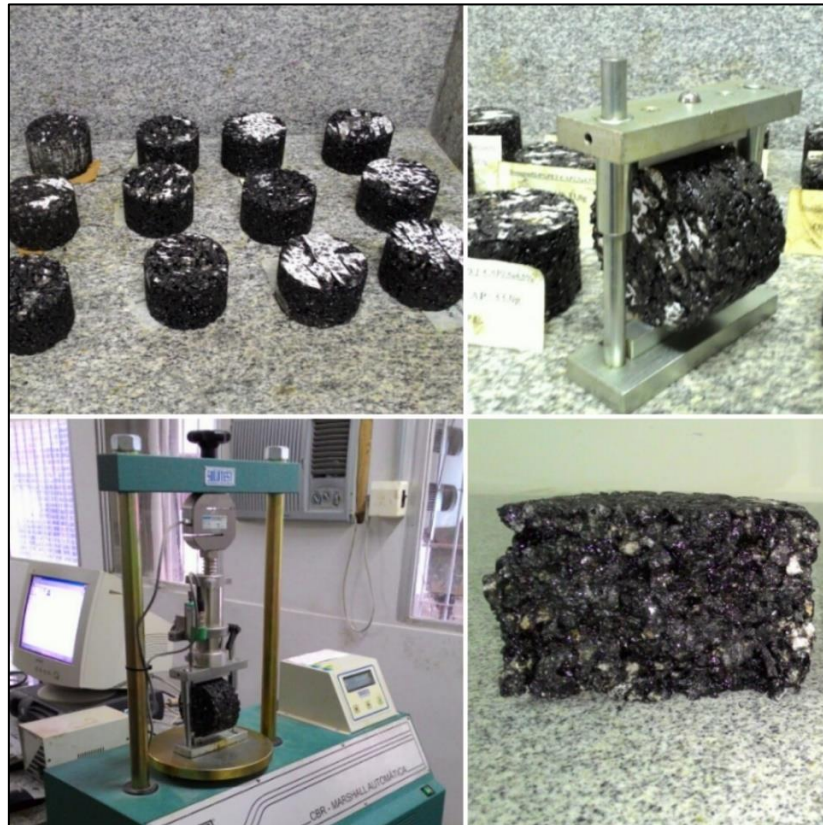
RBV: relação betume/vazios, em [%].

### 3.3.4 Resistência à Tração indireta (RT)

O ensaio de Resistência à Tração indireta (RT), ou resistência à tração por compressão diametral, foi realizado de acordo com a especificação DNIT – ME 136/2010 (DNIT, 2010). O ensaio consiste na aplicação de uma carga progressiva aplicada ao longo

do diâmetro do corpo de prova através de frisos metálicos estreitos, o que resulta em compressão no plano da direção de aplicação da carga e tração no plano perpendicular a este. A Figura 21 mostra o ensaio de resistência à tração indireta.

Figura 21 – Ensaio de resistência à tração indireta



Fonte: Do autor (2016)

Após determinação da altura e do diâmetro e condicionamento a  $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$  por um período de aproximadamente duas horas, os corpos de prova são colocados entre os frisos e submetidos a carga progressiva até atingirem a ruptura. Com os valores obtidos calcula-se a RT através da Equação 22.

$$\sigma_R = \frac{2 \times F}{10,19 \times \pi \times D \times H} \quad (22)$$

Em que:

$\sigma_R$ : resistência à tração, em [MPa];

$F$ : carga de ruptura, em [Kgf];

$D$ : diâmetro do corpo de prova, em [cm];

$H$ : altura do corpo de prova, em [cm].



### 3.3.5 Ensaio Cântabro

O ensaio Cântabro foi idealizado na Espanha tendo como objetivo avaliar a perda progressiva de agregados de revestimentos asfálticos, denominado desgaste, resultante do atrito entre pneu e pavimento. De execução relativamente simples, este ensaio é normatizado no Brasil pela DNER – ME 383/99 (DNIT, 1999) e faz uso da máquina *Los Angeles*. A Figura 22 mostra o ensaio Cântabro.

Figura 22 - Ensaio Cântabro



Fonte: Do autor (2016)

De início, os corpos de prova são pesados, após, são colocados na máquina *Los Angeles*, sem as esferas de aço, e submetida a 300 revoluções a uma velocidade de 30 a 33rpm, à temperatura de 25°C. Por último, retira-se o corpo de prova da máquina, pesando-o e anotando os respectivos pesos. O desgaste Cântabro é calculado pela equação 23.

$$D = \left( \frac{M - M'}{M} \right) \times 100 \quad (23)$$

Em que:

$D$ : desgaste cântabro, em [%];

$M$ : massa do corpo de prova antes do ensaio;

$M'$ : massa do corpo de prova após o ensaio.

### 3.4 Ensaios realizados a partir da determinação do teor de projeto de ligante asfáltico

#### 3.4.1 Escorrimento de ligante asfáltico em misturas asfálticas não compactadas

O ensaio de escorrimento, ou gotejamento, do ligante asfáltico é realizado com misturas asfálticas não compactadas e visa determinar a quantidade de ligante ou mástique asfáltico que se desagrega da mistura em elevadas temperaturas. A Figura 23 mostra a execução do ensaio de escorrimento.

Figura 23 - Ensaio de escorrimento



Fonte: Do autor (2016)

Uma vez preparada, a mistura é colocada num cesto de malha de 6,3mm e o conjunto (cesto com mistura) é levado a estufa a temperatura de 15°C acima da temperatura de mistura, onde permanecerá por um período de uma hora. Neste trabalho, após amostra e cesto serem colocados na estufa, foi esperado que o conjunto atingisse a temperatura de ensaio e em seguida iniciada a contagem do tempo, de modo a garantir



que, durante todo o período de ensaio, a mistura permanecesse exposta a temperatura requerida.

Normatizado pela AASHTO T-305/97, o escorrimento é dado pela relação entre as massas do material retido no papel filtro após realização do ensaio e da massa asfáltica ensaiada.

### **3.4.2 Dano por umidade induzida**

O ensaio de dano por umidade induzida visa determinar o desempenho de uma mistura asfáltica frente aos efeitos deletérios da umidade, que seria, na concepção de Pinheiro (2004), a capacidade da mistura asfáltica de manter sua resistência à tração após a ação deletéria da água em ciclos de temperaturas intermediárias e baixas. Para Bernucci *et al.* (2008), o dano por umidade evidencia possíveis problemas de adesividade entre agregado e ligante asfáltico.

O procedimento para realização do ensaio é ditado pela especificação AASHTO T 283 (1989). O desempenho é então avaliado pela resistência à tração retida por umidade induzida, que é a relação de resistência à tração de um grupo de corpos de prova sujeitos a um condicionamento e um segundo conjunto de corpos de prova não condicionados. A Figura 24 mostra as etapas do condicionamento dos corpos de prova para determinação da resistência à tração.

Figura 24 - Etapas do condicionamento dos corpos de prova para determinação da resistência à tração para avaliação do dano por umidade induzida



Fonte: Do autor (2016)

O condicionamento dos corpos de prova inicia-se pela saturação, através de aplicação de uma pressão de 87,8KPa por um período de dez minutos. Imediatamente após a saturação, os corpos de prova são envolvidos em filme plásticos e colocados dentro de saco plástico, juntamente com 10ml de água destilada adicionada, vedando-o; em seguida, são levados ao *freezer* à aproximadamente 10°C, onde devem permanecer por um período mínimo de 16 horas. Após a retirada do *freezer*, os corpos de prova são colocados em banho de água a 60°C durante 24 horas. Em seguida, são colocados noutro banho de água à 25°C durante 2 horas. Por último, é realizado o ensaio de resistência à tração. Para o conjunto de corpos de prova não condicionados é realizada apenas os dois últimos procedimentos das etapas de condicionamento descritas anteriormente: imersão em banho de água à 25°C durante 2 horas e ensaio de resistência à tração.

É oportuno destacar que neste trabalho houve duas variações em relação ao procedimento de condicionamento normalmente empregado para o ensaio de dano por umidade induzida. A primeira delas, se refere a temperatura de congelamento, que, pela indisponibilidade de equipamento capacitado para atingir a temperatura de 18 °C negativos sugeridos pela especificação AASHTO T 283 (1989), foi de aproximadamente 10°C, conforme já citado.

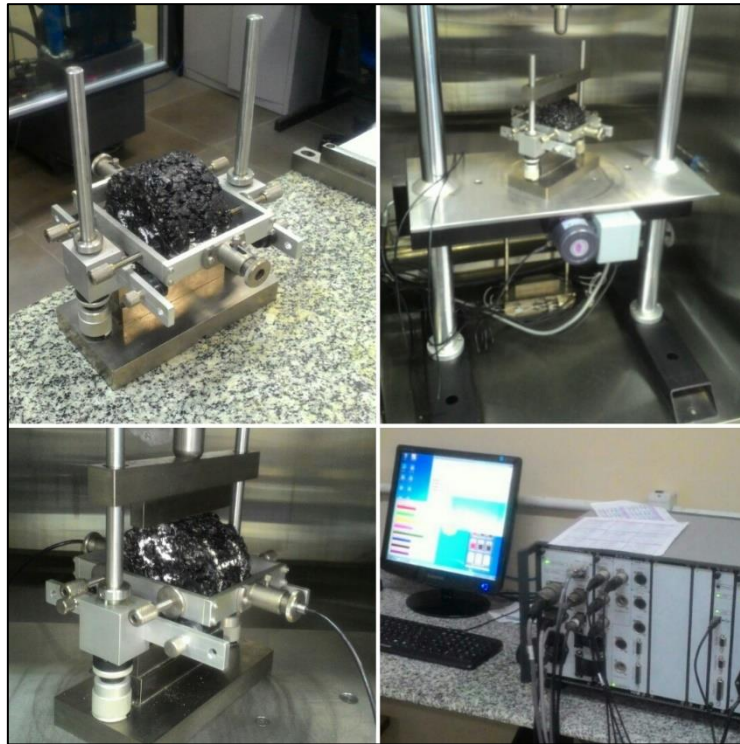
A segunda variação foi com relação ao volume de vazios dos corpos de prova moldados para o ensaio. Normalmente, o ensaio é realizado com corpos de prova que apresentam volume de vazios de  $7\pm 0,5\%$  de misturas asfálticas de graduação densa ou ainda de SMA. Porém, no presente trabalho, não houve alteração na faixa do volume de vazios, visto que isso implicaria numa alteração significativa na faixa granulométrica, o que descaracterizaria as misturas aqui estudadas.

### **3.4.3 Módulo de Resiliência (MR)**

Resiliência é definida como sendo a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões responsáveis pelas deformações, e corresponde à energia potencial de deformação. O termo é análogo a elasticidade, usado para sólidos elásticos como concreto, aço e etc., sendo seu uso preferível quando se tratar de materiais usados em camadas de pavimentos, pois nestas estruturas os deslocamentos verificados são bem maiores em relação às estruturas constituídas dos sólidos elástico anteriormente citados (MEDINA e MOTTA, 2015).

O Módulo de Resiliência (MR) é, portanto, o parâmetro que explica o comportamento tensão-deformação de uma estrutura de pavimento (CEZARO JUNIOR, 2008). O módulo de resiliência das misturas asfálticas foi determinado através de ensaio de compressão diametral de cargas repetidas, de acordo com a NBR 16018 (ABNT, 2011). A Figura 25 mostra o arranjo e o equipamento para a realização do ensaio de compressão diametral de carga repetida para determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas.

Figura 25 - Arranjo e equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida para determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas



Fonte: Do autor (2016)

A carga aplicada, distribuída em frisos metálicos estritos, causa compressão na vertical e tração na horizontal (MEDINA e MOTTA, 2015). Os deslocamentos horizontais recuperáveis são obtidos através dos LVDTs (*linear variable differential transformes*) e calculado o módulo de resiliência por meio da Equação 24.

$$MR = \frac{F}{\Delta \times H} \times (0,9976\mu + 0,2692) \quad (24)$$

Em que

$MR$ : módulo de resiliência, em [MPa];

$F$ : carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, em [N];

$\Delta$ : deslocamento elástico ou resiliente registrado, em [mm];

$H$ : altura do corpo de prova, em [mm];

$\mu$ : coeficiente de Poisson.

O nível de carregamento adotado foi equivalente a 10% da resistência à tração de cada mistura. O ensaio foi realizado a temperatura de 25°C; o coeficiente de Poisson foi de 0,3.

#### **3.4.4 Ensaio de deformação permanente – *Creep* Dinâmico – Determinação do *flow number***

Neste trabalho, o comportamento das misturas asfálticas frente à deformação permanente foi avaliado através da determinação do FN. Para tanto, foram utilizados corpos de prova Marshall convencionais, os quais foram condicionados por um período de duas horas antes da realização do ensaio. A Figura 26 mostra a execução do ensaio *creep* dinâmico para determinação do FN.

Figura 26 - Ensaio *creep* dinâmico - determinação do *Flow Number* (FN)



Fonte: Do autor (2016)

O ensaio foi realizado a 60°C, sem confinamento do corpo de prova, com uma carga axial de 206,8 KPa. Os critérios de parada foram 10.000 ciclos ou 30.000  $\mu\epsilon$  (*micro strain*), conforme Zhang *et al.* (2013).

### 3.4.5 Vida de Fadiga

No presente trabalho, o ensaio de fadiga foi realizado com corpos de prova Marshall a temperatura de 25°C, os quais foram ensaiados no mesmo equipamento utilizado no ensaio de módulo de resiliência. Para determinação das curvas de fadiga, cada ensaio foi realizado com três diferentes níveis de tensão: 20, 30 e 40% da RT para as misturas asfálticas com ligante asfáltico convencional e modificadas com PET; e 30, 40 e 50% para as misturas com asfalto modificado por polímero, tendo em vista o longo tempo que levaria para o rompimento por fadiga para estas misturas, caso fossem ensaiadas com um nível de tensão de 20% da RT, conforme foram as misturas com asfalto convencional.

### 3.4.6 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado com o objetivo de determinar o coeficiente de permeabilidade das misturas asfálticas e utilizá-lo como parâmetro de funcionalidade no que diz respeito a capacidade de drenar a água precipitada sobre a superfície do pavimento. O ensaio foi realizado de acordo com a especificação “*Florida Method of Test for Measurement of Water Permeability of Compacted Asphalt Paving Mixtures*”, denominada FM 5-565, do ano de 2014. A Figura 27 mostra o permeâmetro utilizado no ensaio de permeabilidade.

Figura 27 - Permeâmetro para determinação da permeabilidade de misturas asfálticas



Fonte: Do autor (2016)



A FM 5-565 determina que a amostra a ser ensaiada, que pode ser extraída do campo ou moldada em laboratório, deve apresentar um diâmetro mínimo de 144mm. Como as misturas foram moldadas pela metodologia Marshall, onde o corpo de prova convencional apresenta um diâmetro de aproximadamente 100mm, foi necessário fabricar novos moldes e os aparatos necessários para que fossem moldados corpos de provas conforme a necessidade do ensaio de permeabilidade. A Figura 28 mostra o molde e demais aparatos utilizados para moldagem do corpo de prova com diâmetro superior 144mm para o ensaio de permeabilidade.

Figura 28 - Aparatos para moldagem dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade



Fonte: Do autor (2016)

Para garantir que o corpo de prova utilizado no ensaio de permeabilidade apresentasse as mesmas características, em termos de densidade, que o corpo de prova Marshall convencional, foi necessário estabelecer, também, uma nova energia de compactação, de modo que ao final os corpos de prova com dimensões maiores apresentassem a mesma massa específica aparente que os convencionais. Para tanto, foi utilizado o conceito de energia por unidade de volume, conforme Roseno (2005), expresso pela equação 25.

$$E_{CPM} = \frac{N_C \times N_G \times M_{SG} \times g \times H_Q}{V_{CPM}} \quad (25)$$

Em que:

$E_{CPM}$  - energia específica aplicada ao corpo-de-prova Marshall (J/cm<sup>3</sup>);

$N_C$  - número de camadas (1 camada);

$N_G$  - número de golpes em cada face (50 golpes);

$M_{SQ}$  - massa do soquete (4,54Kg);

$g$  – aceleração da gravidade local (9,81m/s<sup>2</sup>);

$H_Q$  - altura de queda do soquete (0,4572 m);

$V_{CPM}$  - volume do corpo de prova Marshall (cm<sup>3</sup>).

Substituindo os valores na Equação 14 e considerando o volume médio dos corpos de prova moldados nos teores de projeto para cada mistura determina-se a energia por unidade de volume. De posse deste valor, determina-se o número de golpes para moldar o novo corpo de prova através da Equação 26.

$$N_G = \frac{E_{CPM} \times V_{CP}}{N_C \times M_{SQ} \times g \times H_Q}$$

(26)

Em que:

$V_{CP}$  – volume do novo corpo de prova, em cm<sup>3</sup>, pré-estabelecido com base no volume de um cilindro (altura: 63,5mm, diâmetro: 150mm).

A Figura 29 mostra a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade.

Figura 29 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade





Fonte: Do autor (2016)

Após serem moldados, os corpos de prova foram submetidos a mesma metodologia que os corpos de prova convencionais para determinação das densidades aparentes e volume de vazios. Uma vez verificado que os corpos de prova apresentavam a mesma faixa de volume de vazios foi realizado o ensaio de permeabilidade a carga variável e determinado o coeficiente de permeabilidade para as misturas asfálticas através da equação 4, de acordo com a especificação FM 5-565, do ano de 2014.

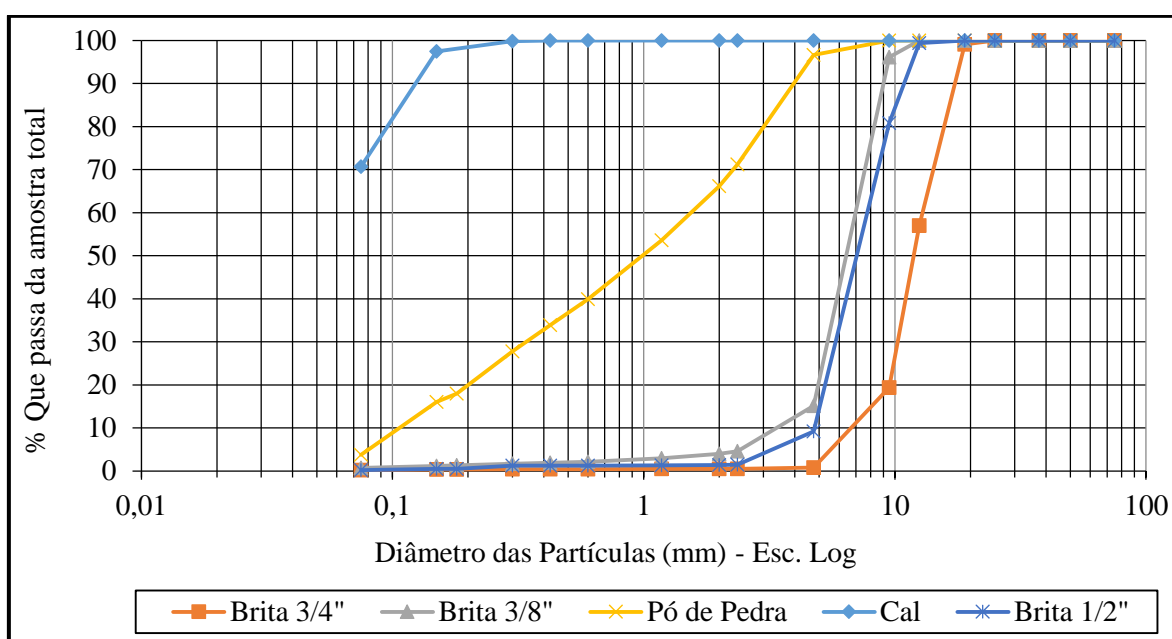
## Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização dos materiais

#### 4.1.1 Análise granulométrica

Os ensaios de caracterização realizados para os agregados e para a cal foram granulometria e massa específica; além de abrasão Los Angeles para o agregado graúdo. O ensaio de granulometria foi realizado conforme DNER-ME 083/98 (DNIT, 1998). A Figura 30 mostra as curvas granulométricas obtidas para os agregados e para a cal.

Figura 30 - Curvas granulométricas obtidas para os agregados e para a cal



Fonte: Do autor (2016)

Conforme mostra a Figura 30, verifica-se a uniformidade das curvas das britas 3/4", 1/2" e 3/8", enquanto o pó de pedra apresenta uma curva mais contínua. Para a cal, nota-se a presença de partículas finamente divididas, com um percentual passante na peneira nº 200 de pouco mais de 70%.

#### 4.1.2 Absorção e densidade e Abrasão *Los Angeles* do agregado graúdo

Para os agregados graúdos, foram realizados ensaios de densidade e absorção e abrasão Los Angeles (para a fração brita 3/4"), de acordo com as especificações DNER-ME 081/98 (DNIT, 1998) e DNER-ME 035/98 (DNIT, 1998), respectivamente. A Tabela 1 mostra os valores obtidos.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de densidade e absorção e abrasão Los Angeles para os agregados graúdos

Agregado graúdo	Absorção (%)	Densidade aparente	Densidade real	Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)
Brita 3/4"	0,7	2,754	2,812	40,4
Brita 1/2"	0,7	2,719	2,768	-
Brita 3/8"	1,1	2,733	2,815	-

Fonte: Do autor (2016)

A norma DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999) determina um valor de abrasão Los Angeles máximo de 30% para agregados graúdos a serem usados em CPA. Embora os agregados utilizados nesta pesquisa não atendam esta condição, conforme mostra o resultado apresentado na Tabela 1, é possível utilizá-los, uma vez que são os mesmos utilizados em obras de pavimentação nas proximidades da grande João Pessoa. Além disso, aquela norma admite o uso de agregados com valor de abrasão Los Angeles superior a 30%, caso tenham apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior.

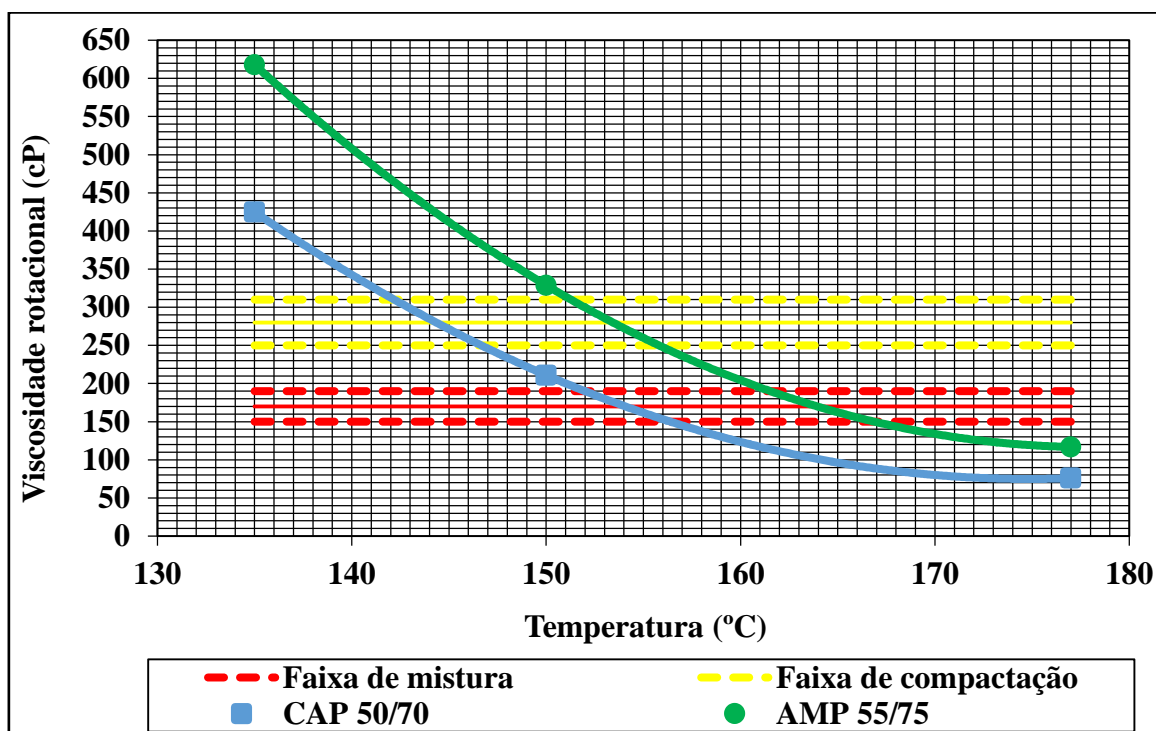
#### 4.1.3 Massa específica real

A massa específica real do pó de pedra foi determinada através do método de ensaio DNER-ME 194/98 (DNIT, 1998), obtendo um valor de 2,732 g/cm<sup>3</sup>. Já para a cal, o procedimento para determinação da massa específica real foi o DNER-ME 085/94 (DNIT, 1994) e o valor obtido foi 2,730 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.4 Viscosidade rotacional

Para os ligantes asfálticos foi determinada a viscosidade rotacional, de acordo com a especificação NBR 15184 (ABNT, 2005), no Laboratório de Engenharia de Pavimentos e Geotécnica (LEP) da Universidade Federal da Campina Grande (UFCG). A Figura 31 mostra o resultado do ensaio.

Figura 31 - Curva viscosidade *versus* temperatura para os ligantes asfálticos



Fonte: Do autor (2016)

Foi verificado que os ligantes asfálticos utilizados atenderam as respectivas normas quanto à viscosidade rotacional. Além disso, foram determinadas as temperaturas de mistura e compactação, que foram 155°C e 144°C, respectivamente, para o CAP 50/70 e 164 °C e 153°C, respectivamente para o AMP 55/75-E.

## 4.2 Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico

### 4.2.1 Definição das faixas granulométricas

Inicialmente foi realizada uma pré-dosagem para verificar se as misturas atenderiam a faixa de Volume de vazios de 18 a 25%, conforme determina DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999). A priori, foi sugerida a retirada do pó de pedra, visto que a presença dessa fração poderia contribuir significativamente para a redução dos vazios na mistura. Porém, a mistura inicialmente proposta, que se compunha de 5% de brita 3/4”, 90% de brita 3/8” e 5% de cal resultaram em corpos de prova demasiadamente altos, não sendo possível recolocá-los no compactador Marshall para receber os golpes restantes na outra face do corpo de prova, mesmo aumentando de 50 para 75 golpes por face. Essa dificuldade de compactação pode estar relacionada à grande quantidade de agregado graúdo na mistura, o que pode resultar num entrosamento dos grãos dificultando o processo de compactação.

Deste modo, em seguida, foram realizadas duas dosagens adotando-se 5 e 10% de pó de pedra, com teores de CAP 50/70 de 3 a 5% e 75 golpes por face do corpo de prova. Para as misturas com 5% de pó de pedra as dificuldades de compactação permaneceram, enquanto que as misturas com 10% apresentaram melhoras neste sentido, embora apenas os corpos de prova com teor de CAP de 3,0 e 3,5% atingiram valores de volume de vazios acima do mínimo (18%).

Em mais uma etapa de dosagem, foram adotadas misturas com valor intermediário de 7% de pó de pedra, sendo uma das com 3% de cal, ao invés dos 5% anteriormente utilizados. Nesta etapa, buscou-se reduzir ao máximo a perda de temperatura e utilizar apenas 50 golpes por face do corpo de prova. Porém, os corpos de prova só puderam ser compactados com 75 golpes por face. Mesmo com essa alteração na granulometria, apenas dois teores de CAP apresentaram volume de vazios acima do mínimo exigido. Além disso, a redução de cal também não resultou em aumento do volume de vazios.

Como alternativa, visando conseguir atingir a altura mínima necessária à compactação dos corpos de prova aplicando a quantidade de 50 golpes por face, reduziu-se a massa dos corpos de prova para 1.100 gramas, conforme Oliveira Filho (2007), Ahmadinia *et al.* (2011), Ahmadinia *et al.* (2012), Moghaddam, Karim e Syammaun (2012), Moghaddam e Karim (2012) e Moghaddam, Soltani e Karim (2014a; 2014b). Com essa alteração foram repetidas as moldadas das misturas com 7% e 10% de pó de pedra, ambas com 5% de cal. A Tabela 2 mostra os volumes de vazios obtidos nas dosagens realizadas.

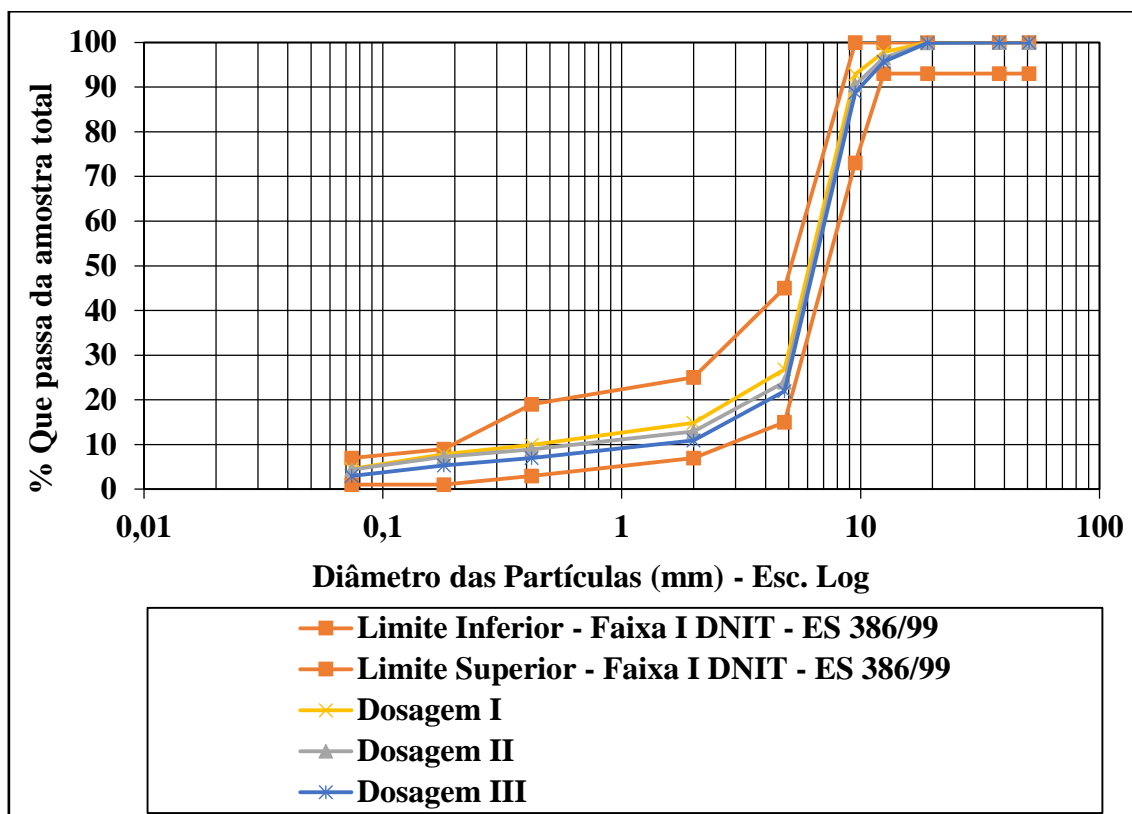
Tabela 2 - Volume de vazios em função do teor de CAP para cada mistura

Dosagem	Golpes por face	Composição (%)				Teor de CAP (%)				
		brita 3/4"	brita 3/8"	pó de pedra	Cal	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
						Volume de vazios (%)				
I	75	5	80	10	5	25,9	19,9	14,4	17,9	14,6
II	75	8	80	7	5	20,7	20,3	17,2	14,5	14,3
III	75	10	80	7	3	16,7	22,1	19,4	17,6	16,6
IV	50	8	80	7	5	21,8	19,2	17,3	13,2	16,8
V	50	5	80	10	5	21,7	20,3	17,3	14,9	12,5

Fonte: Do Autor (2016)

As curvas granulométricas testadas durante a fase de pré-dosagem, basicamente, sofreram alterações em função da quantidade de pó de pedra utilizado. As dosagens I e V foram realizadas com a mesma curva granulométrica, enquanto a dosagem IV foi realizada com a mesma curva da dosagem II. A Figura 32 mostra as curvas testadas na fase de pré-dosagem.

Figura 32 – Faixas granulométricas testadas na fase de pré-dosagem



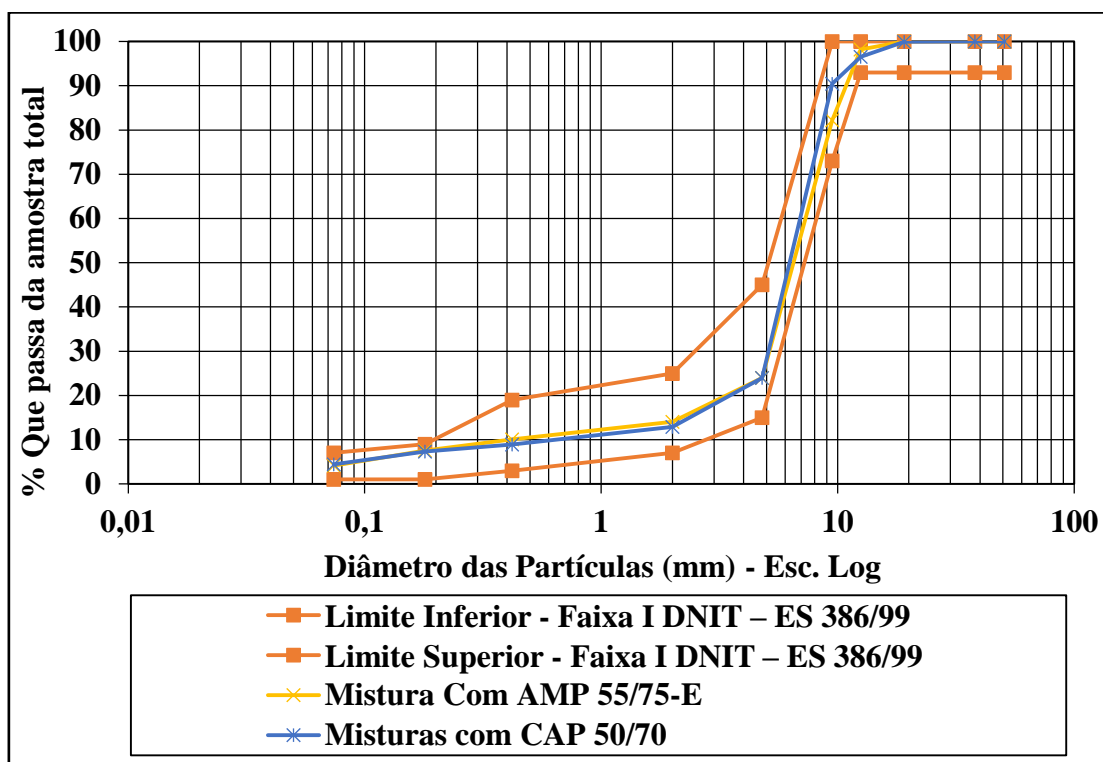
Fonte: Do autor (2016)

Como pode ser observado na Tabela 2, o aumento do teor de CAP tende a induzir uma redução no volume de vazios. Deste modo, a composição utilizada nas dosagens II e IV mostrou-se mais apropriada para atender o critério de volume de vazios, sendo então adotada para a faixa granulométrica das misturas com CAP 50/70.

Para determinar a faixa granulométrica da mistura com CAP modificado foi necessário fazer um ajuste na composição inicialmente adotada, visto que a fração 3/8" foi substituída pela fração 1/2" nesta mistura. Devido à grande quantidade de corpos de prova moldados durante a fase de dosagem das misturas com CAP convencional e aquela fração corresponder a maior parte da composição da mistura (80%), a quantidade de material coletado não foi suficiente para a realização de todos os ensaios propostos, desde a fase de caracterização até os ensaios realizados no teor de projeto de ligante asfáltico, para todas as seis misturas concebidas. Este ajuste foi feito de modo que a diferença entre

as misturas, em termos de faixa granulométrica, fosse a mínima possível, de modo a evitar possíveis diferenças no desempenho das misturas provenientes da alteração da faixa granulométrica. A Figura 33 mostra as faixas granulométricas das misturas estudadas.

Figura 33 - Faixas granulométricas utilizadas na pesquisa



Fonte: Do autor (2016)

As faixas granulométricas obtidas foram bastante próximas, onde apenas o ponto relativo a peneira de 9,5mm apresentou diferença significativa (8,2%) entre as duas faixas propostas. Esta diferença se deu pelo aumento da fração pó de pedra, de 7 para 12%, na faixa da mistura com asfalto modificado, que foi compensado na fração brita 3/4", permanecendo as demais frações sem alteração.

Para a dosagem das misturas foram utilizados teores de CAP 50/70 de 2,5 a 4,5% e 3,0 a 5,0 de AMP 55/75-E. Todos os corpos de prova foram compactados por impacto com 50 golpes por face. A Tabela 3 mostra as misturas estudadas e suas respectivas composições, quantidade de PET utilizada, tipo e teores de ligante asfáltico utilizados na determinação do teor de projeto.

Tabela 3 – Misturas asfálticas estudadas

Mistura	Golpes por face	Composição (%)					PET (%)	Ligante asfáltico	
		brita 3/4"	brita 1/2"	brita 3/8"	pó de pedra	Cal		Tipo	Teor (%)
0,00%PET- CAP50/70	50	8	0	80	7	5	0,00		
0,33%PET- CAP50/70		8	0	80	7	5	0,33		
0,50%PET- CAP50/70		8	0	80	7	5	0,50	CAP 50/70	2,5 a 4,5
0,75%PET- CAP50/70		8	0	80	7	5	0,75		
1,00%PET- CAP50/70		8	0	80	7	5	1,00		
0,00%PET- AMP55/75		3	80	0	12	5	0,00	AMP 55/75 - E	3,0 a 5,0

Fonte: Do autor (2016)

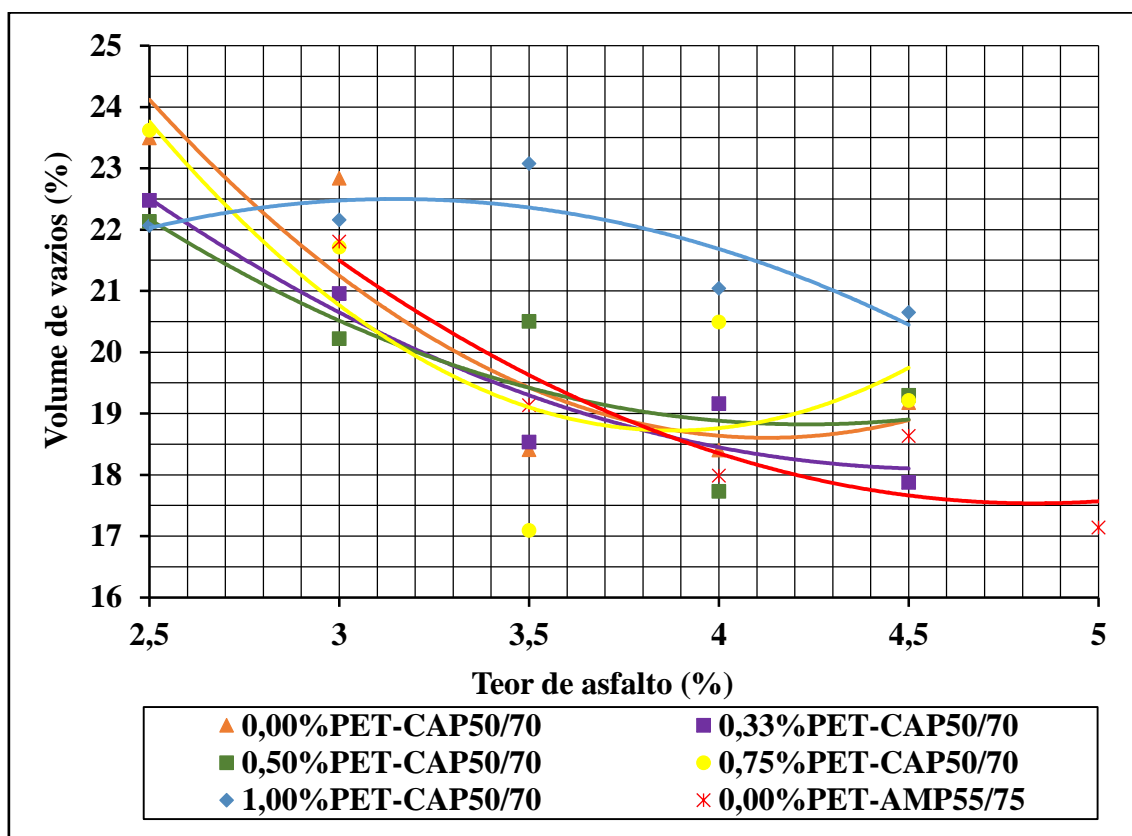
Após ser realizada as dosagens das misturas com CAP 50/70, verificou-se que os corpos de prova com teor de ligante de 2,5% apresentavam-se com pouco ligante e propensos a desagregação, o que motivou na dosagem da mistura com AMP 55/75-E utilizar 3,0% como teor mínimo desse ligante asfáltico.

#### 4.2.2 Determinação do Volume de vazios (Vv)

O volume de vazios foi o parâmetro considerado na fase de determinação do teor de projeto de ligante asfáltico das misturas quanto a funcionalidade. Para tanto, o Vv foi determinado em função dos teores de ligante de cada mistura proposta e, após, elaboradas as curvas volume de vazios *versus* teor de ligante. A Figura 34 mostra as curvas obtidas.



Figura 34 - Volume de vazios *versus* teor de ligante asfáltico



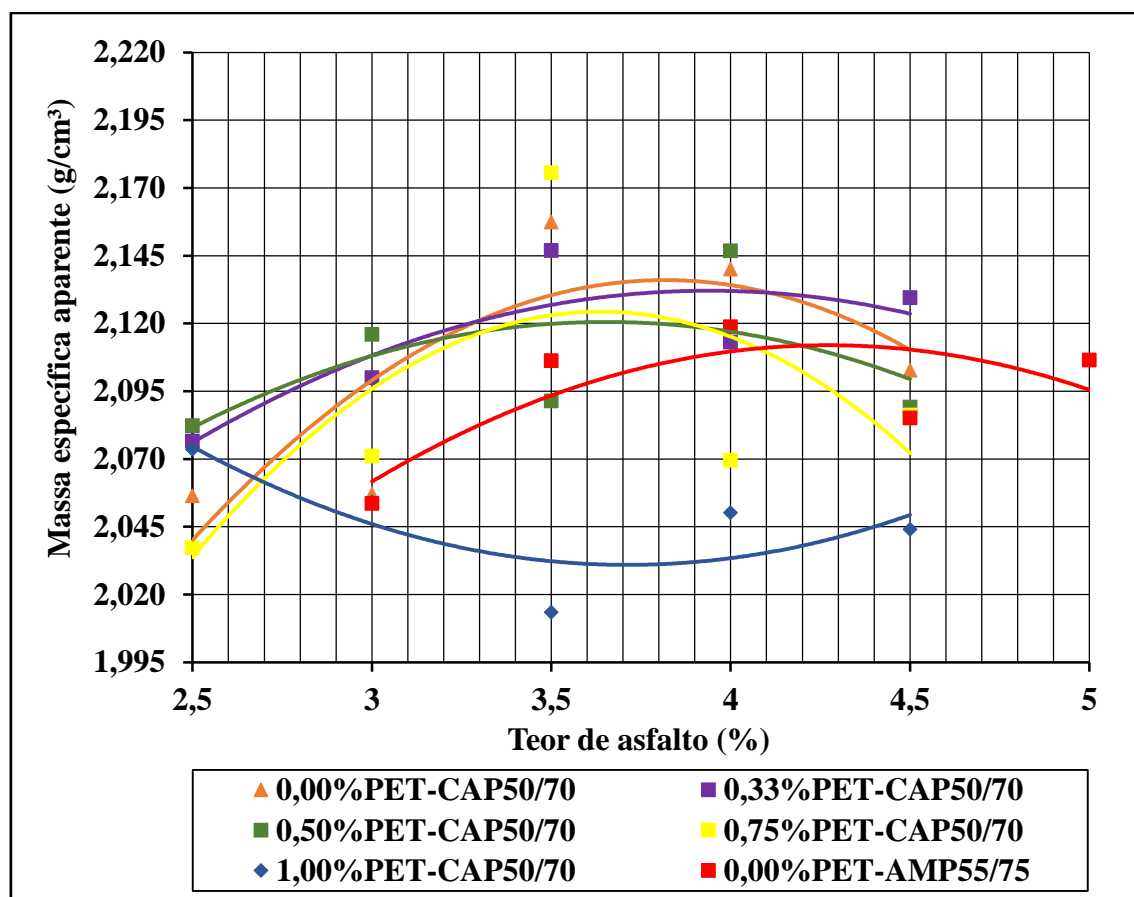
Fonte: Do autor (2016)

Pode ser observado na Figura 34 uma redução do Vv em função do aumento do teor de ligante asfáltico na mistura, o que é normalmente comum em resultados de dosagens de misturas asfálticas. Porém, a mistura com 1% de PET e CAP 50/70 apresentou um comportamento diferente das demais, o que leva a crer que o alto teor de PET (1%) nesta mistura, em relação às outras, tenha contribuído com esta mudança, já que em quantidades menores as misturas se comportaram conforme o padrão. Somado a isso, o procedimento de mistura também pode ter contribuído para os resultados inesperados, visto que a forma com que o PET foi adicionado à mistura pode ter resultado em diversas formas de comportamento desse material na mistura asfáltica - como aditivo, como agregado ou como modificante do ligante asfáltico, podendo ainda ter atuado dessas diversas formas conjuntamente.

Ainda na Figura 34, observa-se uma tendência de redução do Vv para as misturas aditivadas com PET, o que pode ser explicado pela redução da densidade aparente destas misturas, motivada pela presença de PET, que apresenta uma baixa massa específica quando comparado aos demais constituintes da mistura, conforme explica Ahmadinia *et*

al. (2011). A Figura 35 mostra as curvas de massa específica aparente *versus* teor de ligante asfáltico para as misturas propostas, onde também é verificado uma tendência de redução da massa específica aparente das misturas com a presença de PET.

Figura 35 - Massa específica aparente versus teor de ligante asfáltico



Fonte: Do autor (2016)

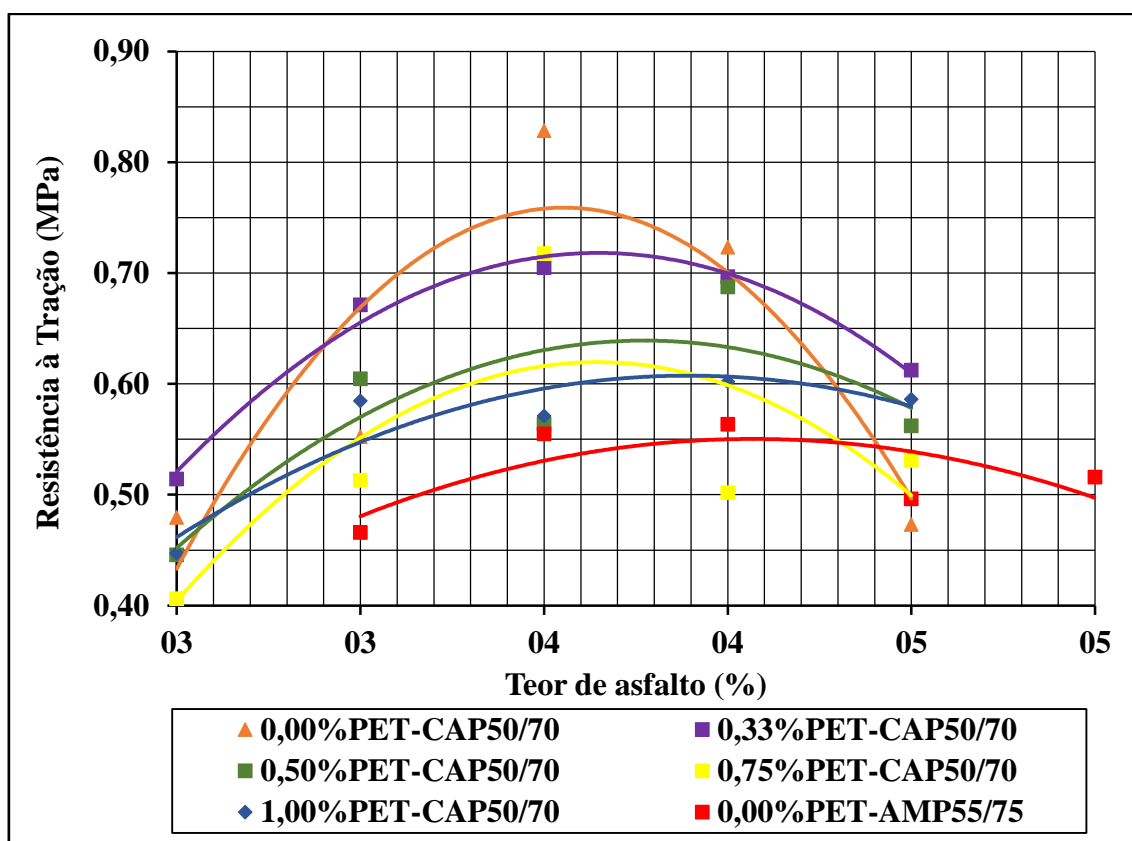
A Figura 35 mostra o comportamento diferenciado da mistura com 1,00% de PET e CAP 50/70 com relação a massa específica aparente, assim como para o Vv, conforme mostrado na Figura 34, o que reforça a tese do maior teor de PET e o procedimento de mistura ter sido o responsável por esta diferença. Moghaddam, Soltani e Karim (2014a) verificaram uma redução na massa específica aparente de misturas asfálticas moldadas no teor de projeto de ligante asfáltico para adições superiores a 0,40% de PET, o que eles atribuem ao alto ponto de amolecimento deste polímero (250°C), fazendo com que suas propriedades semicristalinas permaneçam inalteradas durante o processo de mistura, conforme relata Ahmadinia *et al.* (2012), o que resulta em partículas sólidas de PET na mistura. Essas partículas sólidas, em pequenas quantidades, preenchem os vazios existentes entre os agregados, resultando numa maior massa específica aparente. Porém,

em quantidades excessivas, concentram-se entre os agregados aumentando o volume da mistura e em consequência disso é verificada uma redução da massa específica aparente da mesma, explicam Moghaddam, Soltani e Karim (2014a).

#### 4.2.3 Resistência à Tração indireta (RT)

A resistência à tração representa a máxima tensão suportada pelo corpo de prova quando submetido a uma carga estática. O ensaio de RT foi realizado na prensa Marshall com uso de frisos metálicos para aplicação da carga compressiva. A Figura 36 mostra o resultado obtido no ensaio de RT para as misturas propostas.

Figura 36 - Resistência à tração indireta *versus* teor de ligante asfáltico



Fonte: Do autor (2016)

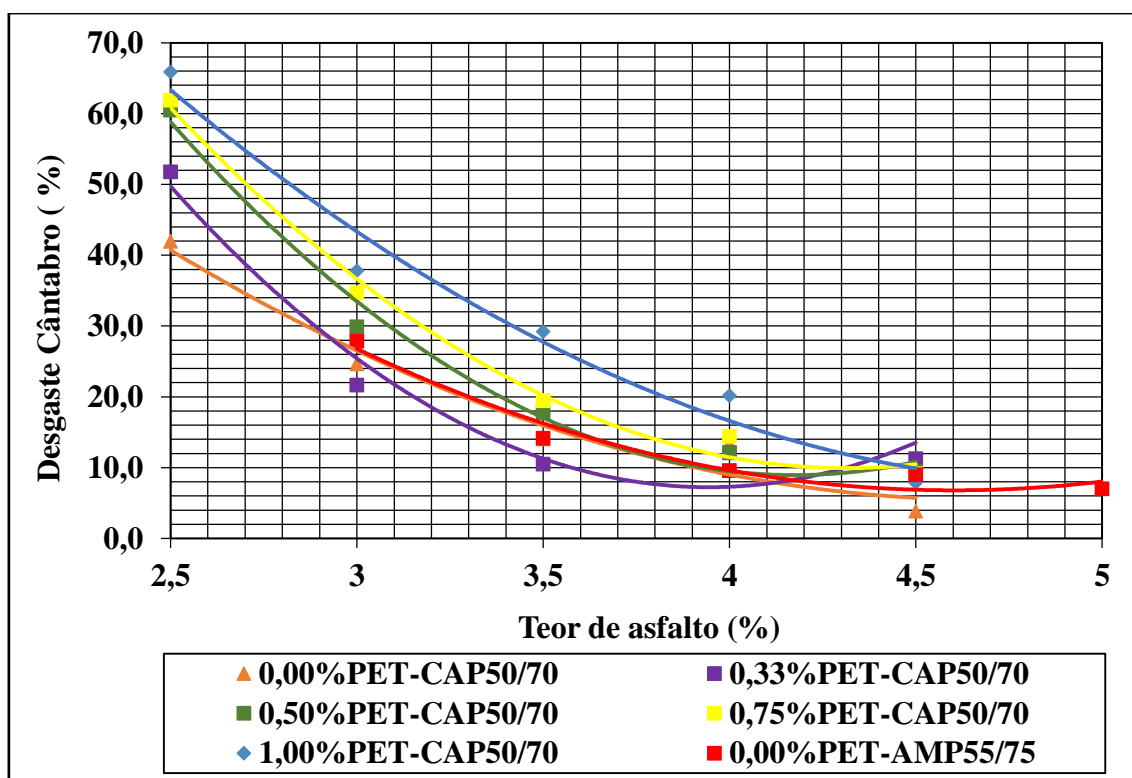
Assim como para o  $V_v$  e a  $G_{mb}$ , a RT apresentou uma tendência de redução na medida em que o teor de PET nas misturas foi aumentando, embora os valores máximos de RT para cada mistura tenham sido superiores ao mínimo exigido em norma, com exceção da mistura com AMP 55/75-E, que apresentou um valor máximo bem próximo do mínimo exigido (0,55MPa). As misturas apresentaram um valor de RT crescente até atingirem valores máximos para os teores 3,5 e 4,0% de ligante, aproximadamente.

Oliveira (2003) encontrou resultados similares para misturas preparadas com composição granulométrica ajustada nas faixas IV e V da especificação DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999), o que sugere um teor de projeto de ligante asfáltico em torno de 3 a 4% para misturas asfálticas porosas segundo a especificação brasileira.

#### 4.2.4 Ensaio Cântabro

O desempenho das misturas asfálticas quanto ao desgaste foi avaliado com o uso da máquina *Los Angeles* no ensaio denominado desgaste por abrasão de misturas betuminosas, ou simplesmente ensaio Cântabro. A Figura 37 mostra as curvas obtidas no ensaio em função do teor de ligante para as misturas propostas.

Figura 37 - Desgaste Cântabro *versus* teor de ligante asfáltico



Fonte: Do autor (2016)

Pela figura 37 verifica-se que as misturas aditivadas com PET se apresentaram mais suscetíveis ao desgaste, o que pode ser explicado pela presença das partículas sólidas do PET na mistura, que retém parte do ligante que revestiria os agregados, dificultando a aderência agregado-ligante. Porém, à medida que o teor de ligante foi aumentando o desempenho das misturas quanto ao desgaste foi convergindo entre si, o que, provavelmente, foi devido a quantidades maiores de ligante na mistura, aumentando a capacidade de revestir melhor os agregados. Além disso, um aumento de ligante na

mistura é seguido por uma redução do volume de vazios, implicando em melhoria das propriedades mecânicas, conforme argumenta Umiliaco e Benedetto (2013).

De um modo geral, todas as misturas, com exceção da mistura com 1,00% de PET, atenderam ao valor máximo de desgaste cântabro de 25% estabelecido pela DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999) para teores de ligante a partir de 3,5%. A Tabela 4 reúne os valores de cada parâmetro e seus respectivos teores de ligante considerados na determinação do teor de projeto das misturas propostas.

Tabela 4 – Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico para as misturas propostas

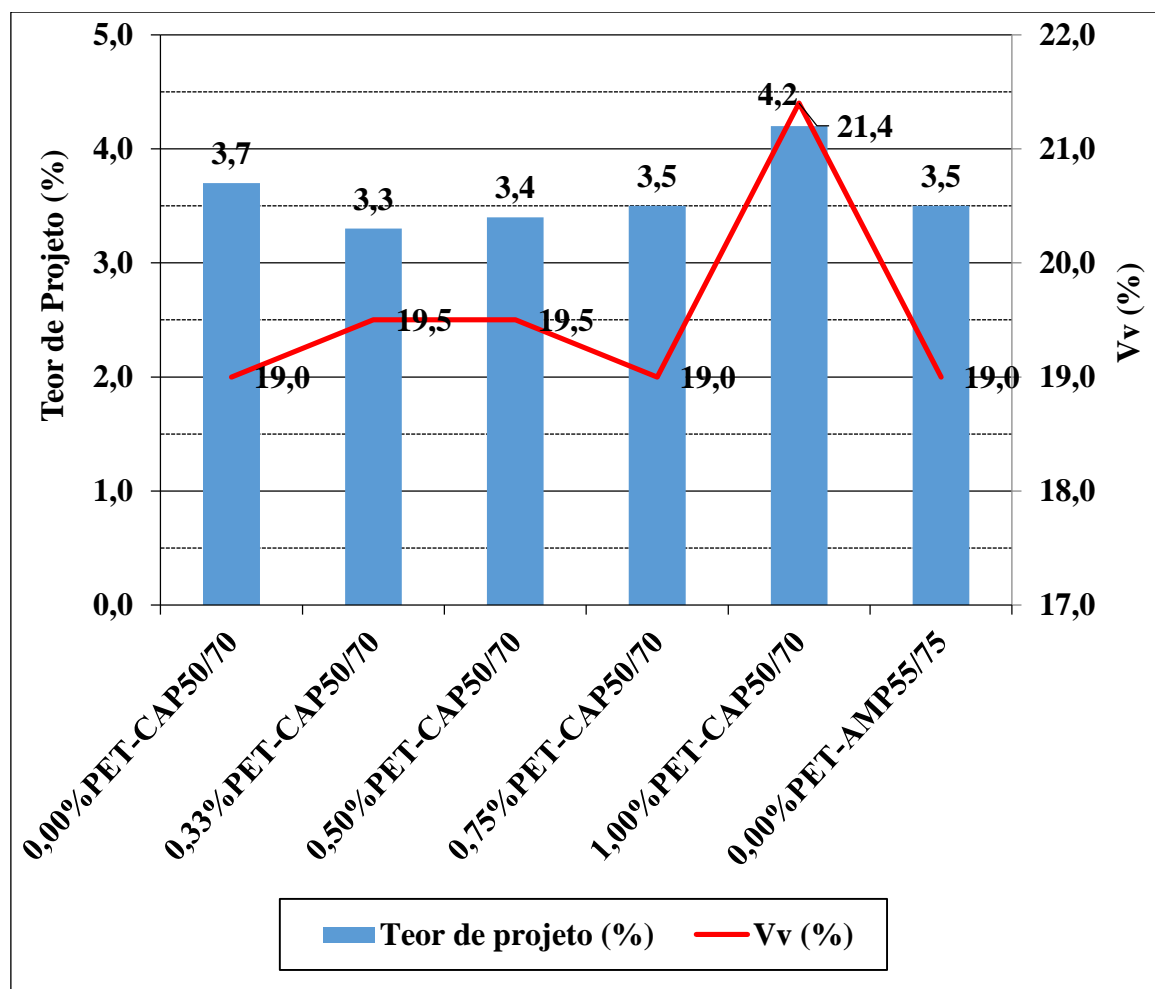
Mistura	Teor de ligante (%)	Parâmetro			Teor de projeto de ligante asfáltico (%)
		Volume de vazios (%)	Resistência à tração (MPa)	Desgaste Cântabro (%)	
0,00%PET-CAP50/70	Equivalente	21,5	0,83	3,9	3,7
	Calculado	3,0	4,5	3,5	
	Definido		3,7		
0,33%PET-CAP50/70	Equivalente	21,5	0,70	10,5	3,3
	Calculado	2,8	3,6	3,5	
	Definido		3,3		
0,50%PET-CAP50/70	Equivalente	21,5	0,69	4,9	3,4
	Calculado	2,7	3,8	3,8	
	Definido		3,4		
0,75%PET-CAP50/70	Equivalente	21,5	0,72	9,1	3,5
	Calculado	2,9	3,5	4,2	
	Definido		3,5		
1,00%PET-CAP50/70	Equivalente	21,5	0,60	7,9	4,2
	Calculado	4,1	4,0	4,5	
	Definido		4,2		
0,00%PET-AMP55/75	Equivalente	21,5	0,56	7,0	3,5
	Calculado	3,0	4,0	5,0	
	Definido		3,5		
DNER – ES 386/99	-	18 a 25	≥ 0,55	≤ 25%	-

Fonte: Do autor (2016)

O cálculo da média aritmética dos teores correspondentes ao volume de vazios de 21,5%, desgaste cântabro mínimo e resistência à tração indireta máxima resultou num teor de projeto para a mistura com AMP 55/75-E igual a 4,0%, porém, este valor equivale

a um Vv de 18%, mínimo exigido pela DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999). Deste modo, optou-se em ajustar o teor de projeto para 3,5%, pois este valor fornecia um Vv maior que 18% sem acarretar prejuízo aos demais parâmetros considerados na determinação do teor de projeto, além de representar uma economia de 0,5% de ligante asfáltico. A Figura 38 mostra de forma mais clara a diferença entre os teores de projeto de ligante asfáltico para as misturas propostas.

Figura 38 - Teor de projeto de ligante asfáltico para as misturas propostas



Fonte: Do autor (2016)

A mistura com 1,00% de PET apresentou o teor de projeto mais elevado dentre as misturas propostas, demonstrando, pelo menos durante a fase de dosagem, que valores excessivos de PET podem comprometer o bom desempenho das misturas ou demandarem mais ligante asfáltico. As demais misturas apresentaram teores de projeto bastante similares, especialmente as 0,33, 0,50%, 0,75% de PET com CAP 50/70 e a mistura com AMP 55/75-E.

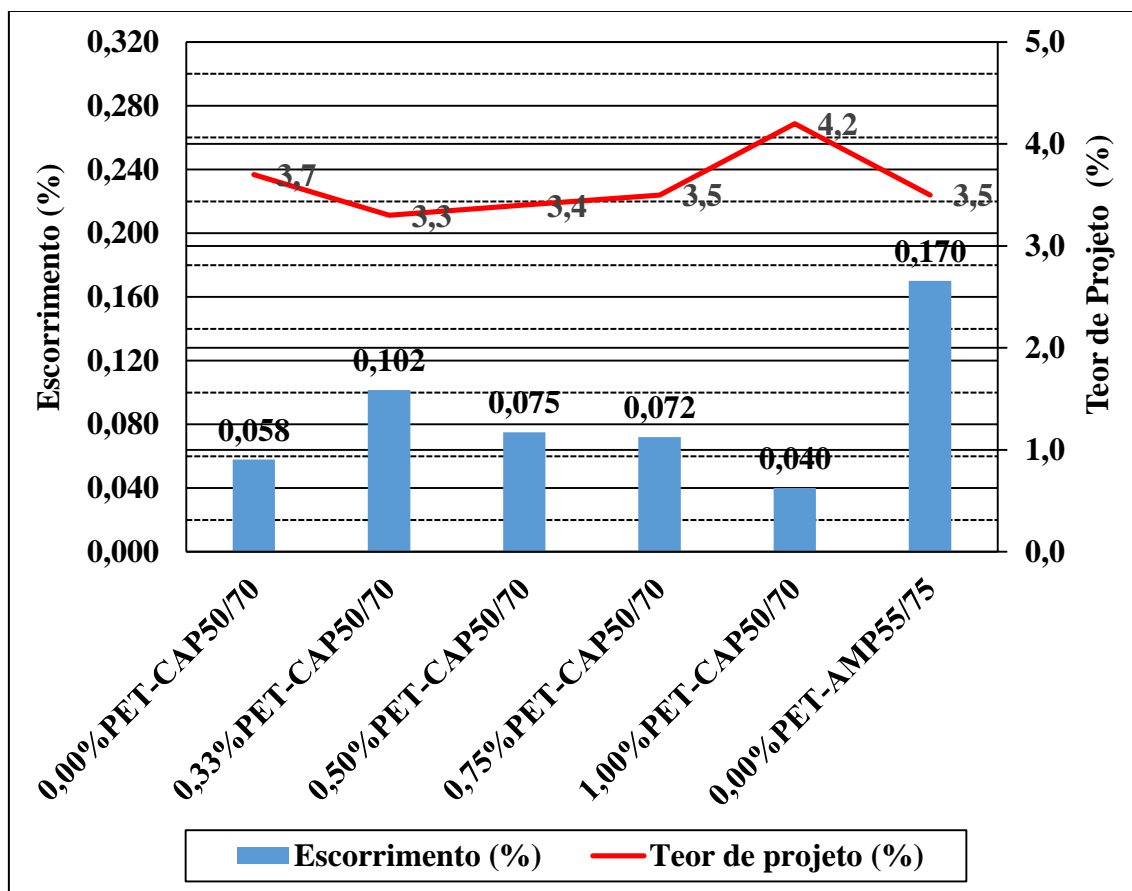
### 4.3 Ensaios realizados no teor de projeto de ligante asfáltico

Após a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico para cada mistura foram realizados ensaios de escoamento de ligante asfáltico, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, *creep* dinâmico, fadiga e permeabilidade para as misturas propostas em seus respectivos teores de projeto.

#### 4.3.1 Escoamento de ligante asfáltico em misturas asfálticas não compactadas

O escoamento do ligante asfáltico é uma séria patologia verificada em misturas asfálticas porosas e do tipo SMA. Em se tratando de misturas porosas, o escoamento pode alterar negativamente a funcionalidade e reduzir a durabilidade, conforme explicam Hanzah, Hasan e Ven (2012) e Lyons e Putman (2013). O ensaio de escoamento foi avaliado nas temperaturas de 170 e 179°C para as misturas com CAP 50/70 e AMP 55/75-E, respectivamente. A Figura 39 mostra o resultado do ensaio de escoamento para as misturas estudadas.

Figura 39 - Resultados do ensaio de escoamento



Fonte: Do autor (2016)

Todas as misturas apresentaram um valor de escoamento bem inferior a 0,300%, que é o máximo estabelecido pela especificação ASTM D7064/08 para misturas asfálticas porosas. Mansour e Putman (2013) afirmam que baixos valores de escoamento são verificados em misturas que apresentam fibras como aditivos estabilizantes ou ligantes asfálticos modificados por polímero. Porém, os resultados obtidos vão na contramão desta afirmação. Primeiro porque a mistura com 0,00% de PET e CAP 50/70 apresentou o segundo menor valor de escoamento, embora não tenha sido aditivada com PET nem ter sido utilizado ligante modificado; segundo, pelo fato da mistura 0,00% de PET e AMP 55/75-E, com ligante modificado, ter apresentado o maior valor de escoamento. Ainda na Figura 39 é possível observar que o teor de projeto não influenciou diretamente o escoamento das misturas

Por outro lado, Lyons e Putman (2013) reiteram a importância de utilizar aditivos estabilizantes com o objetivo de inibir o escoamento em misturas asfálticas porosas, pois verificaram que o uso apenas de ligante modificado com SBS, ou 5% de resíduos de borracha, não atenderiam ao limite de escoamento máximo de 0,300% após três horas de ensaio nas respectivas temperaturas de mistura, o que só foi possível com adição de fibras de celulose, tanto para a mistura com ligante convencional como para a modificada com SBS, e maiores quantidades de resíduos de borracha (12%) na produção de ligante modificado.

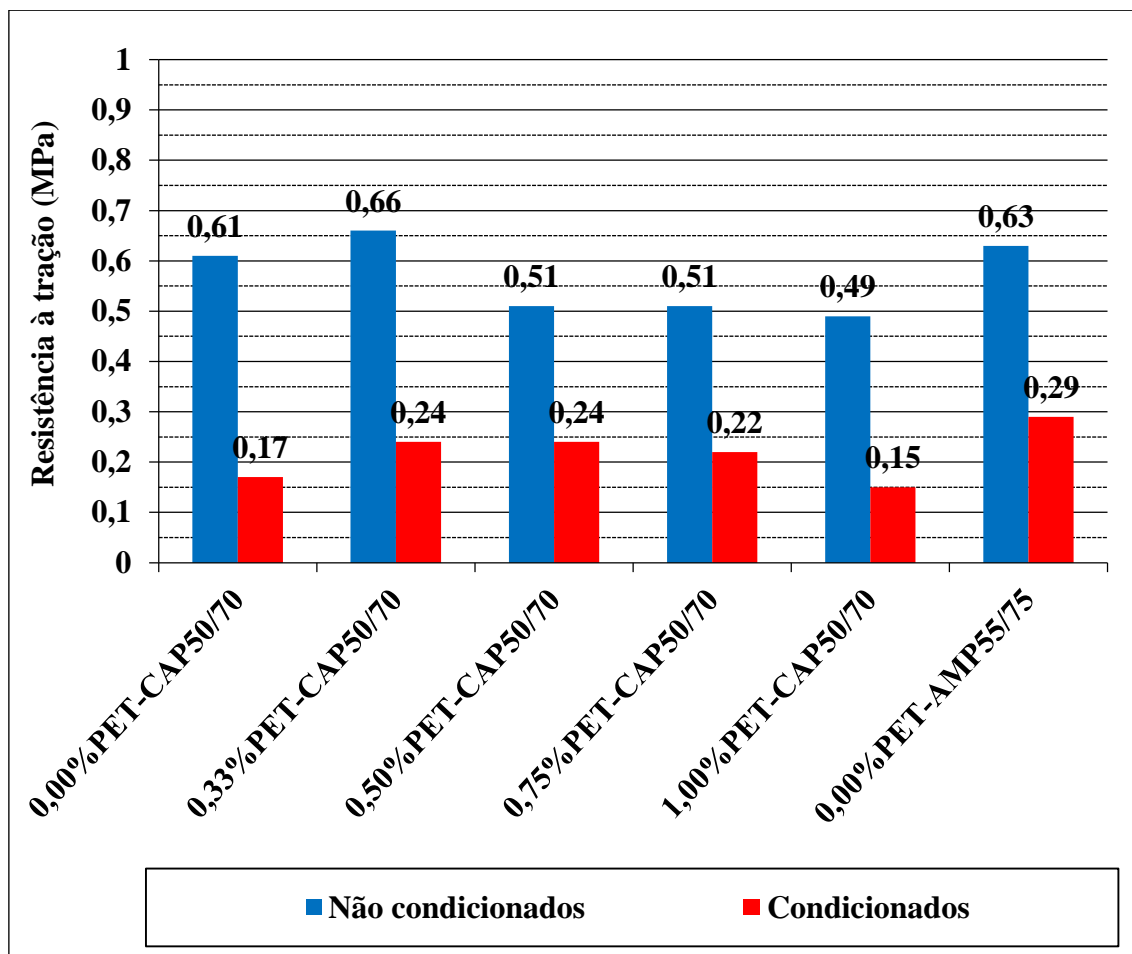
Analisando isoladamente as misturas aditivadas com PET observa-se uma redução do escoamento a partir do aumento do teor de PET, com destaque para a mistura com 1,00% que apresentou o menor valor de escoamento mesmo apresentando o mais elevado teor de projeto de ligante asfáltico (4,2%). Ahmadinia *et al.* (2012), que também verificaram uma redução do escoamento a partir do aumento do teor de PET, atribuem este fenômeno ao aumento da área superficial ocasionada pelas partículas sólidas de PET na mistura, conforme explicado anteriormente.

#### **4.3.2 Dano por umidade induzida**

O dano por umidade representa a sensibilidade da mistura asfáltica aos efeitos deletérios da água, que causa a perda de adesão entre o ligante asfáltico e os agregados, acelerando o surgimento de buracos, trincas e desgaste dos revestimentos asfálticos. A Figura 40 mostra os resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados para avaliação do dano por umidade.



Figura 40 - Resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados para avaliação do dano por umidade induzida



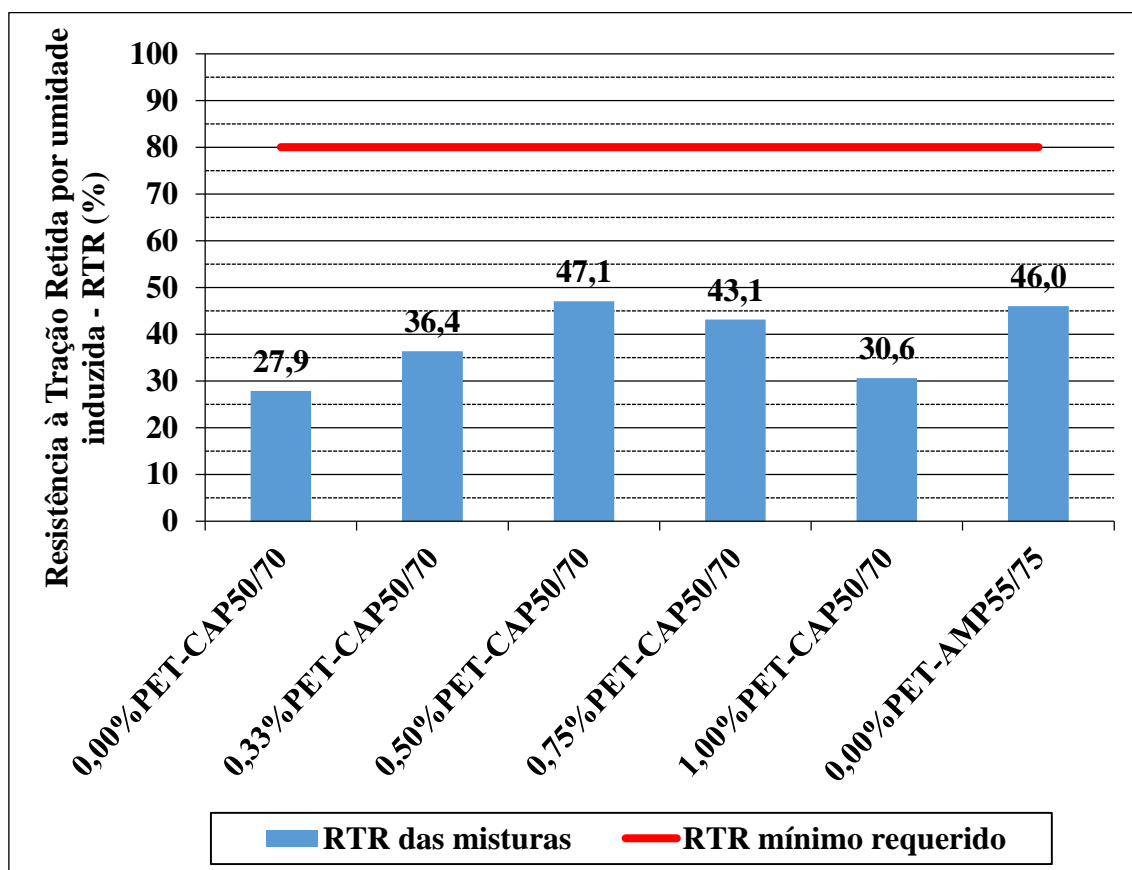
Fonte: Do autor (2016)

Pela Figura 40 verifica-se que todas as misturas apresentaram uma variação considerável na resistência à tração para ambas as situações consideradas, o que demonstra uma sensibilidade das misturas ao condicionamento em que foram submetidas. Esse comportamento é atribuído a baixa qualidade quanto à adesividade ao ligante asfáltico do agregado utilizado, conforme verificou (Assis, 2015), que utilizou os mesmos agregados graníticos em misturas densas. Além disso, através da caracterização química dos agregados, esse autor identificou uma quantidade considerável de sílica (61,7%), sendo esta responsável pela redução na adesão entre o ligante e o agregado, justificando o baixo desempenho quanto à adesividade.

Contudo, é importante destacar que a mistura com AMP 55/75-E, da mesma forma, não mostrou um bom desempenho em relação à resistência à tração pós condicionamento, embora o ligante utilizado nesta mistura contenha dope melhorador de adesividade, o que sugere que esta metodologia de ensaio não seja adequada para misturas

asfálticas porosas, conforme questionam Lu, Lou e Harvey (2011) que verificaram o baixo desempenho desse tipo de mistura em relação ao dano por umidade mesmo sem verificar qualquer remoção do ligante asfáltico após o condicionamento. Portanto, esses autores argumentam que a redução da resistência após o condicionamento pode estar relacionada ao enfraquecimento do ligante e/ou alteração no esqueleto mineral da mistura devido ao ciclo de congelamento e descongelamento em que são submetidas. Lu, Lou e Harvey (2011) explicam que o condicionamento à 60°C por 24 horas pode inferir uma significativa deformação em misturas asfálticas porosas, mesmo sem a utilização de água, conforme verificado em ensaios laboratoriais, onde misturas submetidas a esse condicionamento apresentaram resistência à tração de aproximadamente 75% de misturas não condicionadas. A Figura 41 mostra a resistência à tração retida por umidade induzida das misturas propostas, dada pela relação, em percentagem, entre a resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados.

Figura 41 - Resistência à tração retida por umidade induzida das misturas propostas



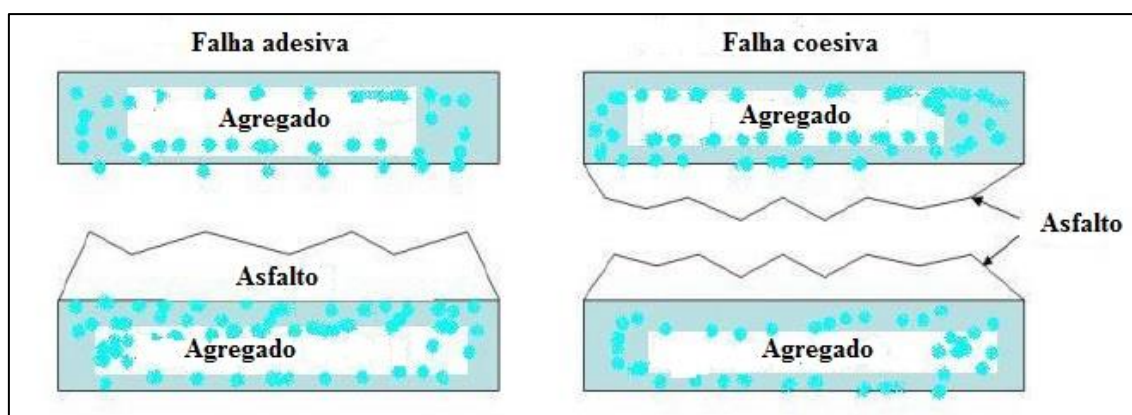
Fonte: Do autor (2016)

A especificação ASTM D7064/08 recomenda um valor mínimo de resistência à tração retida por umidade induzida (RTR) de 80%. Como pode ser visto pela Figura 41,

nenhuma mistura atendeu a esta exigência. Contudo, é possível notar um aumento da RTR que pode ser creditada ao PET presente nas misturas. A RTR foi máxima para a mistura com 0,50% de PET, que representa um aumento de 67,8% em relação à mistura com 0,00% deste material. Após atingir o pico de RTR, as misturas apresentaram uma redução deste parâmetro, onde a mistura com 1,00% de PET apresentou o menor valor dentre as misturas aditivadas, mas, ainda superior em 9% a mistura pura. Deste modo, as misturas aditivadas com PET, via processo seco, mostraram-se mais resistentes ao dano por umidade induzida se comparadas as misturas puras, inclusive a com AMP 55/75-E, levando a crer que o PET pode contribuir para amenizar os danos induzidos pela umidade.

Este aumento da RTR se opõe aos resultados encontrados por Ahmadinia *et al.* (2012), que relacionam a redução da RTR a forma cristal adquirida pelo PET, que retém parte do ligante umedecido, reduzindo a espessura do filme de ligante no entorno do agregado, deixando as misturas mais vulneráveis aos danos induzidos pela umidade. Vasudevan *et al.* (2012) explicam que o polímero derretido, além de preencher os poros dos agregados e estabelecer uma ligação com estes, também estabelecem uma forte ligação orgânica com o ligante. Tendo em vista estes argumentos e considerando o procedimento adotada neste trabalho para adição de PET nas misturas, que foi o mesmo de Ahmadinia *et al.* (2012), é provável que o aumento da RTR esteja mais relacionado com a coesão do mastique asfáltico. Ou seja, quando o PET foi adicionado à mistura o ligante já havia recoberto os agregados, contribuindo pouco para evitar a falha adesiva. Por outro lado, é provável que o PET tenha estabelecido uma ligação orgânica com o ligante, contribuindo para evitar a falha coesiva. A Figura 42 ilustra as falhas adesiva e coesiva.

Figura 42 - Falhas adesiva e coesiva



Fonte: Adaptado de Glover (2007)

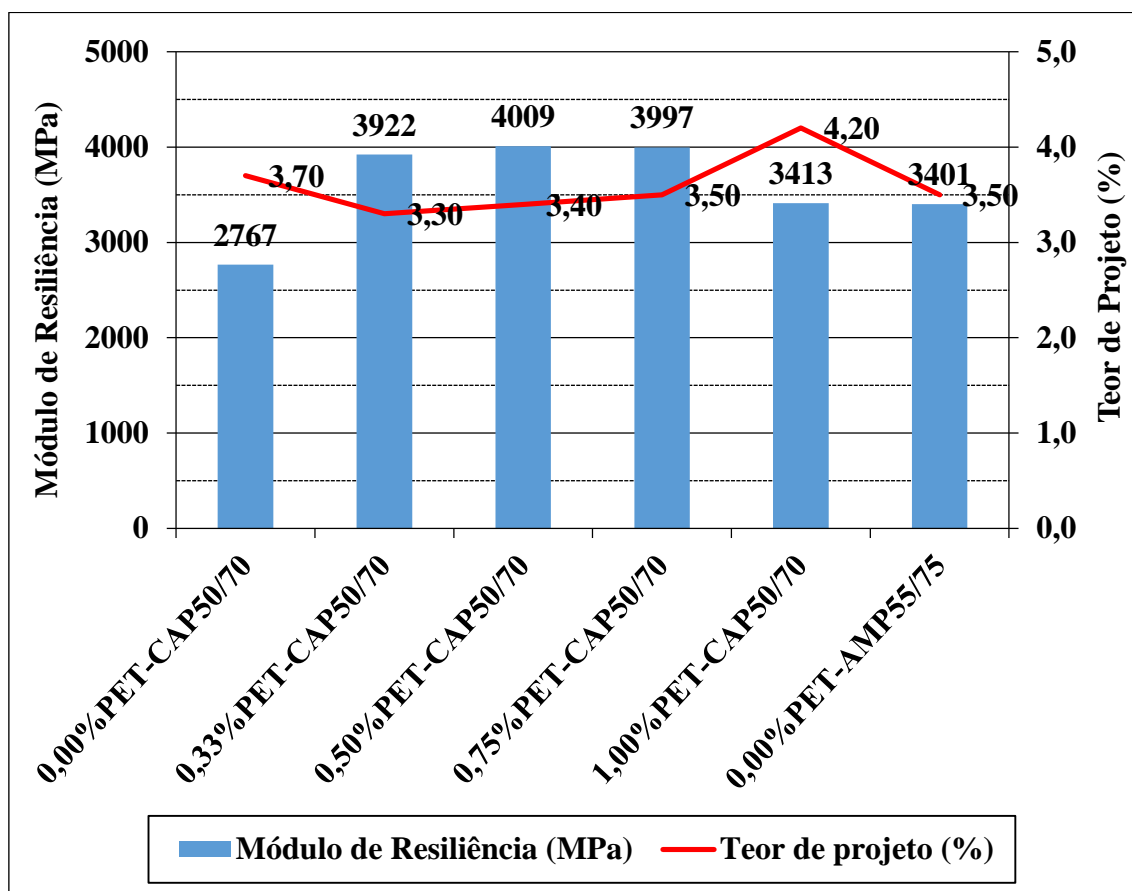
Deste modo, não se pode refutar a possibilidade de abrandar o dano por umidade em misturas asfálticas através da adição de PET via processo seco, ao contrário do que afirmam Ahmadinia *et al.* (2012). Contudo, é importante avaliar a aplicabilidade desta metodologia na avaliação do dano por umidade de misturas asfálticas porosas, tendo em vista o baixo desempenho verificado para as misturas estudadas, mesmo com a utilização de cal e ligante asfáltico com aditivo melhorador de adesividade, conforme destacam Lu, Lou e Harvey (2011).

#### **4.3.3 Módulo de Resiliência (MR)**

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) visa analisar a deformabilidade das camadas do pavimento. Em se tratando de misturas asfálticas, utiliza-se o termo rigidez, indicando a capacidade de resistir à deformação. Ou seja, neste ensaio, é determinada a rigidez da mistura asfáltica. O tipo de ligante asfáltico e a granulometria da mistura exercem grande influência no MR, enquanto o teor de ligante influencia menos (MEDINA e MOTTA, 2015).

O valor de MR para misturas asfálticas pode variar muito. Bernucci *et al.* (2008) citam valores típicos de MR de 2.000 a 8.000 MPa para concretos asfálticos ensaiados a 25°C. Misturas asfálticas porosas geralmente apresentam valores de MR inferiores ao de misturas densas, tendo em vista sua menor rigidez em relação a estas misturas, dado seu elevado volume de vazios (OLIVEIRA, 2003). A Figura 43 mostra o resultado do ensaio de MR para as misturas estudadas.

Figura 43 - Módulo de resiliência das misturas propostas



Fonte: Do autor (2016)

Ribeiro e Souza (2010) obtiveram valor de MR para CPA com CAP 50/70 de 1.692MPa. A adição de 0,05% de fibra de polipropileno e aramida nesta mesma mistura elevou o módulo para 1.911MPa. Já Oliveira (2003) encontrou valores de MR para misturas com composição granulométrica ajustada nas faixas IV e V da especificação DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999) de 1.619 e 1.884 MPa, respectivamente. O teor de projeto de ligante asfáltico neste caso foi de 4%.

De acordo com a Figura 43, os valores de MR encontrados foram relativamente altos, o que pode ter sido devido a presença de cal que enrijeceu as misturas. Além disso, observa-se um aumento do MR para as misturas aditivadas com PET, onde inicialmente foi verificado um aumento até atingir um pico de MR na mistura com 0,50% deste polímero e, após, uma redução até atingir o valor mínimo de MR para as misturas aditivadas com 1,00% de PET. Este valor, porém, ainda foi superior ao da mistura sem PET em sua composição.

Comportamento semelhante foi verificado por Ahmadinia *et al.* (2012), que modificaram misturas SMA com resíduos de PET via processo seco. Estes autores explicam que o aumento na rigidez das misturas foi ocasionado pelas propriedades semicristalinas do PET, as quais permanecem inalteradas durante o processo de mistura.

Moghaddam, Karim e Syammaun (2012), da mesma forma, verificaram inicialmente um aumento da rigidez de misturas SMA quando aditivadas com até 0,2% de PET via processo seco, porém acima desse teor e até 1,00% houve uma redução da rigidez para o mesmo nível de tensão (250, 350 e 450 KPa). O aumento dos níveis de tensão provocou uma redução da rigidez, além disso, no nível mais elevado, a presença de PET pouco influenciou a rigidez das misturas, sugerindo uma certa variabilidade do comportamento do PET segundo as condições de ensaio.

O PET sólido presente na mistura pode então absorver parte das tensões impostas, aumentando a rigidez da mistura, verificado pelos maiores valores de MR para as misturas aditivadas com PET, conforme explicam Ribeiro e Souza (2010) o aumento de MR devido a presença de fibras de polipropileno e aramida. A mistura com AMP 55/75-E apresentou um maior valor de módulo de resiliência em relação a mistura com CAP 50/70 e 0% de PET o que pode ser justificado pela maior viscosidade daquele ligante asfáltico, uma vez que as faixas granulométricas destas duas misturas são bem parecidas, assim como o teor de projeto de ligante.

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, visto que agrega informações de rigidez (MR) e resistência (RT). Valores menores obtidos nesta relação são desejáveis pois indicam uma maior vida de fadiga, uma vez que se busca baixa rigidez de modo a evitar alta absorção de tensões que levam ao trincamento prematuro do revestimento, e alta resistência à tração que por sua vez está associada a uma maior resistência à fadiga (VALE, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008). A Tabela 5 mostra os valores de MR, RT e da relação MR/RT para as misturas estudadas.

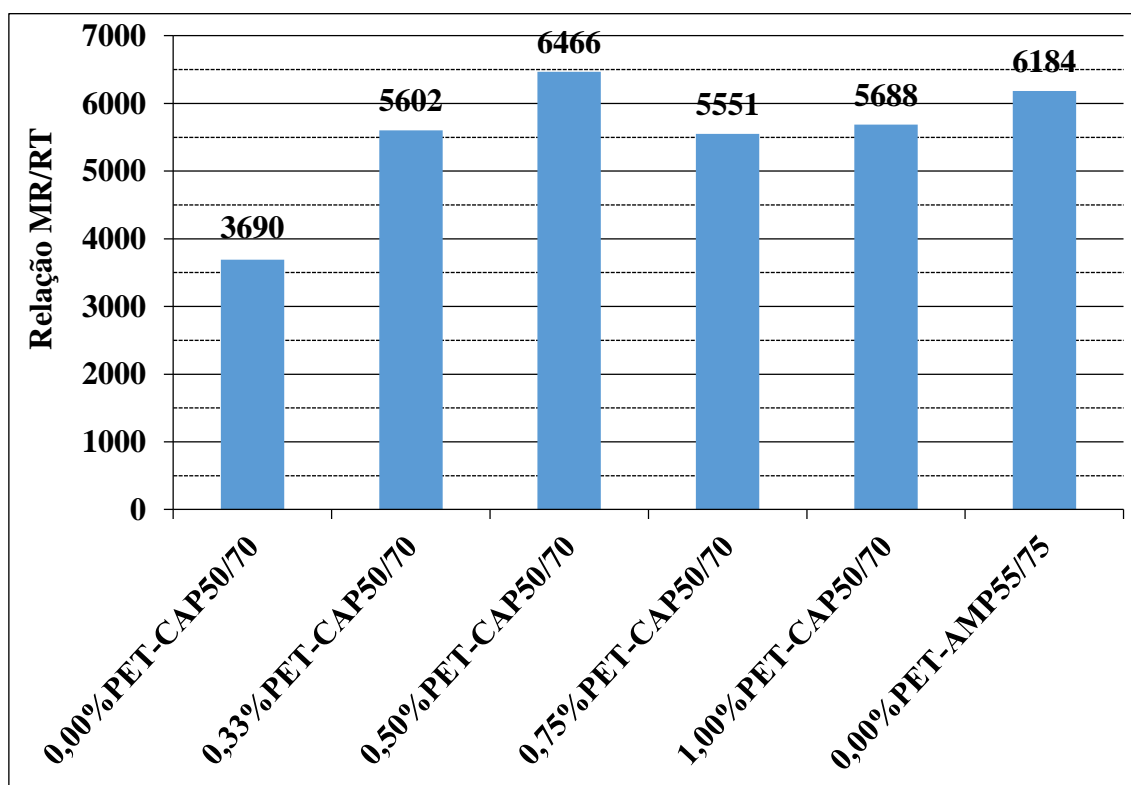
Tabela 5 - Relação MR/RT para as misturas propostas

Mistura	Módulo de Resiliência - MR (MPa)	Resistência à Tração - RT (MPa)	Relação MR/RT
0,00%PET-CAP50/70	2.767	0,75	3.690
0,33%PET-CAP50/70	3.922	0,70	5.602
0,50%PET-CAP50/70	4.009	0,62	6.466
0,75%PET-CAP50/70	3.997	0,72	5.551
1,00%PET-CAP50/70	3.413	0,60	5.688
0,00%PET-AMP55/75	3.401	0,55	6.184

Fonte: Do autor (2016)

Os valores de RT das misturas mostrados na Tabela 5 foram obtidos das curvas teor de ligante *versus* resistência à tração para valores correspondentes ao teor de projeto de ligante asfáltico, conforme mostrado na Figura 36. A Figura 44 mostra de forma mais clara os valores de MR/RT para as misturas propostas.

Figura 44 - Relação MR/RT das misturas propostas



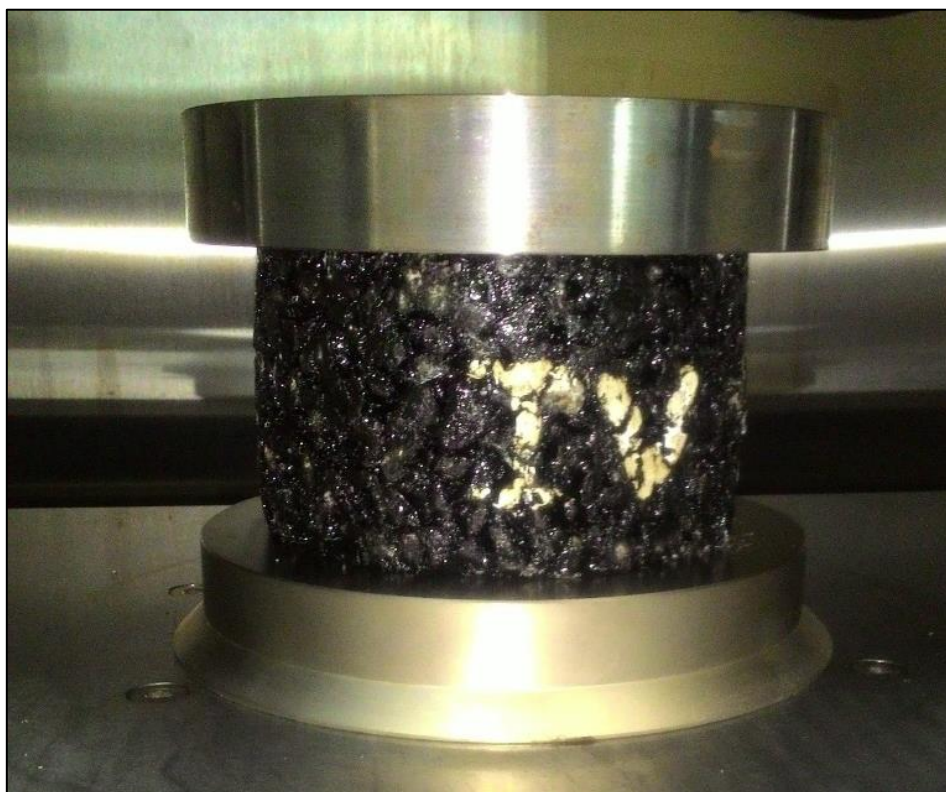
Fonte: Do autor (2016)

Os valores mostrados na Figura 44 sugerem uma redução da vida de fadiga para as misturas aditivadas com PET, tendo em vista os valores mais elevados da relação MR/RT, devido principalmente ao aumento do módulo de resiliência. A mistura com AMP 55/75-E apresentou o segundo menor valor de MR e o menor valor de RT, o que fez dela a segunda mistura com o maior valor da relação MR/RT.

#### **4.3.4 Ensaio de deformação permanente – *Creep* Dinâmico – Determinação do *flow number***

Deformação permanente é um dos principais defeitos correntes em pavimentos asfálticos, especialmente em climas com temperatura elevada e sob carga de tráfego pesada. Neste trabalho o *flow number* (FN), determinado através do ensaio *creep* dinâmico, foi o parâmetro utilizado para avaliar a deformação permanente das misturas asfálticas estudadas. A Figura 45 mostra o aspecto do corpo de prova após o ensaio.

Figura 45 – Aspecto do corpo de prova após o ensaio *creep* dinâmico



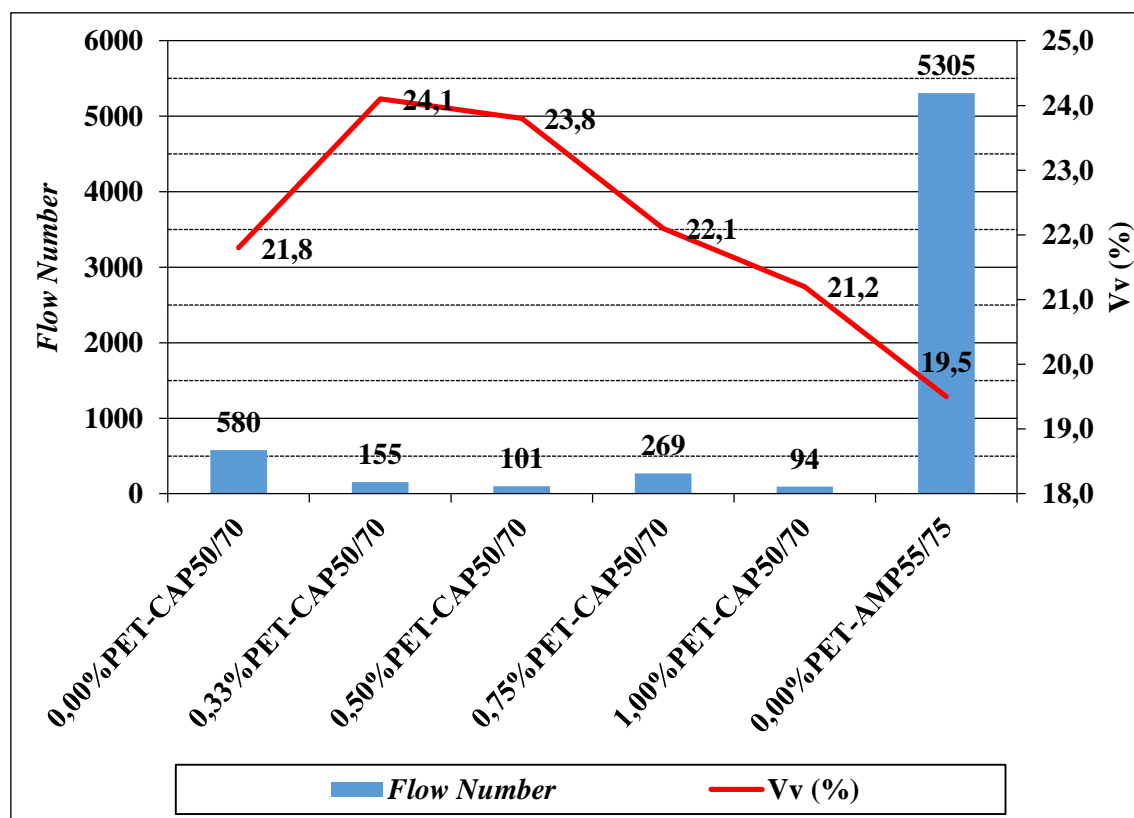
Fonte: Do autor (2016)

Misturas asfálticas porosas são menos resistentes à deformação permanente que misturas densas, devido seu alto índice de vazios permitirem que as partículas se desloquem no interior da mistura quando solicitadas pelas cargas do tráfego (LYONS e



PUTMAN, 2013; MANSOUR e PUTMAN, 2013). Além do aspecto estrutural, a deformação permanente em misturas porosas pode interferir em sua funcionalidade ao contribuir com o processo de colmatação e consequentemente reduzir a permeabilidade, conforme destaca Chen *et al.* (2015). A Figura 46 mostra o FN das misturas propostas, bem como o valor de Vv médio obtido para cada mistura antes da determinação do FN.

Figura 46 - Flow Number das misturas propostas



Fonte: Do autor (2016)

Zhang *et al.* (2013) encontraram um valor médio de FN para mistura porosa igual a 931. Este valor, segundo os autores, é resultado do alto volume de vazios da mistura ( $20\pm 2\%$ ) e ao fato do ensaio ter sido realizado com o corpo de prova não confinado, o que eles acreditam ter subestimado o resultado.

Os resultados de FN para as misturas aditivadas com PET foram consideravelmente inferiores as demais, diferentemente do esperado, pois, conforme apontam Ahmadinia *et al.* (2012), acreditava-se que o enrijecimento das misturas pelo PET resultasse numa melhor capacidade de resistir a deformação permanente. Porém, é oportuno lembrar que o MR foi realizado a  $25^{\circ}\text{C}$ , enquanto que o FN foi determinado a  $60^{\circ}\text{C}$ , o que pode justificar os resultados inesperados, visto que nesta temperatura o

comportamento das misturas quanto à rigidez pode diferir significativamente do observado na temperatura em que foram determinados o MR (25°C).

Modarres e Hamed (2014), por exemplo, verificaram que misturas puras e aditivadas com PET via processo seco reduziram seu MR pela metade quando a temperatura de ensaio aumentou de 5°C para 20°C. Assim sendo, é provável que tenha ocorrido uma redução da rigidez das misturas aditivadas com PET durante a determinação do FN, em função do aumento da temperatura.

De acordo com Motta e Medina (2015), a granulometria da mistura exerce grande influência na deformação permanente, sendo esta tanto maior quanto menor for a dimensão máxima do agregado. Em relação ao ligante, quanto mais viscoso este for menor será a deformação permanente da mistura. Deste modo, acredita-se que o ligante tenha sido responsável pelo alto valor de FN apresentado pela mistura com AMP 55/75-E, tendo em vista que a dimensão máxima do agregado foi o mesmo para todas as misturas (12,5mm).

Dumke (2005) avaliou a deformação permanente de misturas asfálticas drenante com dimensão máxima do agregado de 9,5 e 12,5mm, com adição de fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto borracha, através de simuladores de tráfego em placas moldadas em laboratório. Nenhuma das misturas avaliadas atendeu ao critério de deformação permanente considerado, que consiste na deformação máxima de 10% em relação à espessura da placa após aplicação de 30.000 ciclos.

Oliveira (2003), utilizando a mesma metodologia adotada por Dumke (2005), verificou o insucesso de misturas asfálticas porosas com composição granulométrica ajustada nas faixas IV e V da especificação DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999) em relação a resistência à deformação permanente. Embora o autor atribua este baixo desempenho ao processo de compactação das placas para realização do ensaio, ele afirma a importância de se considerar a lamelaridade do agregado no desempenho das misturas, destacando que o agregado utilizado apresentou um índice de forma abaixo do mínimo exigido em norma.

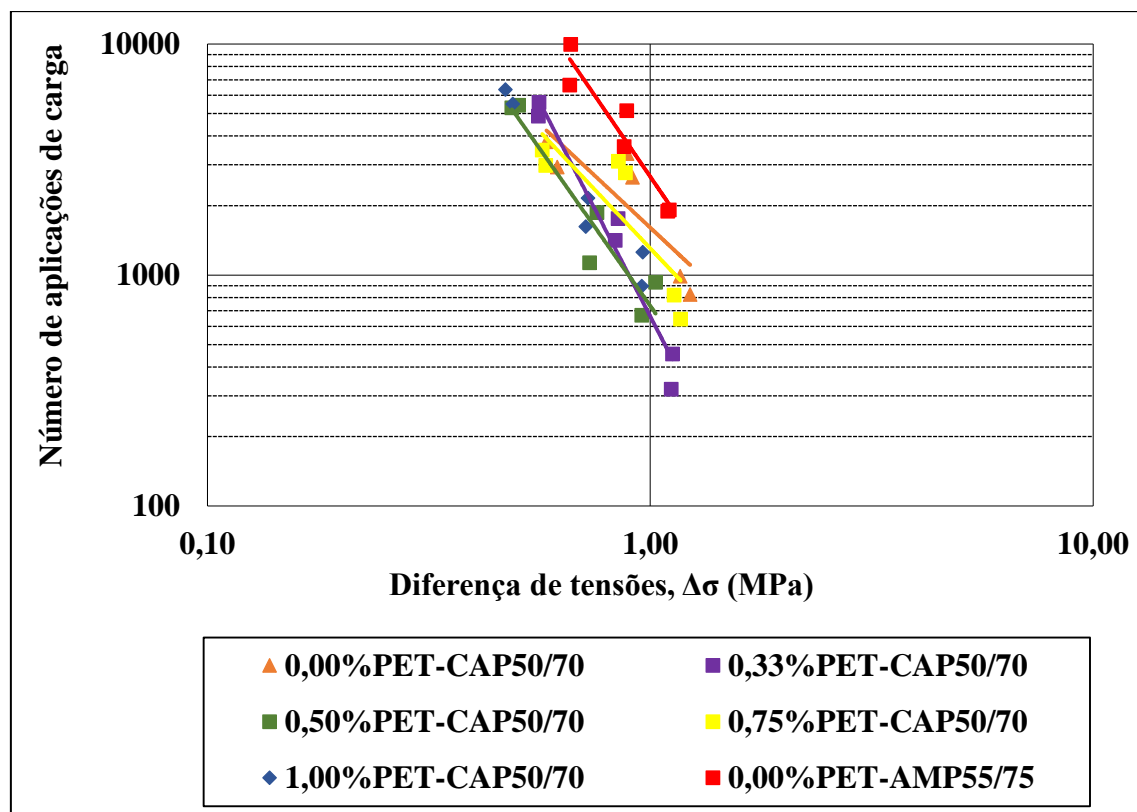
A análise da deformação permanente em misturas asfálticas porosas, portanto, deve concentrar-se na avaliação da perda de funcionalidade, dada pela redução da permeabilidade devido ao processo de colmatção resultante da deformação em trilha de roda da camada, conforme destacam Chen *et al.* (2015). Essa análise pode ser realizada

pela determinação do nível de fechamento dos poros, ou redução do volume de vazios, da mistura asfáltica porosa em questão a partir de um determinado número de repetições de carga. Além disso, deve-se considerar que os métodos normalmente utilizados para avaliação de deformação permanente podem não ser representativos quando se tratar de misturas asfálticas porosas, visto que este tipo de mistura não apresenta função estrutural, conforme explica Pinheiro (2004).

#### 4.3.5 Vida de fadiga

A curva de fadiga busca prever quantas solicitações de carga uma determinada estrutura poderá suportar. Este resultado confrontado com dados reais de tráfego consiste no principal parâmetro para o dimensionamento mecânico de pavimentos. O desempenho dos materiais quanto à fadiga é avaliado através da confrontação de suas respectivas curvas, visto que o ensaio laboratorial não reproduz fielmente as condições de campo (BERNUCCI *et al.*, 2008; RIBEIRO e SOUZA, 2010). A Figura 47 mostra as curvas de fadiga para as misturas estudadas.

Figura 47 - Vida de fadiga *versus* diferença de tensões das misturas propostas



Fonte: Do autor (2016)

A Tabela 6 mostra constantes  $k$  e  $n$  obtidas na regressão linear dos pares  $N$  e  $\Delta\sigma$ , mostrados na Figura 46 em escalas logarítmicas.

Tabela 6 - Constantes obtidas na regressão linear

Mistura	Constantes obtidas na regressão linear			Modelo para determinação da vida de fadiga
	$k$	$n$	$R^2$	
0,00%PET-CAP50/70	1604,5000	1,7960	0,7256	$N = 1604,50 * \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{1,796}$
0,33%PET-CAP50/70	662,3900	3,7120	0,9624	$N = 662,39 * \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{3,712}$
0,50%PET-CAP50/70	735,6400	2,7250	0,9062	$N = 735,64 * \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{2,725}$
0,75%PET-CAP50/70	1305,1000	2,0290	0,7096	$N = 1305,1 * \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{2,029}$
1,00%PET-CAP50/70	904,9100	2,5020	0,9556	$N = 904,91 * \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{2,502}$
0,00%PET-AMP55/75	2666,6000	2,8030	0,9079	$N = 2666,60 * \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{2,803}$

Fonte: Do autor (2016)

A Tabela 7 mostra os valores das diferenças de tensões e vida de fadiga para cada mistura.

Tabela 7 - Diferença de tensões e vida de fadiga das misturas propostas

Percentagem da carga em relação à resistência à tração (RT)								
Mistura	20%		30%		40%		50%	
	Parâmetro							
	Diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ )	Vida de Fadiga (N)	Diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ )	Vida de Fadiga (N)	Diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ )	Vida de Fadiga (N)	Diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ )	Vida de Fadiga (N)
0,00%PET-CAP50/70	0,60	4.014	0,90	1.940	1,20	1.156	-	-
0,33%PET-CAP50/70	0,56	5.710	0,84	1.267	1,12	436	-	-
0,50%PET-CAP50/70	0,50	4.974	0,74	1.647	0,99	750	-	-
0,75%PET-CAP50/70	0,58	4.000	0,86	1.756	1,15	980	-	-
1,00%PET-CAP50/70	0,48	5.679	0,72	2.061	0,96	1.003	-	-
0,00%PET-AMP55/75	-	-	0,66	8.558	0,88	3.821	1,10	2.044

Do autor (2016)

Pelo exposto na Figura 47 e nas Tabelas 6 e 7, a mistura com AMP 55/75-E apresentou a maior vida de fadiga dentre as misturas estudadas, o que já era esperado, pois o polímero elastômero confere boas propriedades elásticas ao ligante asfáltico modificado, conforme já comentado.

Para baixas tensões as misturas com 0,33, 0,50 e 1,00% de PET e CAP 50/70 apresentam uma tendência de maior vida de fadiga quando comparadas às misturas com 0,00 e 0,75% de PET e CAP 50/70. Estas duas últimas, inclusive, apresentam vidas de fadiga bastante similares, com a mistura com 0% de PET e CAP 50/70 apresentando um valor ligeiramente superior para altas tensões. Para níveis mais elevados de tensão a mistura com 0,33% de PET e CAP 50/70 mostrou uma tendência de menor vida de fadiga perante as demais.

Porém, ao analisar retas que representam a vida de fadiga de misturas asfálticas, além do posicionamento relativo, deve-se considerar também a sua inclinação. De acordo com Castelo Branco (2004), o número de repetições de carga em campo é consideravelmente superior ao que ocorre na realização do ensaio, o que torna a inclinação da reta mais importante do que o fato de uma estar ou não sobre a outra. Deste modo, observando a Figura 46 e as Tabelas 5 e 6, é possível considerar que para maiores

números de aplicações de carga a vida de fadiga das misturas com 0,33, 0,50, 0,75 e 1,00% de PET e CAP 50/70 superaria a da mistura com 0,00% de PET e CAP 50/70, demonstrando que esse polímero contribuiu para o aumento da vida de fadiga das misturas, conforme verificaram Moghaddam, Karim e Syammaun (2012); Moghaddam e Karim (2012) e Modarres e Hamed (2014).

Confrontando os resultados de vida de fadiga com os da relação módulo de resiliência/resistência à tração (MR/RT), constata-se que esta relação não representou bem a vida de fadiga das misturas estudadas. Se por um lado a mistura com AMP 55/75-E apresentou a maior vida de fadiga e segundo maior valor de MR/RT, por outro, a mistura com 1,00% de PET e CAP 50/70 apresentou o menor valor de MR/RT e o menor valor de vida de fadiga, conforme explicado anteriormente. Portanto, os valores de MR/RT não se mostraram eficazes para representar o comportamento da vida de fadiga das misturas estudadas.

#### **4.3.6 Permeabilidade**

O coeficiente de permeabilidade foi considerado o parâmetro de funcionalidade das misturas asfálticas porosas aqui estudadas. Para sua determinação, corpos de prova com diâmetros de aproximadamente 150mm foram moldados pelo método de compactação por impacto. Foram necessários 108 golpes, por face do corpo de prova, para que este apresentasse as mesmas características, em termos de densidade, que o corpo de prova Marshall. A quantidade de golpes foi determinada através das Equações 16 e 17, conforme Roseno (2005). Antes da realização do ensaio foi verificado a densidade dos corpos de prova. A Figura 48 mostra um corpo de prova Marshall convencional e um moldado para realização do ensaio de permeabilidade.

Figura 48 - Corpo de prova Marshall convencional e moldado para ensaio de permeabilidade



Fonte: Do autor (2016)

Por problema apresentado pelo equipamento só foi possível ensaiar apenas um corpo de prova da mistura pura (0,00% de PET) com CAP 50/70. Tal corpo de prova apresentou um volume de vazios igual a 22,9%, valor este um pouco superior ao valor de referência, que foi de 19,0% para o corpo de prova Marshall convencional para a mistura em questão. Contudo, o valor encontrado satisfaz a faixa de volume de vazios de 18 a 25% da especificação brasileira DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999), o que tornou o corpo de prova apto para realização do ensaio de permeabilidade.

O corpo de prova apresentou um coeficiente de permeabilidade de aproximadamente 0,09 cm/s, valor bastante inferior ao mínimo sugerido pela ASTM D7064/08 que é de 0,12 cm/s. Porém, observa-se uma variação dos valores de coeficiente de permeabilidade encontrados na literatura, tanto para aqueles obtidos em cada estudo, como também os valores mínimos exigidos que foram tomados como referência.

Dumke (2005) e Guimarães (2012) consideraram um coeficiente de permeabilidade mínimo de 0,6 cm/s e encontraram, respectivamente, valores de 10 a 18 cm/s e 0,6 a 2,2 cm/s para concreto asfáltico drenante.

Oliveira (2003) encontrou coeficiente de permeabilidade vertical igual a 0,453 e 0,386 cm/s para misturas asfálticas porosas ajustada nas faixas IV e V, respectivamente da especificação DNER – ES 386/99 (DNIT, 1999). Roseno (2005), para misturas porosas ajustada na faixa V desta mesma norma, obteve coeficiente de permeabilidade vertical igual 0,203 e 0,096 cm/s para misturas com ligante modificado por polímero SBS e asfalto

borracha, respectivamente, ensaiados com corpo de prova Marshall convencional. Esse autor ainda realizou ensaio de permeabilidade em corpos de prova cúbicos e os resultados obtidos foram 0,386 e 0,132, respectivamente.

De acordo com Goh e You (2012) e Shen, Wu e Du (2008) coeficientes de permeabilidade superiores a 0,01cm/s geralmente são atribuídos a revestimentos porosos que apresentam uma boa drenabilidade. Deste modo, o valor encontrado neste trabalho indica uma boa capacidade de drenagem das misturas estudadas. Porém, é necessária uma quantidade maior de ensaios para que possa ter um resultado mais confiável.



## Capítulo 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar o uso de Polietileno tereftalato (PET) como aditivo em misturas asfálticas porosas com cimento asfáltico de petróleo convencional (CAP 50/70). O desempenho das misturas aditivadas com PET foi comparado ao de misturas sem adição e com CAP 50/70 e a de uma mistura tomada como referência, a qual foi moldada com ligante asfáltico modificado por polímero elastômero (AMP 55/75-E).

O teor de projeto de ligante asfáltico foi determinado pelo método Marshall e foi considerado uma faixa de volume de vazios de 18 a 25%, resistência à tração mínima de 0,55MPa e desgaste máximo de 25% como critérios a serem atendidos para sua determinação. A presença de PET nas misturas induziu uma redução do volume de vazios, uma vez que houve redução da massa específica aparente das misturas devido à baixa densidade do PET em relação aos outros constituintes da mistura. Redução da resistência à tração e aumento do desgaste foram verificados para as misturas aditivadas com PET, porém, sem comprometer o bom desempenho das mesmas.

Todas as misturas atenderam satisfatoriamente aos critérios considerados para determinação do teor de projeto de ligante asfáltico. Para as misturas aditivadas com PET foi verificado inicialmente uma redução do teor de projeto de ligante, em seguida, a medida que a quantidade de PET nas misturas foi aumentada, verificou-se um aumento deste valor, o qual atingiu o máximo para a mistura com o valor mais elevado de PET (1,00% de PET), superando o valor da mistura sem PET, demonstrando que quantidades excessivas deste aditivo podem ser inviáveis por demandarem mais ligante asfáltico, e acarretar prejuízo no desempenho das misturas. Portanto, adição de PET em até 0,75%, em relação ao peso dos agregados, podem produzir misturas asfálticas porosas mais econômicas sem perda de qualidade, tendo em vista a redução de ligante asfáltico pela incorporação de polímero reciclado.

O desempenho das misturas moldadas em seus respectivos teores de projeto de ligante asfáltico foi avaliado segundo as características de escoamento do ligante, dano por umidade induzida, rigidez, deformação permanente e vida de fadiga. As misturas apresentaram valores baixos de escoamento, com exceção da mistura com AMP 55/75-E que apresentou um valor relativamente alto, porém, ainda bem abaixo do limite máximo aceitável, contrariando as expectativas, visto que o AMP 55/75-E apresenta uma maior

viscosidade e, conseqüentemente, mais resistente ao escorrimento. Outro resultado inesperado de escorrimento foi o da mistura com 0,00% de PET e CAP 50/70, por esta ter apresentado o menor segundo valor dentre as misturas avaliadas, considerando que misturas com aditivos tendem a apresentar valores menores de escorrimento. Por outro lado, analisando isoladamente as misturas aditivadas com PET verificou-se uma inibição do escorrimento devido à presença deste aditivo.

As misturas asfálticas estudadas mostraram-se bastante suscetíveis ao dano por umidade induzida. Desta forma, acreditasse que, além das características dos agregados utilizados, a metodologia empregada para avaliação do dano por umidade não seja de toda adequada para avaliar misturas asfálticas porosas quanto a essa propriedade, tendo em vista o baixo desempenho verificado para todas as misturas. De todo modo, verificou-se que o PET, mesmo sendo adicionado às misturas via processo seco, contribuiu para minimizar os efeitos deletérios da umidade, uma vez que houve um aumento da resistência à tração retida por umidade induzida para as misturas aditivadas com esse polímero, onde a mistura com 0,50% de PET e CAP 50/70 apresentou o valor mais elevado, superando, inclusive, o resultado da mistura com AMP 55/75-E.

Os módulos de resiliência obtidos foram considerados elevados para misturas asfálticas porosas. Além disso, constatou-se um aumento da rigidez das misturas aditivadas com PET.

Em relação a deformação permanente, foi verificado um alto valor de FN para a mistura com asfalto modificado, confirmando o alto desempenho esperado para misturas com este tipo de ligante. As misturas com ligante convencional apresentaram uma considerável redução do FN, especialmente as misturas aditivadas com PET, diferindo do resultado esperado, haja vista que o enrijecimento das misturas propiciado pela adição de PET deveria tornar as misturas mais resistentes à deformação permanente, conforme demonstra a literatura. Contudo, a análise de deformação permanente em misturas asfálticas porosas é mais apropriada para subsidiar a avaliação de sua funcionalidade após serem submetidas a um determinado número de solicitações de carga. Para tal, deve-se tomar um parâmetro de funcionalidade da mistura asfáltica porosa, como um coeficiente de permeabilidade mínimo, por exemplo, e verificar a partir de quantas solicitações de carga esse mínimo será atingido. Portanto, no caso de misturas asfálticas porosas, ao invés de se determinar diretamente o FN no ensaio *Creep* Dinâmico, deve-se verificar o número

de repetições de carga que resultará no fechamento dos poros da mistura que, conseqüentemente, irá comprometer a funcionalidade da mesma.

As misturas aditivadas com PET apresentaram uma tendência de aumento da vida de fadiga para baixos níveis de tensões e elevadas repetições de carga, condições essas normalmente verificadas em campo, sugerindo que o PET pode contribuir para o aumento de vida de fadiga de misturas asfálticas.

O ensaio de permeabilidade, juntamente com as metodologias utilizadas para avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas, bem como curvas que expressem a relação entre o volume de vazios e a energia de compactação, é responsável pela determinação das características de funcionalidade das misturas asfálticas porosas. A determinação do coeficiente de permeabilidade, portanto, possibilita estabelecer um volume de vazios mínimo que compatibilize funcionalidade e durabilidade na mistura asfáltica. Aliado a isso, pode-se fazer uso das curvas mencionadas anteriormente e determinar o quão suscetível uma determinada mistura é ao fechamento dos poros, ou seja, a capacidade de manter um nível de funcionalidade aceitável durante a vida útil, tendo em vista que o comportamento da mistura asfáltica durante a fase de compactação pode refletir o desempenho da mesma em campo quanto à deformação permanente.

De um modo geral, pode-se inferir que o PET apresenta potencial para ser utilizado como aditivo em misturas asfálticas porosas com ligante asfáltico convencional, alternativamente à utilização de ligante asfáltico modificado por polímero, representando, portanto, uma alternativa mais econômica de pavimentação, tendo em vista o desempenho das misturas asfálticas aqui estudadas e a necessidade de reintroduzir na cadeia produtiva materiais potencialmente nocivos ao meio ambiente, como é o caso do PET. Contudo, é preciso mais estudos no sentido de identificar melhor a efetiva contribuição desse polímero no desempenho das misturas asfálticas, bem como elencar qual granulometria, forma e método de adição, por exemplo, resultam o melhor desempenho.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Realização de ensaios de módulo de resiliência em diferentes temperaturas de maneira a verificar o comportamento quanto à rigidez das misturas sob estas condições, visto o comportamento inesperado das misturas aditivadas com PET em relação à deformação permanente. Alternativamente, avaliar a capacidade das misturas resistirem à

deformação permanente abordando o aspecto funcional, conforme discutido.

- Verificar o comportamento das misturas considerando o envelhecimento do ligante asfáltico, uma vez que misturas asfálticas porosas são naturalmente mais suscetíveis ao desgaste, sendo este influenciado pelo acelerado processo de envelhecimento do ligante asfáltico típico destas misturas.
- Realizar a caracterização do PET como forma de identificar suas propriedades básicas e entender melhor a influência deste material no desempenho das misturas asfálticas. As metodologias de caracterização de polímeros para aplicação em pavimentação incluem, principalmente, ensaios de granulometria, determinação da massa específica e análise das propriedades térmicas para identificação das respectivas temperaturas de ponto de amolecimento e de possíveis mudanças de fase.
- Realizar ensaios de permeabilidade para todas as misturas em quantidades suficiente para se obter resultados confiáveis.
- Avaliar as misturas asfálticas considerando o mesmo teor de projeto de ligante asfáltico e volume de vazios de modo a identificar a efetiva contribuição do PET no desempenho das misturas asfálticas. Além disso, outros métodos de adição desse polímero nas misturas asfálticas devem ser considerados, tendo em vista que o método utilizado nesse trabalho, embora seja mais prático, pode acarretar diversas formas de comportamento desse material, o que dificulta o processo de análise da influência do PET nas propriedades das misturas asfálticas por ele modificadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO T 283 – 1989. **Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage**. Anexo de normas traduzidas – Rede Temática de Ligante asfáltico – PETROBRÁS, outubro de 2010.
- AASHTO T 305 – 1997. **Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures**. Anexo de normas traduzidas – Rede Temática de Ligante asfáltico – PETROBRÁS, outubro de 2010.
- AHMADINIA, E., ZARGAR, M., KARIM, M. R., ABDELAZIZ, M. e AHMADINIA, E. **Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt**. Construction and Building Materials, V. 36, p. 984-989, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015>.
- AHMADINIA, E., ZARGAR, M., KARIM, M. R., ABDELAZIZ, M. e SHAFIGH, P. **Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt**. Materials and Design, V. 32, p. 4844-4849, 2011. DOI:10.1016/j.matdes.2011.06.016.
- AIREY, G. D. **Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens**. Construction and Building Materials, V. 16, p. 473–487. 2002.
- AL-HADIDY, A. I. e YI-QIU, T. **Effect of polyethylene on life of flexible pavements**. Construction and Building Materials, V. 23, p. 1456–1464. 2009a. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.004.
- AL-HADIDY, A. I. e YI-QIU, T. **Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements**. Materials and Design, V. 30, p. 1133–1140, 2009b. DOI:10.1016/j.matdes.2008.06.021.
- ALVAREZ, A. E., MARTIN, A. E. e ESTAKHRI, C. **Drainability of Permeable Friction Course Mixtures**. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 22, p. 556-564, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000053.
- ALVAREZ, A. E., MARTIN, A. E. e ESTAKHRI, C. **Effects of Densification on Permeable Friction Course Mixtures**. Journal of Testing and Evaluation, V. 37, p. 1-10, 2008.
- ASI, I. M. **Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes**. Building and Environment, V. 42, p. 325-329, 2007. DOI:10.1016/j.buildenv.2005.08.020.

ASSIS, S. R. H. **Utilização de agregados de rochas calcárias em misturas asfálticas usinadas a quente.** Dissertação (Mestrado), 135p. Universidade Federal da Paraíba, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184:** Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16018:** Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro, 2011.

ASTM D 7064 –2013. **Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design.**

ATTAELEMANAN, M., FENG, C. P. e AI, A. H. **Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier.** Construction and Building Materials, V. 25, p. 2764–2770. 2011. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037.

AWWAD, M. T. e SHBEEB, L. **The Use of Polyethylene in Hot Asphalt Mixtures.** American Journal of Applied Sciences, V. 4, p. 390-396, 2007.

BARRETT, M. E. **Effects of a Permeable Friction Course on Highway Runoff.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering. V. 134, p. 646-651, 2008. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:5(646).

BENEDETTO, A. e UMILIACO, A. **Evaluation of Hydraulic Permeability of Open-Graded Asphalt Mixes Using a Full Numerical Simulation.** Journal of Materials in Civil Engineering, V. 26, Nº 4, p.599- 606. 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000865.

BERNHARD, R. e WAYSON, R.L. **An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement.** Institute of Safe, Quiet and Durable Highways, Purdue University; 2005.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros,** Rio de Janeiro: Petrobras - Asfaltos, 2008.

BING, S.H., THOMAS, B.K. e LAWRENCE, K.D. **Surface Properties of Cell – Treated Polyethylene Terephthalate**. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, V. 4, Nº.2, p.170-174, 2006.

BORGES, R. L. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do *shift model* viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. Dissertação (Mestrado), 214p. Universidade Federal do Ceará, 2014.

BUDDHAVARAPUA, P., SMIT, A. F. e PROZZI, J. A. **A fully Bayesian before–after analysis of permeable friction course (PFC) pavement wet weather safety**. Accident Analysis and Prevention, V. 80, p. 89–96. 2015.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Dissertação (Mestrado), 153p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

CEZARO JUNIOR, T. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. Dissertação (Mestrado), 130p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

CHEN, J., LI, H., HUANG, X. e WU, J. **Permeability Loss of Open-Graded Friction Course Mixtures due to Deformation-Related and Particle-Related Clogging: Understanding from a Laboratory Investigation**. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 27, Nº 11, p.1- 7. 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001282.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2015: relatório gerencial**. Brasília, 2015.

COOLEY JR, L. A. **Permeability of superpave mixtures: evaluation of field permeameters**. National Center for Asphalt Technology, p. 1-63. 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ES 386: Pavimento – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito: Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2016). Disponível em <http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>. Acesso em 13/01/2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNIT-EM 095:** Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNIT-EM 129:** Cimentos asfálticos de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNER-ME 035:** Agregados: Determinação da abrasão “Los Angeles”: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 043:** Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNER-ME 081:** Agregados: Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNER-ME 083:** Agregados: Análise granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNER-ME 084:** Agregado miúdo – determinação da densidade real: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNER-ME 085:** Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNER-ME 117:** Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNER-ME 383:** Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1999.



DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNIT-ME 136:** Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
**DNER-ME 194:** Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DESCORNET, G. **Criterion for optimizing surface characteristics.** Transp. Res. Rec. 1215, p. 173–177. 1989.

DIAS, S. L. F. G. e TEODÓSIO, A. S. S. **Reciclagem do PET: desafios e possibilidades.** In: XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de Outubro de 2006.

DJAKFAR, L., BOWOPUTRO, H. e TARIGAN, N. **Performance of Recycled Porous Hot Mix Asphalt with Gilsonite Additive.** Hindawi Publishing Corporation, p.1 - 8. 2015. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/316719>.

DUMKE, M. P. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha.** Dissertação (Mestrado), 132p. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

DUNFORD, A. **Friction and the texture of aggregate particles used in the road surface course.** Tese (Doutorado), 286p. *University of Nottingham*, 2013.

FERREIRA, W. L. G., CASTELO BRANCO, V. T. F. e SILVA FILHO, F. C. **Simulação numérica do fluxo d'água em pavimentos flexíveis compostos por diferentes misturas asfálticas.** In: XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (2014). Curitiba/PR – Brasil.

FLINTSCH, G. W., MCGHEE, K. K., IZEPPI, E. L., NAJAFI, S. **The Little Book of Tire Pavement Friction.** Pavement Surface Properties Consortium. 2012.

FM 5-565 –2014. **Florida Method of Test for Measurement of Water Permeability of Compacted Asphalt Paving Mixtures.**

GLOVER, I. C. **Wet and dry aging of polymer-asphalt blends: chemistry and performance.** Dissertação (Mestrado), 172p. Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. 2007.

GOH, S. W. e YOU, Z. **Mechanical Properties of Porous Asphalt Pavement Materials with Warm Mix Asphalt and RAP.** Journal of Transportation Engineering, V. 138, Nº 1, p.90- 97. 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000307.

GUIMARÃES, J. M. F. **Concreto asfáltico drenante em asfaltos modificados por polímero sbs e borracha moída de pneus.** Dissertação (Mestrado), 176p. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

HALL, J. W., SMITH, K. L., GLOVER, L. T., WAMBOLD, J. C., YAGER, T. J. e RADO, Z. **Guide for Pavement Friction.** National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board. 2009.

HAMZAH, M. O. e HARDIMAN. **Characterization of The Clogging Behaviour of Double Layer Porous Asphalt.** Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, V. 6, pp. 968-980. 2005.

HAMZAH, M. O., HASAN, M. R. M. e VEN, M. V. **Permeability loss in porous asphalt due to binder creep.** Construction and Building Materials, V. 30, p. 10–15. 2012. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.038.

HUBER G. **Performance survey on open-graded friction course mixes.** NCHRP Synthesis of Highway Practice 284. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C.; 2000.

JUN, Y. e CHAOEN, Y. **Laboratory Study of Porous Asphalt Mixture Made With Rubber Bitumen.** American Society of Civil Engineers. Vol. 4, nº 349. Pp. 22-31. 2009.

KLENZENDORF, J. B., CHARBENEAU, R., ECK, B. e BARRETT, M. **Measurement and Modeling of Hydraulic Characteristics of Permeable Friction Course (PFC).** American Society of Civil Engineers, p.1- 11, 2011.

KNABBEN, R. M. **Estudo do ruído pneu-pavimento e da absorção sonora em diferentes revestimentos de pavimento.** Dissertação (Mestrado), 251p. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

KOGBARA, R. B., MASAD, E. A., KASSEM, E., SCARPAS, A. e ANUPAM, K. **A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements.** Construction and Building Materials, V. 114, p. 602–617, 2016.

- LEE, J., NAM, B. e ABDEL-ATY, M. **Effects of Pavement Surface Conditions on Traffic Crash Severity**. Journal of Transportation Engineering, p.1- 11, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000785.
- LIAO, G., SAKHAEIFAR, M. S., HEITZMAN, M., WEST, R. WALLER, B., WANG, S. e DING, Y. **The effects of pavement surface characteristics on tire/pavement noise**. Applied Acoustics, Vol. 76. Pp. 14-23. 2014.
- LYONS, K. R. e B. J. PUTMAN. **Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures**. Construction and Building Materials, V. 49, p. 772-780, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.076>.
- LU, Q., LUO, S. e HARVEY, J. **Compaction of Noise-Reducing Asphalt Mixes in the Laboratory**. Geotechnical Special Publication. Nº 213. Pp. 1-9. 2011.
- MALLICK, R. B., KANDHAL, P. S., COOLEY, L. A. e WATSON, D. E. **Design, construction, and performance of new-generation open-graded friction courses**. J. Assoc. Asphalt Paving Technol., 69, 391–423. 2000.
- MANSOUR, T. N. e B. J. PUTMAN. **Influence of Aggregate Gradation on the Performance Properties of Porous Asphalt Mixtures**. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 25, n. 2, p. 281-288, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000602.
- MARTIN, W. D., PUTMAN, B. J. e NEPTUNE, A. I. **Influence of Aggregate Gradation on Clogging Characteristics of Porous Asphalt Mixtures**. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 26, p. 1-7, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000975.
- MAYORA, J. M. P. e PIÑA, R. J. **An assessment of the skid resistance effect on traffic safety under wet-pavement conditions**. Accident Analysis and Prevention, V. 41, p. 881-886, 2009. DOI:10.1016/j.aap.2009.05.004.
- McQUAID, G., MILLAR, P., WOODWARD, D. e FRIEL, S. **Use of close range photogrammetry to assess the micro-texture of asphalt surfacing aggregate**. International Journal of Pavements Conference, p.1-12, 2013.
- MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos, Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

- MODARRES, A. e HAMED, H. **Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes**. Construction and Building Materials, V. 61, p. 8–15. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.046>0261-3069.
- MOHAMMED, D. T. e Z. H. HUSSEIN. **Evaluation of Pyrolysis PET Utilization in Asphalt Binder**. International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering, V. 3, p. 114-121, 2014a.
- MOHAMMED, D. T. e Z. H. HUSSEIN. **Use of Pyrolysis Polyethylene Terephthalate (PET) as Asphalt Modifier in Asphalt Concrete Mix**. International Journal of Science, V. 3, p. 1-6, 2014b.
- MOGHADDAM, T. B., KARIM, M. R., ABDELAZIZ, M. e T. SYAMMAUN. **Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles**. Construction and Building Materials, V. 34, p. 236-242, 2012. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.054.
- MOGHADDAM, T. B., SOLTANI, M. e KARIM, M. R. **Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test**. Construction and Building Materials, V. 53, p. 317–324. 2014a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.015>.
- MOGHADDAM, T. B. e M. R. KARIM. **Properties of SMA Mixtures Containing Waste Polyethylene Terephthalate**. International Scholarly and Scientific Research & Innovation, V. 6, n. 2, p. 1-4, 2012.
- MOGHADDAM, T. B., SOLTANI, M. e KARIM, M. R. **Experimental characterization of rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads**. Construction and Building Materials, V. 65, p. 487–494. 2014b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.006>0950-0618.
- NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação (Mestrado), 227p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- OLIVEIRA, C. G. M. **Estudos de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante**. 2003. 87p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2003.

OLIVEIRA FILHO, C. M. S. **Estudo do efeito de diferentes granulometrias no comportamento mecânico de misturas asfálticas densas descontínuas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA)**. Dissertação (Mestrado), 122p. Universidade Federal do Ceará, 2007.

ONG, G. P. e FWA, T. F. **Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance: Modeling**. Journal of Transportation Engineering, p.1- 9, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:10(590).

PAJE, S. E., BUENO, M., TERÁN, F., VIÑUELA, U. e LUONG, J. **Assessment of asphalt concrete acoustic performance in urban streets**. Acoustical Society of America, V. 123, p. 1439–1445, 2008.

PEREIRA, C.A., SOARES, J.B., PONTES FILHO, I. D. S. e CASTELO BRANCO, V.T.F. **Análise da aderência pneu-pavimento em pontos de ocorrência de acidentes**. Transportes, V. 20, Nº.2, p.1-10, 2012.

PINHEIRO, J. H. M.. **Incorporação De Borracha De Pneu Em Misturas Asfálticas De Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco)**. Dissertação (Mestrado), 166p. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

POLACCO, G., STASTNA, J., BIONDI, D., ANTONELLI, F., VLACHOVICOVA, Z. e ZANZOTTO, L. **Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers**. Journal of Colloid and Interface Science, V. 280, p. 366-373. 2004. DOI:10.1016/j.jcis.2004.08.043.

PUTMAN, B. J. e L. C. KLINE. **Comparison of Mix Design Methods for Porous Asphalt Mixtures**. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 24, n. 11, p. 1359-1367, 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000529.

PUTMAN, B. J. e LYONS, K. R. **Laboratory Evaluation of Long-Term Draindown of Porous Asphalt Mixtures**. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 27, Nº 10, p.1- 7. 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001260.

RAHMAN, W. M. N. W. A. e A. WAHAB. **Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt**. Procedia Engineering, V. 53, p. 124-128, 2013. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.018.

RASMUSSEN, R. O., BERNHARD, R. J., SANDBERG, U., e MUN, E. P. **The Little Book of Quieter Pavements**. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2007.

RIBEIRO e SOUZA, M. V. **Efeito de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos**. Dissertação (Mestrado), 173p. Universidade de Brasília, 2010.

ROSENO, J. L. **Avaliação de uma mistura asfáltica porosa com agregados calcários e asfalto-borracha**. Dissertação (Mestrado), 184p. Universidade de Brasília, 2005.

SANGITA, KHAN, T. A., SABINA e SHARMA, D. K. **Effect of waste polymer modifier on the properties of bituminous concrete mixes**. Construction and Building Materials. V. 25, p. 3841–3848, 2011. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.003.

SHEN, D. H., WU, C. M. e DU, J. C. **Performance evaluation of porous asphalt with granulated synthetic lightweight aggregate**. Construction and Building Materials, V. 22, p. 902–910. 2008. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.008.

SHIMAMOTO, G. G., KAZITORIS, B., LIMA, L. F. R., ABREU, N. D., SALVADOR, V. T., BUENO, M. I. M. S., CASTRO, E. V. R., FILHO, E. A. S. e ROMÃO, W. **Quantificação de antimônio em garrafas de politereftalato de etileno (pet) brasileiras por fluorescência de raios-x e avaliação quimiométrica para verificar a presença de pet reciclado através do teor de ferro**. Quim. Nova, V. 34, Nº 8, p. 1389-1393, 2011.

SURESHA, S. N., GEORGE, V. e A. U. R. SHANKAR. **Effect of aggregate gradations on properties of porous friction course mixes**. Materials and Structures, V. 43, p. 789-801, 2010.

TIAN, B., LIU, Y., NIU, K., LI, S., XIE, J. e M. ASCE, X. L. **Reduction of Tire-Pavement Noise by Porous Concrete Pavement**. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 26, p. 233-239, 2014.

TONG, C. e LI, T. **Car Driving Safety Analysis in Rainy and Snowy Weather Based on ADAMS/Car**. American Society of Civil Engineers, p.2895- 2903, 2015.

UMILIACO, A. e BENEDETTO, A. **Aggregate size distribution and hydraulic permeability**. Airfield and Highway Pavement, p. 1134-1144. 2013.

VALE, A. C. **Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA**. Dissertação (Mestrado), 147p. Universidade Federal do Ceará, 2007.

VARDANEGA, P. J. **State of the Art: Permeability of Asphalt Concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 26, Nº 1, p.1- 11. 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000748.

VASUDEVAN, R., SEKAR, A. R. C., SUNDARAKANNAN, B. e VELKENNEDY, R. **A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements**. Construction and Building Materials, V. 28, p. 311–320. 2012. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.031.

WALLMAN, C. G. e ÅSTRÖM, H. **Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety. A literature review**. Swedish National Road and Transport Research Institute. 2001.

WITCZAK, M. W. **Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting**. National Cooperative Highway Research Program, p. 1-108. 2007.

ZHANG, J., ALVAREZ, A. E., LEE, S. I., TORRES, A. e WALUBITA, L. F. **Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation**. Construction and Building Materials, V. 44, p. 391–398. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.013>.