



Mieka Arao

**Avaliação do Comportamento Mecânico
de Misturas Asfálticas com a Inserção de
Polietileno Tereftalato (PET) Triturado**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof^a Michéle Dal Toé Casagrande
Co-Orientador: Prof. Antonio Carlos Rodrigues Guimarães

Rio de Janeiro
Agosto de 2016



Mieka Arao

Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a Inserção de Polietileno Tereftalato (PET) Triturado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Michéle Dal Toé Casagrande

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Antonio Carlos Rodrigues Guimarães

Co-orientador

Instituto Militar de Engenharia

Profª Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profª Sandra Oda

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Marcio Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de agosto de 2016.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Mieka Arao

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2014. Ingressou no Mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em agosto de 2014, desenvolvendo a dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a pavimentação.

Ficha Catalográfica

Arao, Mieka

Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de polietileno tereftalato (PET) triturado / Mieka Arao; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande ; co-orientador: Antonio Carlos Rodrigues Guimarães. – 2016.

114 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2016.
Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Polietileno Tereftalato (PET). 3. Misturas Asfálticas. 4. Módulo Resiliente. 5. Ensaio de Fadiga. 6. Garrafas PET. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Guimarães, Antonio Carlos Rodrigues. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais Luiza e Seiiti.

Agradecimentos

À minha orientadora, Michéle, por toda ajuda durante todo o período do Mestrado, sempre me mostrando qual melhor caminho a seguir e me acalmando nos momentos em que mais precisei, se tornando uma verdadeira mãe acadêmica.

Ao meu orientador, Guimarães, por me receber no IME de braços abertos, o que tornou este trabalho possível.

Ao Instituto Militar de Engenharia por autorizar a utilização do laboratório da universidade, tornando este trabalho possível.

À Prefeitura do Rio de Janeiro por fornecer o ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa.

Aos meus pais, Luiza e Seiiti, e à minha irmã, Lina, por terem me apoiado incondicionalmente. Sem vocês nada disso seria possível. Muito obrigada!

Aos funcionários do Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do IME, em especial André Paixão, Ciro, Rita, Rossana e Arêdes, por me ajudarem e me ensinarem tudo o que puderam. Obrigada por tudo!

Ao meu namorado, Aloízio, por ser essa pessoa maravilhosa, paciente e que me motiva a ser uma pessoa melhor.

Aos integrantes do "Casagrande's Research Group", que sempre estiveram presentes, mesmo que pelo whatsapp, apoiando em tudo o que era preciso e deixando todo o trabalho mais leve.

Aos amigos que a PUC me deu, principalmente Manoela, Mariana, Nathalia Louzada, Beatriz, Camila e Mauro. Obrigada pelas parcerias nos estudos, nos trabalhos e toda a ajuda que me deram nesses dois anos de Mestrado.

À Sandra Oda, que me introduziu à vida acadêmica. Obrigada por todos os ensinamentos, pela amizade e por ser minha primeira mãe acadêmica.

Às minhas amigas desde o CSA, Juliana Fontes, Juliana Paixão, Laís, Maria Lívia, Pamela e Silje, pela amizade verdadeira ao longo de todos esses anos.

Aos meus amigos da UFRJ, em especial, Bernardo, Bruno, Felipe, Mayara e Raísa. Obrigada pela companhia durante todos esses anos e por continuarem sendo ótimos amigos mesmo após a graduação.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil, em especial à Rita, que sempre com boa vontade nos ajuda a resolver todos os problemas burocráticos.

Aos professores da PUC Rio e da UFRJ com quem eu tive o prazer de ser aluna durante o Mestrado e a Graduação.

Ao CNPq e à PUC pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Arao, Mieka; Casagrande, Michéle Dal Toé; Guimarães, Antonio Carlos Rodrigues. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a Inserção de Polietileno Tereftalato (PET) Triturado.** Rio de Janeiro, 2016. 114p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento de misturas asfálticas do tipo CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) adicionadas com garrafas PET (Polietileno Tereftalato) trituradas em diferentes granulometrias e teores. O filer convencional (pó de pedra) utilizado em misturas asfálticas foi substituído pelo pó proveniente da moagem das garrafas PET, já que o seu elevado ponto de fusão permite a utilização como agregado na mistura. Portanto, foi utilizado o material triturado nos diâmetros 10 mm e 2 mm, nos teores de 0,5% e 1,0% adicionadas ao CBUQ e, também, a substituição de 2,5% do pó de pedra por pó de PET, juntamente com a adição de 0,5% de PET triturado no diâmetro de 10 mm. A partir dos ensaios de caracterização dos agregados (granulometria, durabilidade, densidade, massa específica e abrasão Los Angeles) e do ligante asfáltico CAP 30/45 (densidade específica, penetração, ponto de amolecimento, ductilidade, solubilidade em tricloroetileno e envelhecimento em estufa de filme rotativo), foram feitas as dosagens das misturas asfálticas, pelo método Marshall, e a confecção de corpos de prova, o que possibilitou a realização dos ensaios mecânicos de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e de vida de fadiga. A inserção de PET triturado às misturas de CBUQ foi satisfatória, sendo os resultados dependentes dos teores e das granulometrias das partículas de PET utilizados. Observa-se que o incremento nos parâmetros de resistência e na vida útil das misturas estudadas foi mais efetivo para o CBUQ com 0,5% de PET triturado em 10 mm e com a substituição de 2,5% do filer por pó de PET, na sua composição granulométrica. Portanto, o uso de resíduos de garrafas PET para o melhoramento de misturas asfálticas pode minimizar os problemas atuais disposição do resíduo, contribuir com a redução do consumo de recursos naturais e dar um uso nobre para este material.

Palavras-chave

Polietileno Tereftalato (PET); Misturas Asfálticas; Módulo Resiliente; Ensaio de Fadiga

Abstract

Arao, Mieka; Casagrande, Michéle Dal Toé; Guimarães (Advisor), Antonio Carlos Rodrigues (Co-Advisor). **Evaluation of the Mechanical Behavior of Asphalt Mixtures with Crushed Polyethylene Terephthalate (PET) Insertion.** Rio de Janeiro, 2016. 114p. Msc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This research aims to evaluate the behavior of HMA mixtures (hot mix asphalt concrete) added with PET (Polyethylene Terephthalate) bottles pounded into different particle sizes and concentrations in the mixture. The usual filler (stone dust) was replaced by the powder from the milling of PET bottles, since its high melting point allows the use as an aggregate in the mix. Thus, it was used the material in diameters of 10 mm and 2 mm, in concentrations of 0.5% and 1.0% added in the HMA and, also, the replacement of 2.5% of the stone powder for the PET powder with addition of 0.5% triturated with diameter of 10 mm. From the characterization tests of aggregates (particle sizes, durability, density, Los Angeles abrasion) and asphalt (specific density, penetration, softening point, ductility, solubility in trichloroethylene, RTFOT – rolling thin film oven test), it was made the calculations of the dosage by the Marshall method, production of specimens, which enabled the realization of mechanical tests of Marshall Stability and Flow, Tensile Strength, Resilient Modulus and Fatigue. The insertion of triturated PET was satisfactory, being dependent on the results of the percentages and particle sizes of the PET used. It was observed that the increase in the strength parameters and the useful life of the mixtures studied is more effective for the HMA with 0.5% PET of 10 mm diameter and the substitution of 2.5% of the filler for PET powder in its granulometric compositions. Therefore, the use of PET bottle waste to the improvement of asphalt mixtures can minimize the current problems of waste disposal, contribute to reduce the consumption of natural resources and make a noble use for this material.

Keywords

Polyethylene Terephthalate (PET); Asphalt Mixtures; Resilient Modulus; Fatigue Test

Sumário

1 Introdução	20
1.1. Objetivos da Pesquisa	21
1.2. Estrutura do Trabalho	22
2 Revisão Bibliográfica	23
2.1. Pavimentos Rodoviários	23
2.2. Revestimento Asfáltico	23
2.3. Ligantes asfálticos	24
2.4. Agregados utilizados em misturas asfálticas	25
2.4.1. Classificação dos agregados	25
2.5. Misturas Asfálticas	26
2.5.1. Aspectos Gerais	26
2.5.2. Dosagem de Misturas Asfálticas	27
2.6. Principais Defeitos nos Pavimentos	31
2.6.1. Deformação Permanente nas Trilhas de Rodas	32
2.6.2. Trincas no Revestimento Asfáltico	33
2.7. Polietileno Tereftalato (PET)	34
2.7.1. Aspectos Gerais	34
2.7.2. Reciclagem do Polietileno Tereftalato	36
2.7.3. Legislação relacionado ao uso de PET	39
2.8. Misturas Asfálticas com Utilização de Polímeros	39
2.9. Utilização de Polímeros para Melhoramento da Propriedades de Materiais	42
2.10. Considerações Finais	46
3 Programa Experimental	47
3.1. Materiais	47
3.1.1. Agregados	47
3.1.2. Ligante asfáltico	48
3.1.3. Flakes de PET	48

3.1.4. Pó de PET	51
3.2. Métodos	52
3.2.1. Caracterização dos Materiais	54
3.2.2. Definição do teor ótimo	64
3.2.3. Execução dos ensaios mecânicos	68
3.2.4. Dimensionamento do Pavimento	74
4 Resultados e Discussões	77
4.1. Caracterização dos Agregados	77
4.2. Caracterização do Ligante Asfáltico	80
4.3. Caracterização do PET	81
4.4. Determinação do Teor Ótimo	83
4.5. Compactação Marshall	84
4.5.1. Parâmetros volumétricos	85
4.6. Ensaio mecânicos	86
4.6.1. Estabilidade e Fluência Marshall	86
4.6.2. Resistência à Tração	88
4.6.3. Módulo de Resiliência	89
4.6.4. Vida de Fadiga	92
4.7. Dimensionamento do pavimento	100
4.8. Estimativa de quantidade de PET a ser utilizado na pavimentação	102
5 Conclusões	103
5.1. Sugestão para Trabalhos Futuros	105
6 Referências bibliográficas	107

Lista de figuras

Figura 2.1 - Moldagem de corpos de prova tipo Marshall	28
Figura 2.2 – Medida das dimensões do CP e do Gmb	29
Figura 2.3 – Ensaio de Estabilidade e Fluência	30
Figura 2.4 – Vv e RBV vs Teor de Asfalto (Bernucci <i>et al.</i> , 2008)	31
Figura 2.5 – Deformação permanente nas trilhas de roda (Fontes, 2009)	32
Figura 2.6 – Trincas isoladas (Fontes, 2009)	33
Figura 2.7 – Trincas do tipo couro de crocodilo (Fontes, 2009)	34
Figura 2.8 – Síntese do Polietileno Tereftalato	36
Figura 2.9- Composição da produção nacional de termoplásticos e sua geração no RSU Brasileiro em 2005 (Abiplast, 2008).	37
Figura 2.10- Índice de Reciclagem de embalagens PET pós-consumo em 2011 (Fonte: CEMPRES)	38
Figura 3.1 – Amostras dos agregados utilizados	47
Figura 3.2 – Garrafas PET limpas e com sua base e seu topo cortados	48
Figura 3.3 – Equipamento utilizado para triturar as garrafas PET: (1) Topo onde colocam-se as garrafas de PET; (2) Lâminas que trituram as garrafas; (3) Caixa em que se coletam os flakes de PET (Louzada, 2015)	49
Figura 3.4 – Peneira de 10 mm e os flakes de 10 mm	50
Figura 3.5 – Peneira de 2 mm e os flakes de PET de 2 mm	50
Figura 3.6 – Pó de PET utilizado nesta pesquisa	51
Figura 3.7 – Fluxograma das principais etapas da pesquisa	52
Figura 3.8 – Equipamento utilizado no ensaio de Abrasão Los Angeles (Cavalcanti, 2010)	55
Figura 3.9 – Representação de uma partícula de agregado sem preenchimento dos poros (Cavalcanti, 2010)	57
Figura 3.10 – Representação de uma partícula de agregado com vazios preenchidos com água e asfalto e coberto em toda a	

superfície por uma película de ligante (Cavalcanti, 2010)	58
Figura 3.11 – Representação de uma partícula de agregado com poros permeáveis à água, porém, não ao asfalto	58
Figura 3.12 – Equipamentos de Equivalente de areia (Valadares, 2016)	59
Figura 3.13 – Equipamento AIMS do CENPES/Petrobrás (Nascimento, 2015)	60
Figura 3.14 – Equipamento do ensaio de Penetração	61
Figura 3.15 – Viscosímetro Brookfield (Valadares, 2016)	62
Figura 3.16 – Ensaio de Ponto de Amolecimento	62
Figura 3.17 – Forno RTFOT (Cavalcanti, 2010)	63
Figura 3.18 – Compactador Marshall utilizado nesta pesquisa	65
Figura 3.19 – Equipamento do Ensaio Rice	66
Figura 3.20 – Ensaio de massa específica aparente (Gmb)	67
Figura 3.21 – Prensa Marshall utilizada nesta pesquisa	69
Figura 3.22 – Esquema do ensaio de RT por compressão diametral (DNER-ME 138/94)	70
Figura 3.23 – Equipamento de Resistência à Tração	70
Figura 3.24 – Equipamento utilizado para o Ensaio de Módulo de Resiliência	71
Figura 3.25 – Equipamento utilizado para o ensaio de vida de fadiga	74
Figura 3.26 – Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento (Franco, 2007)	75
Figura 3.27 – Estrutura do pavimento adotado na pesquisa	76
Figura 4.1 – Curva Granulométrica dos agregados	78
Figura 4.2 – Curva granulométrica final da mistura estudada	79
Figura 4.3 – Curva Viscosidade vs Temperatura	81
Figura 4.4 – Curvas Granulométricas do PET	82
Figura 4.5 – Gráfico Vv e RBV vs Teor de Ligante, com os valores de X1, X2, X3 e X4 marcados no gráfico.	84
Figura 4.6 – Resultados dos ensaios de Estabilidade Marshall	87
Figura 4.7 – Resultados dos ensaios de Fluência Marshall	87

Figura 4.8 – Resultados dos ensaios de RT	88
Figura 4.9 – Resultados dos ensaios de MR para cada mistura	91
Figura 4.10 – Gráfico Número de Aplicações vs Diferença de Tensões de M1	93
Figura 4.12 – Gráfico Número de Aplicações vs Diferença de Tensões de M2	94
Figura 4.13 - Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M2	94
Figura 4.14 – Gráfico Número de Aplicações vs Diferença de Tensões de M3	95
Figura 4.15 – Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M3	95
Figura 4.16 – Gráfico Número de Aplicações vs Diferença de Tensões de M4	96
Figura 4.17 – Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M4	96
Figura 4.18 – Número de aplicações vs Diferença de tensões da mistura M5	97
Figura 4.19 – Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M5	97
Figura 4.21 – Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M6	98
Figura 4.22 – Gráfico com as curvas de vida de fadiga (N vs $\Delta\sigma$) de todas as misturas	99
Figura 4.23 – Gráfico com as curvas de vida de fadiga (N vs ϵ_r) de todas as misturas	99

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Termos aplicáveis a camadas de revestimento asfáltico (Balbo, 2007)	24
Tabela 2.2 – Limites dos parâmetros Vv e RBV	31
Tabela 2.3 – Principais Características do Polietileno Tereftalato (Mano e Mendes, 2001)	36
Tabela 2.4 – Resultado dos Ensaios Volumétricos	45
Tabela 2.5 – Resultados dos Ensaios Mecânicos	45
Tabela 3.1 – Quantidade de corpos de prova confeccionados para a pesquisa	54
Tabela 3.2 – Ensaios de caracterização dos agregados	54
Tabela 3.3 – Faixas Granulométricas de agregados para misturas asfálticas densas	56
Tabela 3.4 – Métodos utilizados para os ensaios de caracterização do CAP	60
Tabela 3.5 – Limites dos parâmetros volumétricos e mecânicos para a Dosagem Marshall	68
Tabela 4.1 -Resultado dos ensaios de caracterização dos agregados	77
Tabela 4.2 – Granulometria dos agregados	78
Tabela 4.3 – Proporção de cada agregado e granulometria enquadrada na Faixa C do DNIT	79
Tabela 4.4 – Resultados do ensaio AIMS (Nascimento, 2015)	80
Tabela 4.5 – Resultado dos ensaios de caracterização do Ligante	80
Tabela 4.6 – Porcentagem passante do PET utilizado na pesquisa	82
Tabela 4.7 – Parâmetros volumétricos e mecânicos para cálculo do teor ótimo de ligante	83
Tabela 4.8 – Quantidade de material em cada mistura em porcentagem	85

Tabela 4.9 – Tabela comparativa entre os parâmetros volumétricos encontrados em cada mistura.	86
Tabela 4.10 – Tabela com os resultados do ensaio de MR em Mpa e os parâmetros estatísticos do Teste de Grubbs	90
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de MR e RT e a relação MR/RT	92
Tabela 4.12 – Parâmetros das curvas de vida de fadiga	100
Tabela 4.13 – Vida útil estimada para cada mistura	101
Tabela 4.14 – Quantidade de PET utilizada por quilômetro de uma rodovia	102

Lista de Abreviações

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – Acrilonito-butadieno-estireno

AIMS – Aggregate Imaging System

ANP – Agência Nacional do Petróleo

ASTM – American Society for Testing and Materials

BHET – Tereftalato de bis(2-hidroxietileno)

CA – Concreto Asfáltico

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CP – Corpo de Prova

CPA – Camada Porosa de Atrito

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem

CENPES – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello

CR – Crumb Rubber (borracha de pneu moído)

DMT – Densidade Máxima Teórica

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EVA – Etileno Acetato de Vinila

IME – Instituto Militar de Engenharia

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

MR – Módulo de Resiliência

NBR – Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

PE – Polietileno

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PELBD – Polietileno de Baixa Densidade Linear

PET – Polietileno Tereftalato

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PUC – Pontifícia Universidade Católica

PVC – Poli(cloreto) de vinila

RBV – Relação Betume Vazios

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RT – Resistência à Tração

RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test

SBS – Estireno-butadieno-estireno

SHRP – Strategic Highway Research Program

SMA – Stone Matrix Asphalt

SUPERPAVE – Superior Performing Asphalt Pavements

TNT – Tecido não Tecido

VAM – Volume de Agregados Minerais

VCB – Vazios com Betume

V_v – Volume de Vazios

Lista de Símbolos

g/cm^3 - grama por centímetro cúbico

%RT – Níveis de Tensões de Resistência à Tração

Δ - Deformação Elástica ou Resiliente

$\Delta\sigma$ – Diferença de Tensões no centro do corpo de prova

A – Porcentagem passada na peneira 4,76 mm e retida na 0,297 mm

a – Porcentagem na peneira 0,297 mm e retida na 0,075 mm

D – Diâmetro dos corpos de prova

dam – Densidade Real média ponderada dos agregados

Ecorrigida – Estabilidade Corrigida

Elida – Estabilidade Lida

f – Porcentagem passada na peneira 0,075mm e constante do anel dinamométrico

F – Carga utilizada nos ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência

G – Porcentagem retida na peneira 9,52 mm

g – Porcentagem passada peneira 9,52 mm e retida na 4,76 mm

Ga – Densidade do Asfalto

Gmb – Densidade Específica Aparente

Gmm – Densidade Máxima da Mistura

Gsa – Densidade Real dos Agregados

Gsb – Densidade Aparente dos Agregados

Gse – Massa Específica Aparente dos Agregados

H – Altura dos corpos de prova

k1 – Constante determinada experimentalmente no ensaio de fadiga

k2 – Constante determinada experimentalmente no ensaio de fadiga

M – Módulo de Riqueza

m^2/kg – metro quadrado por quilograma

N – Número de Aplicações de carga no ensaio de fadiga

n1 – Constante determinada experimentalmente no ensaio de fadiga

n_2 – Constante determinada experimentalmente no ensaio de fadiga

P_{ca} - Porcentagem de asfalto em relação à mistura

S – Superfície Específica de Agregado

T_{ca} – Teor de betume em relação a massa de agregado

T'_{ca} – Teor de asfalto corrigido devido à densidade do agregado mineral

ϵ_i – Deformação Específica Resiliente

μ – Coeficiente de Poisson

σ_t – Tensão de Tração

1

Introdução

Os materiais plásticos estão muito presentes na vida cotidiana e seu uso tem aumentado em todo o mundo e, portanto, a preocupação de se encontrar uma destinação final adequada para esses materiais tem estimulado novas pesquisas. Dentre os resíduos sólidos mais comuns existe o Polietileno Tereftalato (PET), que é muito encontrado em garrafas de bebidas.

No Brasil, o consumo de garrafas PET tem aumentado ano a ano e, segundo a ABIPET (Associação Brasileira da Indústria do PET), serão utilizados cerca de 840 kilotoneladas de PET em 2016, estimulado pelos Jogos Olímpicos que ocorrerão na cidade do Rio de Janeiro, porém, apenas metade desse material deve ser reciclado. A utilização de PET reciclado é limitada, já que o Ministério da Saúde proíbe o contato direto do material reciclado com bebidas, remédios, alimentos, brinquedos e utensílios médicos.

A reutilização de resíduos sólidos minimiza os impactos ambientais e também diminui a quantidade de matéria-prima utilizada, preservando os recursos naturais e diminuindo, assim, os impactos ambientais. Muitas cidades no Brasil estão realizando planos para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos com leis e políticas visando a reciclagem dos materiais. A inclusão de materiais alternativos na pavimentação muitas vezes diminui os custos da construção e melhora seu comportamento mecânico, estimulando cada vez mais pesquisas e investimentos nestes materiais.

A melhora do comportamento mecânico dos pavimentos tem sido constantemente buscada, já que a frota de veículos apresenta um crescimento muito alto, causando engarrafamentos que acabam exigindo mais da estrutura do pavimento, não só pelo volume, mas também pela baixa velocidade. Assim, para evitar o aparecimento de defeitos precoces no pavimento, são pesquisados novos materiais para aperfeiçoar o seu comportamento.

A utilização de polímeros reutilizados na pavimentação é uma medida comum, como, por exemplo, a modificação de ligantes asfálticos com borrachas de

pneu triturados. Porém, a adição de PET na mistura asfáltica ainda não foi muito estudada e se mostra muito promissora, já que o PET é um material inerte, resistente e com boa estabilidade química. Assim, para dar este uso alternativo do PET, é extremamente necessário pesquisar seu comportamento mecânico nas misturas asfálticas.

Esta pesquisa visa estudar a viabilidade da adição do resíduo de PET nas misturas asfálticas, a partir de ensaios laboratoriais. Esta medida pode contribuir para minimizar os impactos ambientais causados pela disposição final inadequada deste material e, além disso, melhorar o comportamento mecânico do revestimento asfáltico.

1.1.

Objetivos da Pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a viabilidade técnica da inserção de resíduos de PET em uma mistura asfáltica do tipo CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado à Quente). Para alcançar este objetivo, foram realizados ensaios mecânicos da mistura convencional e das misturas com adição de PET.

Portanto, a partir do objetivo principal, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar os ensaios de caracterização dos materiais utilizados (agregados e ligantes asfálticos);
- Determinar a dosagem da mistura asfáltica do tipo CBUQ, sem e com inserção de PET triturado (também chamados de flakes de PET) e substituição do filler por pó de PET, para encontrar o teor ótimo de ligante das misturas;
- Determinar os parâmetros volumétricos, como volume de vazios e relação betume vazios;
- Analisar o comportamento mecânico das misturas através dos ensaios de Estabilidade, Fluência, Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Fadiga;
- Simular o dimensionamento do pavimento para avaliar o comportamento das misturas confeccionadas.

- Analisar a influência do diâmetro do PET triturado (10 mm e 2 mm) e o teor de PET inserido na mistura (0,5% e 1,0%), bem como a substituição de 2,5% de pó de pedra por pó de PET na granulometria da mistura.

1.2.

Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos assim distribuídos:

a) Capítulo 1: Introdução

São apresentados os aspectos gerais, a importância da pesquisa e os objetivos gerais e específicos e, também, como o estudo será apresentado.

b) Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Apresenta-se a revisão da literatura sobre os assuntos que foram abordados durante o trabalho como os materiais usados em pavimentação, método de dosagem, ensaios volumétricos mecânicos, defeitos em pavimentos e, também, o sobre o Polietileno Tereftalato (PET), suas principais características, seus impactos no meio ambiente e seu uso na pavimentação.

c) Capítulo 3: Programa Experimental

Apresentação do procedimento experimental utilizado na pesquisa, descrevendo os materiais e métodos adotados de acordo com as normas.

d) Capítulo 4: Resultados e Discussões

São mostrados os resultados obtidos da caracterização dos materiais, ensaios volumétricos e mecânicos realizados nas diferentes misturas. Os resultados foram analisados, de modo que se observe as diferenças nos comportamentos das misturas adicionadas com PET.

e) Capítulo 5: Considerações Finais

As conclusões obtidas são apresentadas baseadas nos resultados dos ensaios e também são mostradas recomendações para trabalhos futuros.

2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados os assuntos principais para o melhor entendimento deste trabalho, como os pavimentos flexíveis e seus materiais mais empregados e, também, uma revisão sobre pesquisas que utilizam polímeros na pavimentação asfáltica. Serão apresentadas as características principais e o histórico do PET, assim como o cenário da reciclagem desse polímero.

2.1.

Pavimentos Rodoviários

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída acima de uma superfície de terraplenagem com o objetivo de resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima e propiciar conforto, segurança, economia, segurança e condições de rolamento aos usuários.

Existem dois tipos de pavimentos rodoviários: rígidos e flexíveis. O primeiro possui um revestimento superficial feito de uma placa de concreto de cimento Portland. Já os pavimentos flexíveis são compostos geralmente por uma estrutura formada por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e subleito. O revestimento é composto por agregados e ligantes asfálticos.

2.2.

Revestimento Asfáltico

O revestimento asfáltico é a camada superficial que tem como funções resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de conforto e segurança do pavimento. Os revestimentos são constituídos por uma associação entre agregados e ligantes asfálticos.

Segundo Balbo (2007), os revestimentos podem ser subdivididos em duas ou mais camadas, por motivos técnicos, construtivos ou de custo. Assim, é possível encontrar outras nomenclaturas para descrever um revestimento, como, por

exemplo, “camada de rolamento” e “camada de ligação”. A Tabela 2.1 mostra as diferentes terminologias utilizadas no meio rodoviário.

Tabela 2.1 – Termos aplicáveis a camadas de revestimento asfáltico (Balbo, 2007)

Designação do Revestimento	Definição
Camada de Rolamento	É a camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e com ações ambientais.
Camada de Ligação	É a camada intermediária, também em mistura asfáltica, entre a camada de rolamento e a base do pavimento.
Camada de Nivelamento	É a primeira camada de mistura asfáltica empregada na execução de reforços (recapeamento), cuja função é corrigir os desníveis em pista, afundamentos localizados.
Camada de Reforço	Nova camada de rolamento, após anos de uso do pavimento existente, executada por razões funcionais, estruturais ou ambas.

2.3. Ligantes asfálticos

O asfalto utilizado em revestimentos asfálticos é um ligante betuminoso proveniente da destilação do petróleo e possui a propriedade de ser um adesivo termoviscoplástico, impermeável à água e pouco reativo. No Brasil, é utilizada a nomenclatura CAP (cimento asfáltico de petróleo) para designar este produto (Bernucci *et al.*, 2008).

O CAP é um produto semi-sólido a temperatura baixa, viscoelástico na temperatura ambiente e líquido em temperaturas altas e, também, comporta-se como líquido newtoniano em temperaturas próximas a 100 °C e pseudoplástico em temperaturas entre 25 °C e 60 °C (Cavalcanti, 2010).

O cimento asfáltico de petróleo sofre transformações químicas quando expostos à radiação solar, às águas ácidas ou sulfatadas, às ações de óleos, graxas, lubrificantes e combustíveis de veículos. Essas ações provocam um processo de oxidação, que também é conhecido como envelhecimento (Balbo, 2007).

2.4.

Agregados utilizados em misturas asfálticas

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

Na pavimentação, os agregados mais utilizados são materiais rochosos provenientes de pedreiras, porém, outros tipos de agregados têm sido pesquisados, apresentando bons resultados, como as escórias, laterita e argila calcinada. As propriedades químicas dos agregados causam pequenos efeitos em seu desempenho, porém, o efeito é significativo se for levado em consideração a adesão do asfalto ao agregado. A falta de adesividade pode causar defeitos no pavimento, como a desagregação. Para evitar este problema, alguns materiais são utilizados, como a utilização da cal e aditivos melhoradores de adesividade, que são conhecidos como dopes (Cavalcanti, 2010).

2.4.1.

Classificação dos agregados

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

a) Classificação quanto à natureza:

- Agregados Naturais: são obtidos pela britagem de rochas ou por obtenção convencional de desmontagem, escavação e dragagem;
- Agregados Artificiais: obtidos através de processos industriais, fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho ou, também, como alternativa para regiões onde há dificuldade de se obter agregados com características definidas (escória de alto-forno e de aciaria, argila calcinada ou expandida);

- b) Classificação quanto ao tamanho: regida pela norma DNIT ES 031/04
- Agregado Graúdo: material com dimensões maiores que 2 mm, isto é, peneira nº 10 (Brita 1, seixos);
 - Agregado Miúdo: material com dimensões entre 2 mm e 0,075 mm, ou seja, entre as peneiras nº 10 e nº 200 (Areias, pó de pedra);
 - Filler ou Agregados de Enchimento: material em que passa pelo menos 65% das partículas pela peneira nº 200 (cal, cimento Portland, cinzas).
- c) Classificação quanto à graduação
- Graduação Densa: apresentam uma distribuição granulométrica contínua e próxima da densidade máxima, com material fino suficiente para preencher os vazios das partículas maiores;
 - Graduação Aberta: possuem uma distribuição granulométrica contínua, porém com falta de material fino, que resulta em maior volume de vazios;
 - Graduação Uniforme: apresentam uma curva granulométrica muito íngreme devido aos tamanhos das partículas serem muito próximos;
 - Graduação Descontínua: agregados em que sua curva granulométrica apresenta um patamar devido à pequena quantidade de partículas de tamanho intermediário;

2.5. Misturas Asfálticas

2.5.1. Aspectos Gerais

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

As misturas a quente se distinguem de acordo com o padrão granulométrico empregado e as exigências mecânicas. Um dos tipos mais empregados no Brasil é o concreto asfáltico (CA), também conhecido como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), que consiste no produto da mistura convenientemente

proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante (Bernucci *et al.*, 2008).

As misturas a quente são subdivididas em três, pela graduação dos agregados graúdos, miúdos e fíler: a graduação densa, que possui uma curva granulométrica contínua e bem-graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios (CBUQ); graduação aberta, que tem curva granulométrica uniforme com agregados com tamanhos similares e insuficiência de material fino (camada porosa de atrito, CPA); graduação descontínua com curva granulométrica com grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias (gap-graded).

As misturas feitas em usinas estacionárias próprias são os pré-misturados a frio. O ligante que envolve os agregados são as emulsões asfálticas e também são proporcionados de forma conveniente de acordo com os requisitos especificados. Nesse caso não há o aquecimento dos agregados (Bernucci *et al.*, 2008).

2.5.2. Dosagem de Misturas Asfálticas

A dosagem de misturas asfálticas consiste na escolha, através de métodos empíricos, de um teor ótimo de ligante, a partir de uma faixa granulométrica pré-definida. O teor de ligante varia de acordo com o método de dosagem.

O método mais antigo é o Marshall, que faz a compactação da mistura por impacto. A partir da década de 1980, várias rodovias norte-americanas apresentaram problemas prematuros de deformação permanente. Assim, foi realizado um estudo denominado Strategic Highway Research Program (SHRP), que resultou em um novo método de dosagem: o Superpave. A compactação no Superpave é feita por amassamento da mistura (Bernucci *et al.*, 2008).

Apesar disso, o método de dosagem Marshall de misturas asfálticas (DNER-ME-043/95) ainda é a metodologia mais utilizada no Brasil. A recomendação é que a compactação seja feita por 50 golpes para pressão de pneu até 7 kgf/cm² e de 75 golpes para uma pressão de 7 kgf/cm² a 14 kgf/cm².

Segundo Bernucci *et al.* (2008), os procedimentos para a determinação dos parâmetros gerados para a dosagem Marshall do CBUQ são:

- 1) Determinação das massas específicas reais do CAP e dos agregados;
- 2) Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada na mistura (faixas A, B e C, segundo o DNIT);
- 3) Escolha da composição dos agregados para que enquadrem na faixa granulométrica escolhida;
- 4) Escolha das temperaturas de mistura e compactação através da curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido. A temperatura do ligante na hora de ser adicionado à mistura deve ser quando a sua viscosidade rotacional for de 150 a 190 cP. A temperatura dos agregados deve ser 10°C a 15°C acima da temperatura do ligante e a temperatura de compactação deve ser tal qual o ligante apresente sua viscosidade igual a 250 cP a 310 cP;
- 5) Adoção de teores de asfalto para diferentes grupos de corpos de provas a serem moldados. Cada grupo deve ter no mínimo 3 CPs. Conforme a experiência do projetista, escolhe-se um teor T (%) para o primeiro grupo de CPs, os outros grupos terão teores de asfalto acima ($T+0,5\%$, $T+1,0\%$) e abaixo ($T-0,5\%$, $T-1,0\%$). Os CPs são moldados conforme a Figura 2.1.

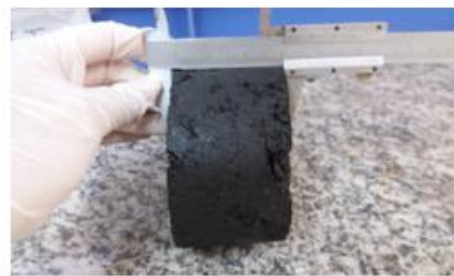


Figura 2.1 - Moldagem de corpos de prova tipo Marshall

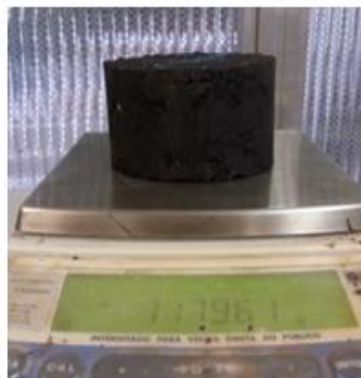
- 6) Após o resfriamento e desmoldagem dos CPs, obtêm-se as suas dimensões. Determinam-se para cada CP a sua massa seca, massa submersa e massa úmida para o cálculo do G_{mb} (massa específica aparente), conforme a sequência da Figura 2.2, e, usualmente, compara-se com a Densidade Máxima Teórica (DMT). Porém, neste trabalho, optou-se por utilizar a Densidade Máxima Medida (G_{mm}), dada pelo ensaio Rice. Assim, encontram-se os parâmetros volumétricos para a dosagem.



(a) Medida do diâmetro do CP



(b) Medida da altura do CP



(c) Peso seco do CP



(d) Peso submerso do CP

Figura 2.2 – Medida das dimensões do CP e do G_{mb}

- 7) Os CPs são mergulhados em banho a 60°C durante 40 minutos para a realização dos ensaios de Estabilidade e Fluência, por meio da prensa Marshall (Figura 2.3). A Estabilidade é a carga máxima que o CP resiste antes da ruptura. A Fluência é o deslocamento na vertical apresentado pelo CP correspondente à aplicação de carga máxima.



(a) Banho para a realização dos ensaios de Estabilidade e Fluência



(b) Prensa Marshall

Figura 2.3 – Ensaio de Estabilidade e Fluência

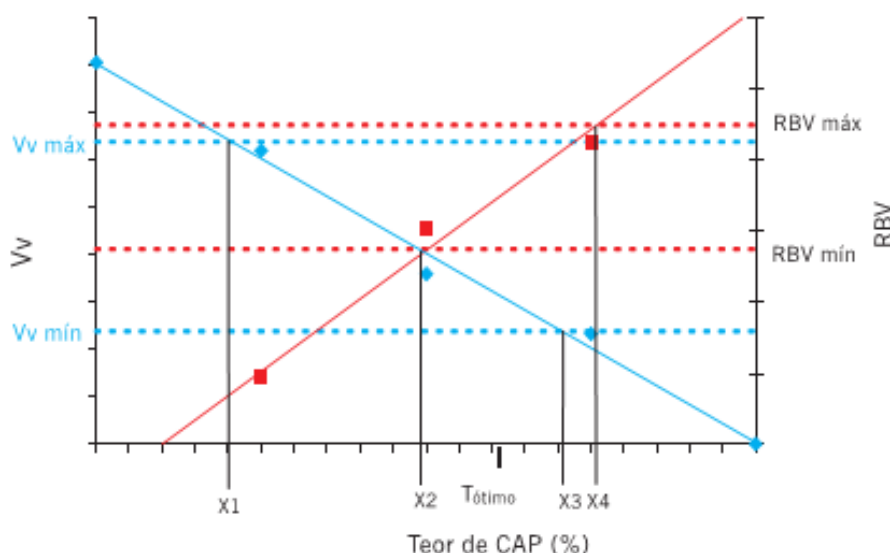
- 8) Assim, com todos os dados, são traçadas as curvas de variação da densidade, estabilidade, fluência, volume de vazios, vazio de agregados minerais e a relação betume vazios em função dos teores de ligantes.

A determinação do teor ótimo de projeto é baseada no volume de vazios igual a 4%. É comum também a escolha se dar a partir da estabilidade Marshall e da massa específica aparente.

Um critério muito escolhido é utilizando somente os parâmetros de volume de vazios (V_v) e da relação betume vazios (RBV). É obtido os valores de V_v e RBV dos cinco grupos de corpo de prova e, assim, traça-se um gráfico V_v e RBV vs Teor de ligante (Figura 2.4). Adicionam-se as linhas de tendência para os valores encontrados dos dois parâmetros. O gráfico deve conter os limites das duas variáveis, como mostrados na Tabela 2.2. Na intersecção das linhas de tendência do V_v e do RBV, dentro dos limites de cada parâmetro, são determinados os quatro teores de CAP (X_1 , X_2 , X_3 e X_4). O teor ótimo é a média dos dois teores centrais, isto é, $(X_2+X_3)/2$.

Tabela 2.2 – Limites dos parâmetros Vv e RBV

Faixas	Vv (%)		RBV (%)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
A	4	6	65	72
B e C	3	5	75	82

Figura 2.4 – Vv e RBV vs Teor de Asfalto (Bernucci *et al.*, 2008)

2.6. Principais Defeitos nos Pavimentos

A vida útil do pavimento deve ser preservada e prolongada, já que a produtividade de estradas e rodovias é de extrema importância para a economia de um país. O aparecimento de degradações em pavimentos flexíveis diminui a sua qualidade, assim, a detecção desses defeitos em estágios iniciais e a determinação de suas causas são necessárias para que sejam tomadas decisões efetivas, de modo que se mantenha a qualidade funcional e estrutural do pavimento durante o período para que foi projetado (Fontes, 2009).

As condições ambientais, capacidade de suporte das camadas do pavimento, a qualidade dos materiais empregados e do processo construtivo, volume de tráfego e a carga por eixo do caminhão são os fatores que variam a velocidade de deterioração de um pavimento (Fontes, 2009). Os defeitos mais frequentes nos

pavimentos brasileiros são o aparecimento de deformações permanentes nas trilhas de roda e o desenvolvimento de trincas no revestimento asfáltico (DNIT, 2006).

2.6.1. Deformação Permanente nas Trilhas de Rodas

As deformações permanentes são as deformações causadas pela a ação de cargas de tráfego em pavimentos flexíveis que permanecem mesmo após cessar a aplicação da carga, ou seja, possuem um caráter residual. O seu desenvolvimento se caracteriza pelo aumento da sua profundidade e no aparecimento de outros defeitos, como o surgimento de cordões laterais longitudinais de mistura asfáltica da camada de desgaste, devido à fluência do material. As deformações desenvolvem-se com o aumento das solicitações de cargas por eixo e aparecem como depressões longitudinais nas trilhas de roda (Fontes, 2009). A Figura 2.5 mostra um exemplo de deformação permanente nas trilhas de roda.



Figura 2.5 – Deformação permanente nas trilhas de roda (Fontes, 2009)

O fenômeno da deformação permanente é um processo complexo, pois envolve propriedades e proporções de cada um dos componentes de uma mistura asfáltica. A deformação permanente acontece mais frequentemente no verão, já que as altas temperaturas diminuem a viscosidade do ligante, fazendo com que o tráfego seja suportado pelos agregados minerais da mistura. Portanto, a resistência à

deformação permanente pode ser considerada como uma combinação de resistência do ligante e do agregado (Fontes, 2009).

2.6.2. Trincas no Revestimento Asfáltico

As trincas no revestimento asfáltico podem ser consideradas os defeitos mais comuns nos pavimentos flexíveis. O fenômeno de fadiga causa a maior parte das trincas, devido às ações repetidas de esforço de tração por flexão da camada de revestimento.

As trincas por fadiga geralmente iniciam-se na parte inferior do revestimento asfáltico e propagam-se até a superfície do pavimento. É comum elas surgirem nas trilhas de roda na direção longitudinal da via (Figura 2.6). O seu estágio final são as trincas do tipo couro de crocodilo (Figura 2.7), pois são caracterizadas pela evolução das trincas longitudinais isoladas para as trincas ramificadas.

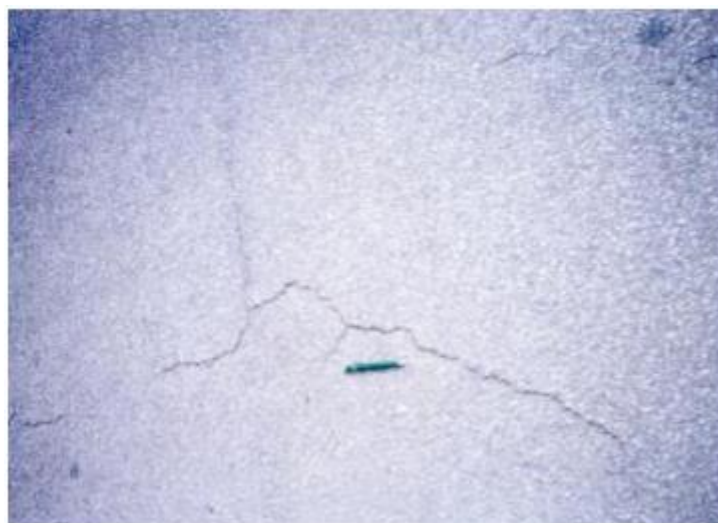


Figura 2.6 – Trincas isoladas (Fontes, 2009)



Figura 2.7 – Trincas do tipo couro de crocodilo (Fontes, 2009)

2.7. Polietileno Tereftalato (PET)

2.7.1. Aspectos Gerais

O Polietileno Tereftalato, também conhecido pelo nome PET, é um polímero termoplástico que possui uma estrutura parcialmente alifática e aromática, semicristalino e faz parte da família dos poliésteres. Sua nomenclatura oficial é poli(oxitereftaloíla de oxietileno).

Os termoplásticos são polímeros que possuem a capacidade de se tornarem fluidos com o aquecimento e, após o resfriamento, voltam ao seu estado inicial sem nenhuma alteração de propriedade. Essa característica permite que os termoplásticos sejam moldados e reciclados sem afetar suas propriedades físicas (Giraldi, 2008). Algumas vantagens do PET sobre os outros tipos de termoplásticos são: estabilidade térmica, facilidade de processamento, estabilidade química e hidrolítica, causada pela presença de anéis aromáticos, alta resistência mecânica mesmo a temperaturas elevadas, leveza, brilho e transparência e baixo custo de produção (Romão *et al.*, 2009).

O PET foi produzido pela primeira vez por dois químicos britânicos, John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, em 1941, e apresenta alta temperatura de fusão (em torno de 265 °C) e estabilidade hidrolítica, causado pela presença de anéis

aromáticos em sua cadeia principal, pois dificultam a entrada de materiais que possam degradá-lo (Romão *et al.*, 2009).

Inicialmente o PET era utilizado como fibras para a fabricação de tecidos, já que, após a Segunda Guerra Mundial, o desabastecimento afetou a indústria têxtil, cuja produção era baseada em fibras de algodão, linho e lã. Assim, o poliéster foi uma alternativa viável para substituir os materiais convencionais empregados na época. A partir de 1970, as primeiras garrafas de PET foram fabricadas nos Estados Unidos e na Europa. No Brasil, o PET só começou a ser utilizado em 1988 apenas na indústria têxtil. Foi apenas na década de 1990 que o PET começou a ser vastamente utilizado no mercado de embalagens, com uma produção mundial em torno de $2,4 \times 10^{10}$ kg. Atualmente, no Brasil, cerca de 71% do emprego de PET é destinada à indústria de embalagens, sendo a maior parte em bebidas carbonatadas.

Na síntese de PET os processos são divididos em três etapas: pré-polimerização, policondensação e a polimerização no estado sólido. A pré-polimerização consiste na fabricação do prepolímero chamado oligômero tereftalato de bis(2-hidroxietileno), BHET. Na policondensação, o PET é de fato produzido a partir do aquecimento gradual do BHET. Para a fabricação de fibras têxteis, esses dois processos já são suficientes, porém, para a produção de embalagens PET, isto é, materiais com alta massa molar ($>30.000 \text{ g.mol}^{-1}$), é necessária a etapa de polimerização no estado sólido, que consiste em deixar o produto em um maior grau de cristalinidade, quando o material pode ser moldado. A Figura 2.8 ilustra os métodos de preparação do PET. (Romão *et al.*, 2009). A Tabela 2.3 mostra as principais características da resina de PET (Mano e Mendes, 2001).

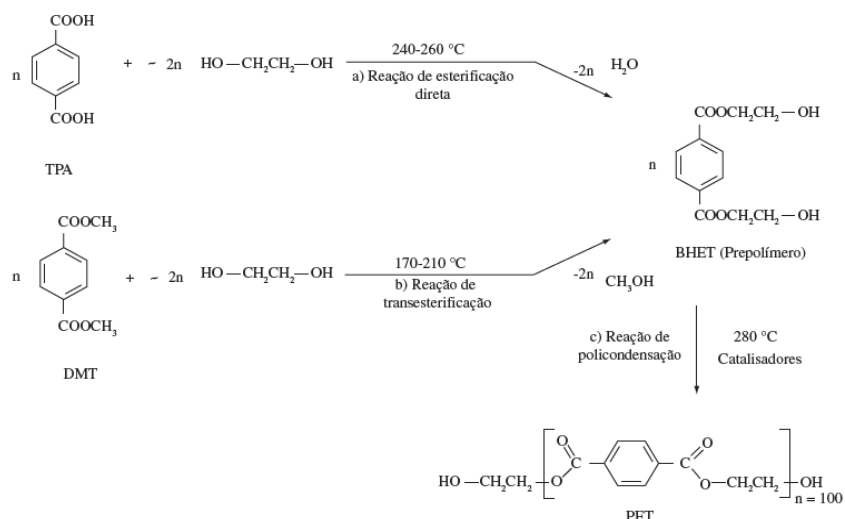


Figura 2.8 – Síntese do Polietileno Tereftalato

Tabela 2.3 – Principais Características do Polietileno Tereftalato (Mano e Mendes, 2001)

Monômeros	Ácido Tereftálico e Glicol Etilênico
Polímero	$(\text{OOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COO}-\text{CH}_2\text{CH}_2)_n$ – Poli(etileno tereftalato)
Ponto de Fusão	$265\text{ }^{\circ}\text{C}$
Transição Vítrea	$70\text{ }^{\circ}\text{C}$
Propriedades Principais	Peso Molecular: 40.000 u.ma Densidade: $1,33-1,45\text{ g/cm}^3$ Transparência e Brilho Resistência Mecânica, Térmica e Química
Aplicações Industriais Típicas	Fibras, indústria têxtil, componentes automotivos, embalagens alimentícias, farmacêuticas e cosméticos

2.7.2. Reciclagem do Polietileno Tereftalato

Os polímeros têm aumentado na composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Em 2005, eles fizeram parte de cerca de 20% em massa dos RSU coletados. Os polímeros mais comuns coletados são: o polietileno de alta, baixa densidade e baixa densidade linear (PEAD, PEBD e PELBD), o polipropileno (PP), o

poli(cloreto de vinila) (PVC), o poli(tereftalato de etileno) (PET) e o poliestireno (PS). A Figura 2.9 ilustra a produção de polímeros termoplásticos e a porcentagem desses mesmos materiais na geração de RSU. Apesar da produção de PET corresponder a 9% da produção total de polímeros, a porcentagem de PET no RSU é de 20%. Isso acontece porque o PP e o PVC são utilizados na fabricação de produtos de bens de consumo e construção civil e, no entanto, o PET é usado em embalagens de vida útil pequena (Romão *et al.*, 2009).

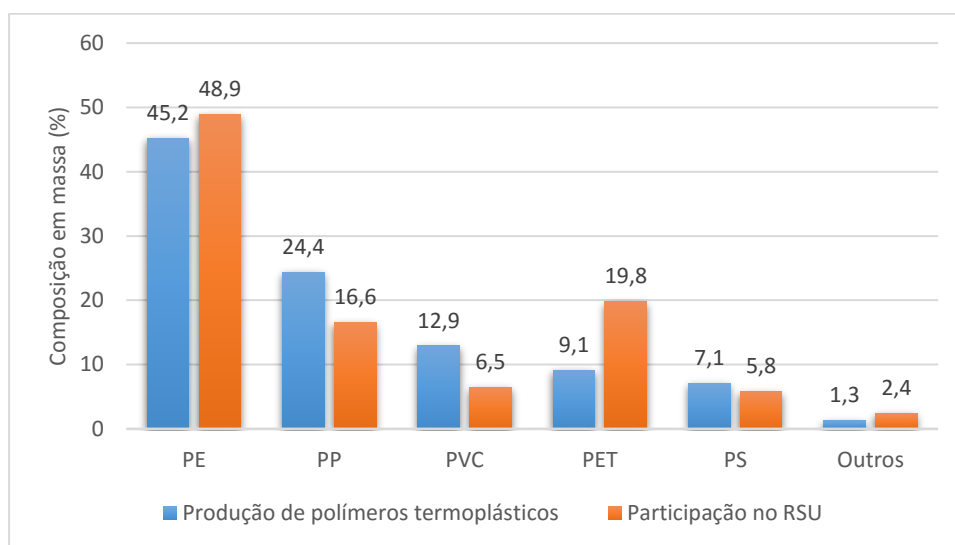


Figura 2.9- Composição da produção nacional de termoplásticos e sua geração no RSU Brasileiro em 2005 (Abiplast, 2008).

Segundo Romão *et al* (2009), existem quatro tipos de reciclagem de PET: a primária, secundária, terciária e quaternária. As duas primeiras são reciclagens mecânicas, porém, na primária são reciclados os polímeros pré-consumo e na secundária, os polímeros pós-consumo. A reciclagem terciária é chamada de química e a quaternária de energética.

Na reciclagem química, os componentes de PET são separados para a fabricação de resinas e solventes. Já a reciclagem energética é feita pela queima do PET e, com o calor produzido, é gerada eletricidade. Isso é possível porque o PET tem alto valor calorífico (Melo, 2004).

A reciclagem mecânica é o tipo mais praticado no Brasil e, de acordo com o Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), foram consumidas 514.000 toneladas de resina PET na fabricação de embalagens em 2011 e cerca 59%

das embalagens pós-consumo foram efetivamente recicladas em 2012. Apesar disso, a reciclagem de PET vem aumentando e, em 2011, o Brasil alcançou o segundo lugar na reciclagem mundial, perdendo apenas para o Japão, que reciclou 77,9%, como mostrado na Figura 2.10.

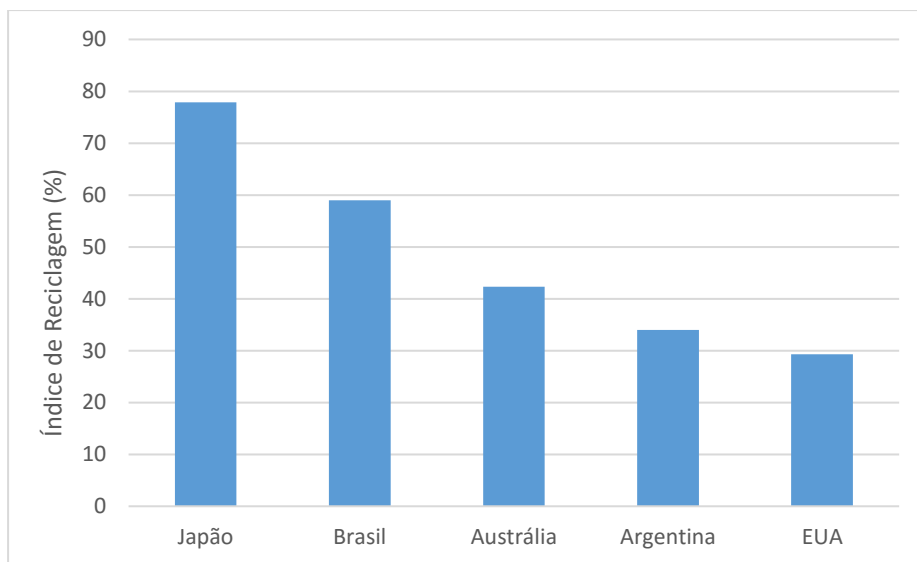


Figura 2.10- Índice de Reciclagem de embalagens PET pós-consumo em 2011 (Fonte: CEMPRE)

Nos dias atuais, o produto final mais comum da reciclagem de embalagens pós-consumo de PET no Brasil são as fibras de poliéster para a indústria têxtil, que são aplicadas na fabricação de fios de costura, forração, tapetes, carpetes, mantas de tecido não tecido (TNT), entre outras; também são fabricadas cordas, cerdas de vassouras e escovas. Outra utilização é a produção de filmes e chapas para boxes de banheiros, transformadores, formadores à vácuo, placas de trânsito e sinalização em geral e, além disso, é possível a fabricação de resinas alquídicas, usadas na produção de tintas e resinas insaturadas para a produção de adesivos e resinas de poliéster, laminados, fitas de arquear, tubos, termoformados e embalagens para produtos não alimentícios. A indústria de reciclagem de PET está começando uma nova fase, em que o PET pós-consumo começa a ser aplicado para a fabricação de novas embalagens de alimentos e bebidas, conhecido como *bottle-to-bottle*, ampliando mais ainda o mercado consumidor desse material (CEMPRE).

2.7.3. Legislação relacionado ao uso de PET

Há um interesse crescente dos fabricantes na ampliação do uso de embalagens recicladas na indústria alimentícia, estimulados por fatores econômicos, já que o custo da produção de monômeros aumenta e a reciclagem reduz o gasto da fabricação, e por fatores sociais, que são pressionados pelas legislações e pela sociedade.

A Portaria nº 987 da Secretaria da Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde, em dezembro de 1998, consentiu a utilização de resina pós-consumo em embalagens multicamada destinadas ao acondicionamento de bebidas carbonatadas não-alcoólicas, ou seja, as embalagens que possuem três camadas, sendo as duas exteriores de resina virgem e a interior feita por resina reciclada, passaram a serem permitidas (Romão *et al.*, 2009).

A partir de março de 2008, uma nova resolução (RDC N.20/2008) estabeleceu novos requisitos gerais e critérios de avaliação e autorização com o objetivo de consolidar a utilização de PET pós-consumo reciclado destinado a entrar em contato com produtos alimentícios. Assim, foi permitida a utilização das tecnologias *superclean* e *bottle-to-bottle*. Porém, os fabricantes apontam um problema na homogeneidade na cor do PET reciclado, por isso, para a fabricação de novas embalagens, somente são utilizados 10% em massa de PET reciclado para não afetar o padrão da cor (Romão *et al.*, 2009).

2.8. Misturas Asfálticas com Utilização de Polímeros

O concreto betuminoso usinado a quente, uma mistura composta de agregados e ligante, possui um comportamento muito sensível comparado a outros materiais utilizados na construção civil, assim, há uma procura muito grande de meios para melhorar seu comportamento. Os polímeros são muito utilizados para esse fim e podem ser adicionados ao revestimento asfáltico tanto no ligante (ligante modificado), quanto diretamente na mistura de CBUQ. A última opção é uma boa alternativa para locais que não possuem infraestrutura para a modificação de ligantes.

Os asfaltos modificados por polímeros podem melhorar muito as características de um pavimento flexível, como a diminuição de deformações permanentes, trincas por fadiga e por variação térmica e a melhora da adesividade agregado-betume. Apesar de todas as vantagens, os polímeros têm um custo muito alto em comparação aos materiais utilizados nas misturas asfálticas convencionais, por isso, a quantidade utilizada deve ser a menor possível. Portanto, há uma tendência crescente na substituição dos polímeros comerciais virgens por polímeros reciclados, como, por exemplo, resíduos de PET e borrachas de pneus descartados (Sulyman *et al.*, 2016).

Essa tendência também ocorre na adição de polímeros diretamente na mistura asfáltica. O mais comum é a utilização de fibras de polipropileno, de polietileno e de PET. Fundamentalmente, o reforço com fibras aumenta a resistência e melhora o comportamento das misturas asfálticas em relação à fadiga (Abtahi *et al.*, 2010). Além disso, a incorporação de polímeros triturados diretamente na mistura e a substituição parcial dos agregados por polímeros também tem mostrado bons resultados em pesquisas recentes, o que é interessante no ponto de vista ambiental pois utiliza maiores volumes de materiais reciclados (Sulyman *et al.*, 2016).

Os polímeros são mais utilizados na pavimentação como modificadores de asfalto, já que são capazes de diminuir a temperatura de ponto de amolecimento, reduzir a resistência à deformação permanente, reduzir a viscosidade e aumentar a estabilidade e resistência das misturas asfálticas (Sulyman *et al.*, 2016).

Awwad e Shbeeb (2007) estudaram o comportamento do ligante modificado com polietileno (PE). Eles avaliaram o comportamento dos polietilenos de baixa densidade (PEBD) e os polietilenos de alta densidade (PEAD). A pesquisa revelou que o segundo tipo apresentou melhor comportamento, com teor ótimo de 12% em massa relação ao asfalto utilizado na mistura. As misturas compactadas com o ligante modificado apresentaram melhora na estabilidade, redução da densidade e um pequeno aumento do volume de vazios (V_v) e volume de agregados mineirais (VAM).

Fuentes-Audén *et al.* (2008) também estudaram o efeito do polietileno (PE) na modificação de asfalto. Porém, diferentemente de Awwad e Shbeeb (2007), os pesquisadores investigaram as características do ligante modificado e, assim concluíram que a quantidade de PE não deve passar de 5%, já que a viscosidade

pode diminuir a trabalhabilidade da mistura asfáltica. A adição de PE na mistura diminuiu a deformação permanente e as trincas por fadiga e por variação térmica.

Garcia-Morales *et al.* (2004) estudaram a modificação de asfalto por EVA (etileno acetato de vinila) reciclado. Foram avaliadas o asfalto modificado nas concentrações de EVA de 0 a 9% em massa e os resultados mostraram que a sua presença aumentou a viscosidade em temperaturas mais elevadas, o que seria benéfico para o desempenho das misturas asfálticas, como o aumento da resistência à deformação permanente. Porém, em temperaturas mais baixas, a viscosidade diminuiu, o que impossibilitou a sua aplicação em pavimentos asfálticos, mesmo em concentrações mais altas de EVA.

Um estudo publicado por Costa *et al.* (2013) comparou as vantagens dos ligantes modificados por diferentes polímeros reciclados, bem como: PEAD, PEBD, EVA, ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno) e CR (borracha de pneu triturada). O asfalto foi modificado na porcentagem de 5% em massa para cada polímero e os resultados mostraram que eles possuíram propriedades similares e até mesmo melhores do que os ligantes comerciais. Os polímeros SBS, PEAD e EVA foram o que mais aumentaram o ponto de amolecimento do asfalto modificado; o PEAD e EVA foram os que mais influenciaram nos resultados de ensaios de penetração; SBS, EVA e CR apresentaram o melhor comportamento em relação ao módulo de resiliência. A maior parte dos asfaltos modificados obtiveram a viscosidade adequada para a compactação de misturas asfálticas em temperaturas próximas a 180 °C, apenas o ABS e o CR não tiveram bons resultados. Isso pode acontecer porque esses dois polímeros têm maior dificuldade em derreter e aderir ao ligante convencional.

Oda e Fernandes Júnior (2001) estudaram o comportamento de asfalto modificado com borracha de pneu. Foram incorporadas borrachas moídas nas porcentagens de 0, 6%, 12%, 18% e 24% em massa do total do ligante de CAP 20 a uma temperatura elevada (160 °C e 170 °C), durante o período de tempo de 30 min e dois tamanhos de partículas de borracha (#40 a #50 e #50 a #100). Os resultados encontrados foram: o ponto de amolecimento foi crescente com o aumento de teor de borracha, indicando um aumento da resistência à deformação permanente; a penetração aumentou até a porcentagem de 12%, estabilizando nos teores mais altos; há o aumento do ponto de fulgor (a temperatura passou de 289 °C

para 317 °C); a viscosidade foi bastante influenciada pelo teor de borracha, havendo um aumento da viscosidade de acordo com o aumento no teor de borracha.

Prasad *et al.* (2013) modificaram o ligante 80/100 com PET nas porcentagens de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% em massa na temperatura de 200-220 °C. As misturas asfálticas foram compactadas na Metodologia Marshall e obtiveram os melhores resultados no ensaio de Estabilidade na porcentagem de PET de 8%.

2.9.

Utilização de Polímeros para Melhoramento da Propriedades de Materiais

Reforço consiste na incorporação de certos materiais com propriedades desejáveis em outro material que não possuem essas mesmas propriedades. O reforço com fibras pode acontecer de duas maneiras: inclusão das mesmas aleatoriamente na matriz ou manter o material fibroso orientado a uma direção, como acontece, por exemplo, com a família dos geossintéticos (Abtahi *et al.*, 2010).

Fibras de polipropileno foram utilizadas no estudo conduzido por Yi e Mc Daniel (1993) na tentativa de reduzir a reflexão de trincas no revestimento asfáltico, porém, apesar das trincas se tornarem menos severas, não houve modificação na propagação das mesmas. Apenas houve melhora na reflexão das trincas quando as fibras foram colocadas no ligante e na camada de base do pavimento. Nos estudos de Tapkin (1989) as fibras de polipropileno aumentaram a Estabilidade e a vida de fadiga. Babadopulos *et al.* (2008) também pesquisaram a inserção de fibras de polipropileno em misturas do tipo SMA. Observou-se que o comportamento mecânico da mistura com as fibras não foi muito diferente da mistura convencional, porém, houve maior eficiência em relação ao escorrimiento.

A adição de fibras de poliéster no revestimento asfáltico mostrou-se vantajosa, como foi estudado por Maurer e Malasheskie (1989). A pesquisa indicou uma maior resistência à reflexão de trincas.

Meneses (2011) utilizou as fibras de PET reciclado incorporados no concreto com 15 mm de comprimento e 2 mm de largura, $f_{ck} = 30\text{Mpa}$ e proporção água/cimento igual a 0,46. O objetivo da pesquisa era verificar a resistência mecânica das misturas submetidas a altas temperaturas. Os corpos de prova foram testados expondo-os às temperaturas de 30°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 600°C e 900°C. Verificou-se que o concreto perde uma resistência significativa quando

expostas a temperaturas maiores que 300°C, porém, a utilização das fibras de PET atrasa o risco de colapso da estrutura, já que se formam canais que facilitam o escape de vapor d'água e, assim, há a redução da pressão dos poros no interior da estrutura.

Os resíduos plásticos podem ser utilizados também para o melhoramento de materiais, sendo considerados uma forma de reforço.

Foi realizado um estudo utilizando PET reciclado na construção e reforço de sub-base por Soncim *et al.* (2004). Foram adicionados 30% de PET em peso em um solo considerado inapropriado para base e sub-base de pavimentos. As características do solo melhoraram e sua classificação aumentou para um solo apropriado, de acordo com o HBR, que é um instituto que rege e classifica os solos recomendados para pavimentação.

Consoli *et al.* (2000) conduziram um experimento para avaliar o comportamento mecânico de uma areia cimentada reforçada com resíduos plásticos, avaliando os efeitos da inserção de fibras de PET distribuídas aleatoriamente. Foi concluído que o PET aumentou a resistência pico e a resistência à tração, além de diminuir o caráter frágil da matriz cimentada e não mudar a rigidez das misturas estudadas.

Modro *et al.* (2009) realizaram uma avaliação do concreto de cimento Portland contendo resíduo de PET. Os autores observaram que, para todos os traços, a resistência mecânica diminuiu com o aumento de volume de PET. Esse fenômeno pode estar associado pela menor interação química entre o polímero e a matriz do cimento.

Louzada (2015) estudou o comportamento dos solos reforçados com PET em pó e triturado, utilizando três solos distintos: solo coluvionar, areia limpa mal graduada e bentonita. Foram adicionados no solo argiloso pó de PET de 0, 10%, 20% e 30% e 3,0% e 5,0%, de PET triturado por peso seco de solo; nas amostras de areia, foram inseridos 0, 10% e 20% de pó de PET, em relação ao peso seco do solo; na bentonita, foram adicionados pó de PET em porcentagens de 0 e 30% de e 3,0 e 5,0% de PET triturado, por peso seco de solo. As misturas apresentam um comportamento satisfatório, aumentando ou mantendo os parâmetros de resistência ao cisalhamento semelhantes ao solo puro. Assim, para as misturas argilosos, a mistura com 30% de pó de PET e a com 5% de PET triturado se mostraram as mais eficazes, uma vez que nelas observou-se maior melhora nos parâmetros de

resistência. Para misturas de areia a inclusão PET, as misturas mais eficientes foram as com 10% de pó PET em tensões confinantes menores. Para misturas com bentonita, o teor com melhor comportamento foi com o PET triturado na porcentagem de 5%.

A aplicação de resíduos de PET na forma de grãos com tamanho de 3 mm foi estudada por Hassan *et al.* (2006). Parte dos agregados miúdos foi substituída pelo PET, na mistura com ligante 60/70 e compactados a 50 golpes em cada face dos corpos de prova na Metodologia Marshall. Os resultados mostraram que a substituição de 20% dos agregados miúdos pelos grãos de PET foi o mais efetivo, pois obtiveram melhores resultados no ensaio de Estabilidade.

Silva *et al.* (2013) pesquisaram o comportamento da mistura asfáltica com substituição parcial do agregado, nos teores de 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5% de pó de PET adquirido na indústria de PET Reciclagem localizada em Campina Grande. O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70 e a compactação foi feita no compactador giratório da SERVOPAC, com ângulo de giro de 1,250 e tensão vertical de 600 kPa com critério de parada de compactação SUPERPAVE com o número de giros igual a 100 (tráfego médio a alto).

Em relação aos parâmetros volumétricos, houve um aumento de Volume de Vazios (Vv) com o aumento de porcentagem de PET, portanto, a partir do teor de 5%, não foram apresentados resultados condizentes com o recomendado pelas normas do DNIT e do Superpave.

Na Tabela 2.4 a seguir, são mostrados os resultados dos ensaios volumétricos da pesquisa. Os ensaios mecânicos de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência indicaram que houve uma diminuição da resistência de acordo com o aumento do teor de PET, porém, o Módulo de Resiliência mais baixo pode tornar o revestimento menos suscetível a deformações permanentes e, conseqüentemente, aumentaria a vida de fadiga. Os resultados os ensaios mecânicos são mostrados na Tabela 2.5.

Tabela 2.4 – Resultado dos Ensaio Volumétricos

	V_v (%)	VAM (%)	RBV (%)
2,5% de PET	4,25	13,93	69,39
5,0% de PET	5,19	14,49	64,16
7,5% de PET	6,42	15,39	58,28
10% de PET	8,26	16,9	51,12
12,5% de PET	12,69	20,77	38,90
Critério	4,00%	13,0%	65% a 75%

Tabela 2.5 – Resultados dos Ensaio Mecânicos

	RT (MPa)	MR (MPa)
2,5% de PET	1,109	4.381,50
5,0% de PET	0,942	4.265,50
7,5% de PET	0,740	2.932,00
10% de PET	0,627	2.139,00
12,5% de PET	0,507	1.590,50
Critério	>0,65	2.000 - 8.000

Moghaddam *et al.* (2012) investigaram a possibilidade de utilizar PET triturado nas misturas asfálticas no tipo SMA (Stone Matrix Asphalt). Foram acrescentados 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% e 1,0% de PET triturado na mistura asfáltica com ligante do tipo 80/100. A resistência à tração diminuiu com o aumento de teor de PET na mistura, mas a vida de fadiga aumentou significativamente com o aumento de porcentagem de PET na mistura.

2.10. Considerações Finais

O uso de resíduos de PET como melhoramento de misturas asfálticas é relativamente novo e existem poucas pesquisas sobre este assunto. Assim, a revisão bibliográfica apresentou as principais alternativas de materiais que podem funcionar como o PET no revestimento asfáltico e também o uso de PET em outros materiais construtivos. Assim, pode-se realizar uma correlação entre o comportamento destes resíduos e destes usos com o PET na pavimentação asfáltica.

3

Programa Experimental

O programa experimental estabelecido nesta pesquisa tem como principal objetivo analisar a adição de garrafas PET no CBUQ. Para isso, foram acrescentadas garrafas PET trituradas de diferentes tamanhos e porcentagens.

Este capítulo tem como finalidade apresentar os materiais utilizados, bem como os métodos seguidos nos ensaios, que foram realizados no Laboratório de Ligantes e Misturas Asfálticas do Instituto Militar de Engenharia (IME).

3.1.

Materiais

Foram utilizados quatro principais materiais: agregados, CAP 30/45, flakes de PET e pó de PET.

3.1.1.

Agregados

Os agregados são de origem granítica e são oriundos da empresa Holcim Brasil S.A., que explora uma jazida na região do município de Magé, no Rio de Janeiro. Foram utilizados três tipos de agregados, que são comercialmente chamados de Brita 1, Brita 0 e Pó de pedra. A Figura 3.1 apresenta uma amostra dos agregados utilizados.



Figura 3.1 – Amostras dos agregados utilizados

3.1.2. Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela Prefeitura do Rio de Janeiro e são provenientes da BR Distribuidoras S.A. O cimento asfáltico utilizado é o CAP 30/45.

3.1.3. Flakes de PET

Os flakes de PET utilizados possuem dois tamanhos distintos: passantes na peneira de 10 mm e na de 2 mm. Eles são obtidos através do processo de trituração das garrafas PET por um equipamento triturador localizado no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC Rio. O processo pode ser dividido em três etapas:

- a) As garrafas PET são limpas, retirando a etiqueta e seu topo e a sua base são cortadas (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Garrafas PET limpas e com sua base e seu topo cortados

O triturador, da marca Radial LaFrance, modelo SG-500F (Figura 3.3), corta o material, utilizando cinco lâminas. As garrafas são colocadas no topo do equipamento (1), as lâminas as trituram até que elas passem pela peneira localizada na parte de baixo do equipamento (2), assim, o material é coletado em uma caixa

(3). O processo de trituração é repetido para cada peneira até que o material alcance o tamanho desejado (Louzada, 2015).



Figura 3.3 – Equipamento utilizado para triturar as garrafas PET: (1) Topo onde colocam-se as garrafas de PET; (2) Lâminas que trituram as garrafas; (3) Caixa em que se coletam os flakes de PET (Louzada, 2015)

- b) Para o corte dos PET de 10 mm foi necessário triturar o material três vezes, para que o material ficasse mais homogêneo, isso aconteceu porque uma parte do PET caía pela lateral das peneiras. Além disso, como o PET triturado possui um formato lamelar e tem flexibilidade, algumas partículas de maiores tamanhos passavam pela peneira. Os flakes de PET de 2 mm, por sua vez, foram triturados e passados primeiro pela peneira de 10 mm, para que facilitar o corte em tamanhos menores. A Figura 3.4 mostra a peneira e a aparência dos flakes de PET de 10 mm.

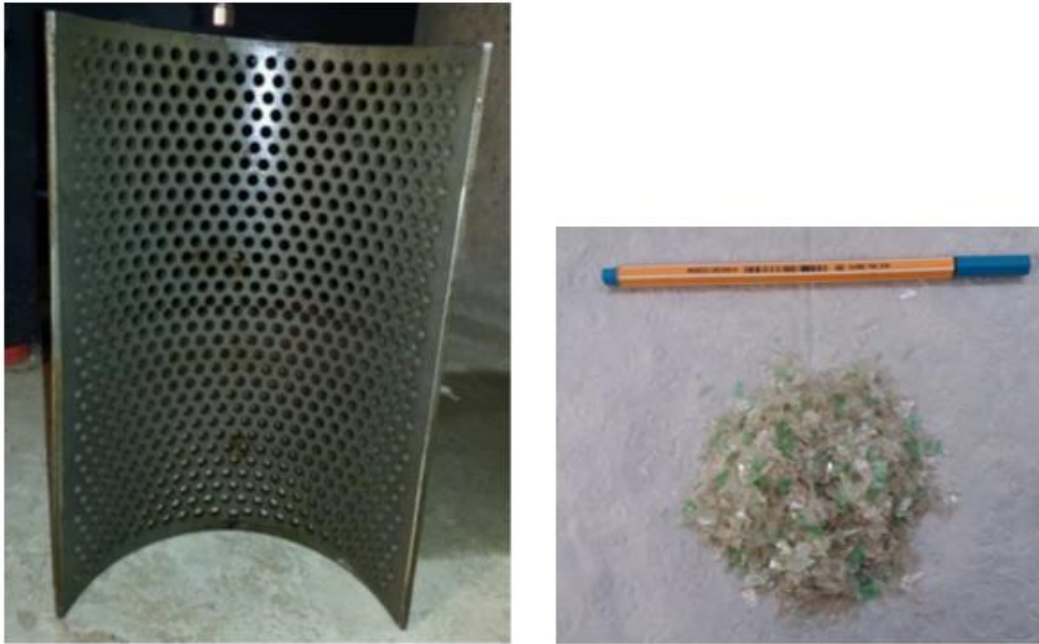


Figura 3.4 – Peneira de 10 mm e os flakes de 10 mm

- c) A peneira de 10 mm, então, é substituída pela peneira de 2 mm. Para que o material ficasse homogêneo, foi necessário passar pelo triturador pelo menos cinco vezes (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Peneira de 2 mm e os flakes de PET de 2 mm

3.1.4. Pó de PET

O pó de PET utilizado nesta pesquisa (Figura 3.6) foi fabricado em Campina Grande, Paraíba. Este mesmo material foi utilizado no estudo de Silva *et al.* (2013) e é resultado de um método específico de trituração e fabrica partículas finas de PET.

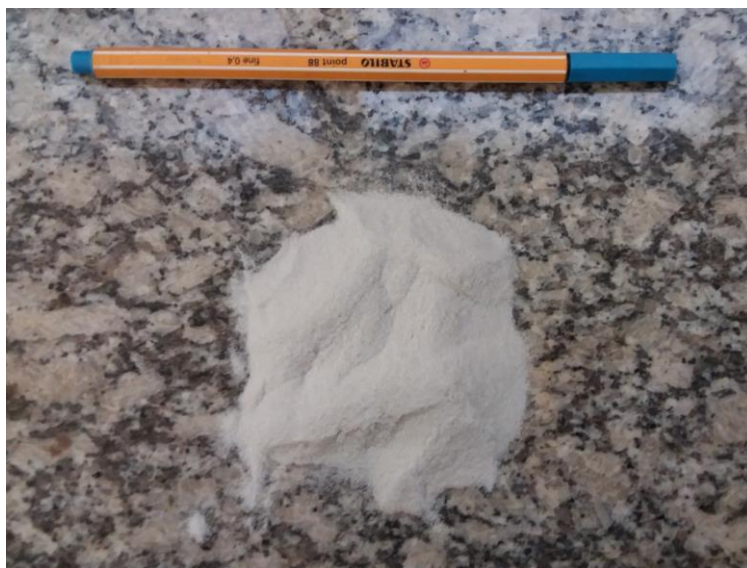


Figura 3.6 – Pó de PET utilizado nesta pesquisa

De acordo com Melo (2004), para produzir o pó de PET, normalmente passa-se pelo processo que pode ser descrito em seis etapas:

- 1) A coleta e seleção de garrafas com a retirada dos rótulos e tampas e a lavagem em água;
- 2) É feito o processo de granulação, quando as garrafas são moídas em moinhos de “facas”, produzindo “flakes” de PET, que são o PET triturado;
- 3) A aglomeração é realizada e o flakes, por possuírem baixa densidade, recebem um processamento térmico com a finalidade de diminuir o seu volume e aumentando, assim, sua densidade;
- 4) A remodelagem é feita para preparar o material para a etapa de moagem;
- 5) A moagem consiste em cortar o material estrudado por rotomoldagem, deixando-os em uma forma arredondada;

- 6) A micronização é feita reduzindo o material a pó com partículas passantes na peneira 0,42 mm.

3.2. Métodos

Nesta seção serão apresentados os procedimentos e ensaios utilizados para as análises nas misturas asfálticas fabricadas durante à pesquisa, após a caracterização dos materiais que foram utilizados. As etapas adotadas para o desenvolvimento desta pesquisa são mostradas no fluxograma da Figura 3.7.

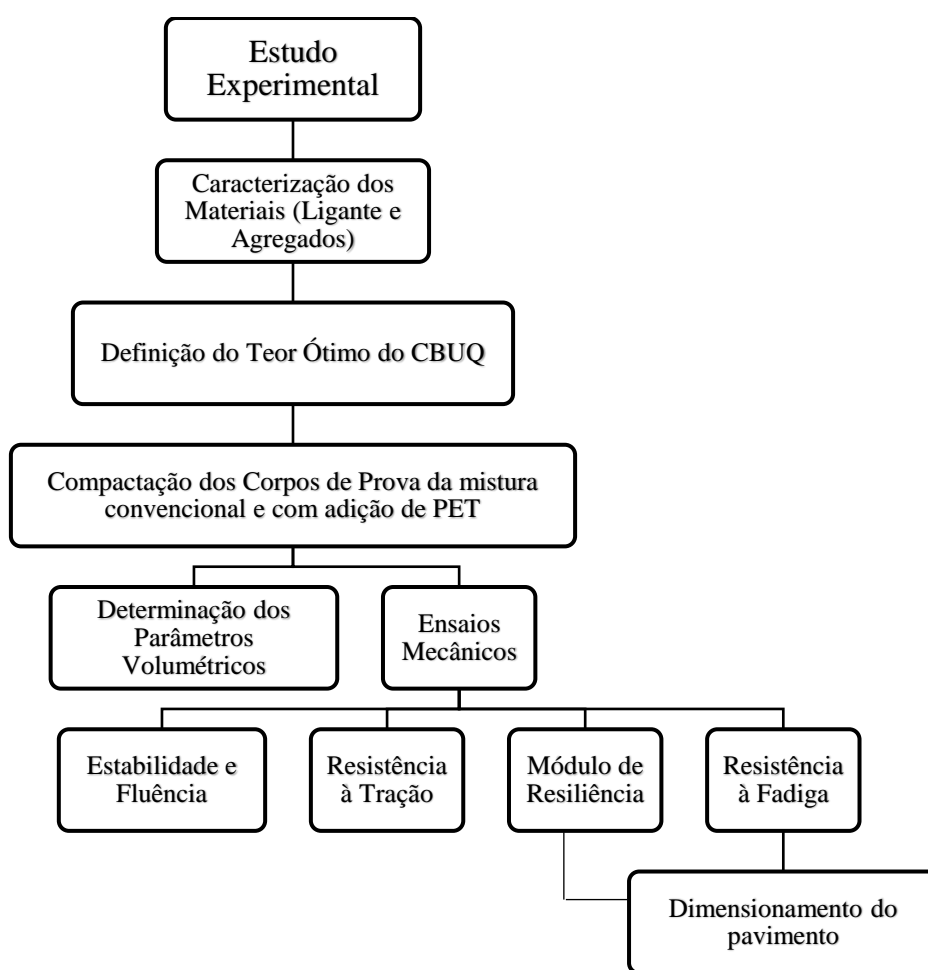


Figura 3.7 – Fluxograma das principais etapas da pesquisa

Após a caracterização dos materiais que foram escolhidos para a pesquisa, será necessária a realização da Dosagem Marshall da mistura asfáltica do tipo

CBUQ, na Faixa C, como já foi mencionado na Seção 3.1.1. Assim, o estudo pode ser dividido em cinco fases principais:

- 1) Caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa: agregados, CAP, flakes de PET e pó de PET.
- 2) Definição do teor ótimo de ligante dos corpos de prova convencionais, com a Dosagem Marshall;
- 3) Compactação de corpos de prova sem a utilização de PET e com a utilização de PET:
 - M1: mistura CBUQ convencional, sem adição de PET;
 - M2: adição de flakes de PET de 2 mm na porcentagem de 0,5%
 - M3: adição de flakes de PET de 2 mm na porcentagem de 1,0%
 - M4: adição de flakes de PET de 10 mm na porcentagem de 0,5%
 - M5: adição de flakes de PET de 10 mm na porcentagem de 1,0%
 - M6: adição de flakes de PET de 10 mm na porcentagem de 0,5% e substituição parcial do pó de pedra por pó de PET na porcentagem de 2,5%
- 4) Ensaios volumétricos para a determinação dos parâmetros volumétricos, como o Vv (volume de vazios) e RBV (relação betume vazios);
- 5) Ensaios mecânicos: Estabilidade e Fluência, Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Resistência à Fadiga;
- 6) Dimensionamento do pavimento através do software Sispav.

Para a realização dos ensaios foram compactados 97 corpos de prova, como mostra a Tabela 3.1, que apresenta a quantidade de CPs para cada ensaio realizado.

Tabela 3.1 – Quantidade de corpos de prova confeccionados para a pesquisa

Ensaio	Quantidade de CPs
Cálculo do Teor Ótimo	25
Estabilidade	18
Resistência à Tração	18
Módulo de Resiliência/Fadiga	36
Total	97

3.2.1. Caracterização dos Materiais

a) Agregados:

Os ensaios de caracterização dos agregados seguiram os métodos apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Ensaio de caracterização dos agregados

Ensaio	Metologia
Granulometria	DNER ME 083/98
Abrasão Los Angeles	DNER ME 035/98
Densidade Real	DNER ME 081/94 e DNER ME 084/94
Densidade Aparente	DNER ME 084/94
Absorção	DNER ME 195/97
Equivalente de Areia	DNER ME 059/97
Adesividade	DNER ME 78/94
Sanidade	DNER ME 089/94

Para a determinação das características de forma, angularidade e textura dos agregados graúdos, foi realizado o ensaio AIMS, utilizando o equipamento do laboratório localizado nas instalações do CENPES/Petrobras. Este ensaio foi feito no trabalho de Nascimento (2015), que utilizou os mesmos agregados empregados nesta pesquisa.

Os ensaios realizados nesta pesquisa serão brevemente descritos:

- **Abrasão Los Angeles:**

Mede a resistência à abrasão e impacto, a partir da degradação dos agregados na máquina Los Angeles. Neste ensaio uma massa de cerca de 5000 g é submetida a uma carga abrasiva composta por esferas de aço a um determinado número de revoluções (500 ou 1000). O resultado é dado pela redução de massa dos agregados retidos na peneira nº 12 (1,7 mm) em relação à massa inicial. O procedimento e os equipamentos estão descritos nas normas DNER-ME 035/98. A Figura 3.8 mostra o equipamento utilizado para este ensaio.



Figura 3.8 – Equipamento utilizado no ensaio de Abrasão Los Angeles
(Cavalcanti, 2010)

- **Granulometria:**

O intertravamento das partículas, que é responsável pela estabilidade das misturas, é uma das consequências de uma distribuição granulométrica dos agregados adequada. A norma DNER-ME-083/98 determina algumas faixas granulométricas, como são indicadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Faixas Granulométricas de agregados para misturas asfálticas densas

Peneiras de malha quadrada	Porcentagem em massa, passando				
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95-100	100	-	±7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7%
¾"	19,1	60-90	80-100	100	±7%
½"	12,7	-	-	80-100	±7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	±7%
Nº 4	4,8	25-50	28-60	44-72	±5%
Nº 10	2,0	20-40	20-45	22-50	±5%
Nº 40	0,42	10-30	10-32	8-26	±5%
Nº 80	0,18	5-20	8-20	4-16	±5%
Nº 200	0,075	1-8	3-8	2-10	±2%

- **Forma das partículas:**

É um ensaio que determina o índice de forma (f), descrito pela norma DNER-ME-086/94, com f variando de 0 a 1, sendo f igual a 0 quando representar agregado lamelar e 1 para o agregado com ótima cubicidade. As formas mais angulares (cúbicas) apresentam melhor intertravamento da mistura, influenciando na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento do revestimento asfáltico.

- **Absorção:**

É a relação da massa de água absorvida pelo agregado graúdo após 24 horas de imersão (DNER-ME 081/98) à temperatura ambiente e a massa inicial de material seco.

- **Adesividade ao ligante asfáltico:**

O método DNER-ME 078/94 determina a adesividade dos agregados ao ligante mergulhando a mistura asfáltica em água e são avaliadas visualmente.

- **Sanidade ou durabilidade:**

Determina a resistência do agregado à desintegração química e é quantificada através de um ensaio que consiste em atacar o agregado com solução de sulfato de sódio ou magnésio. O método DNER-ME 089/94 descreve o procedimento deste ensaio.

- **Massa específica ou densidade:**

São divididas em três tipos de massa específica ou densidade, que são utilizadas para o cálculo de parâmetros secundários de relações volumétricas necessárias durante a dosagem das misturas, como o RBV (relação betume vazios), VAM (vazios de agregados minerais) e Vv (volume de vazios). As normas para determinação das densidades são: DNER-ME-81/94, ASTM C127 e AASHTO T85 para os agregados graúdos e DNER-ME-84/94, ASTM C128 e AASHTO T84 para agregados miúdos.

- Densidade Real (G_{sa}): é determinada através da relação entre a massa seca e o volume real dos sólidos (Figura 3.9), isto é, não inclui o volume dos poros permeáveis à água e asfalto.

$$G_{sa} = \frac{\text{massa seca}}{\text{volume real}} \quad (2.1)$$

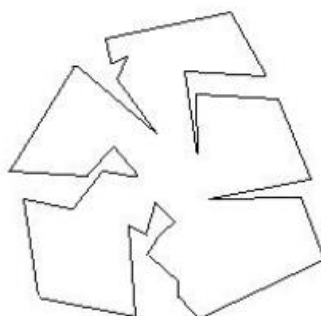


Figura 3.9 – Representação de uma partícula de agregado sem preenchimento dos poros (Cavalcanti, 2010)

- Densidade Aparente (Gsb): é determinada considerando o material como um todo (forma aparente), incluindo os poros permeáveis à água e ao asfalto (Figura 3.10).

$$Gsb = \frac{\text{massa seca}}{\text{volume aparente}} \quad (2.2)$$

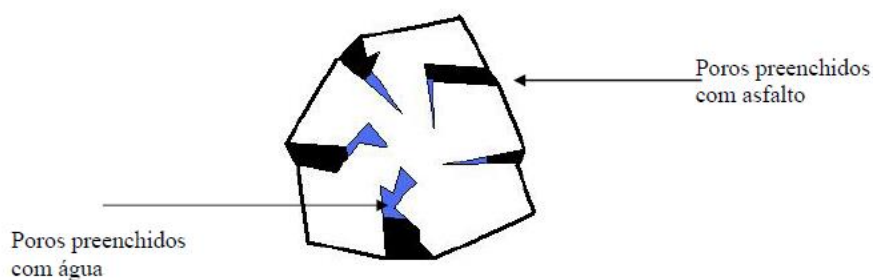


Figura 3.10 – Representação de uma partícula de agregado com vazios preenchidos com água e asfalto e coberto em toda a superfície por uma película de ligante (Cavalcanti, 2010)

- Massa Específica Efetiva (Gse): inclui o volume de poros permeáveis à água, mas não ao asfalto (Figura 3.11). A massa específica efetiva não é diretamente calculada e é admitida como sendo a média entre a massa específica real e a massa específica aparente (Pinto, 1996).

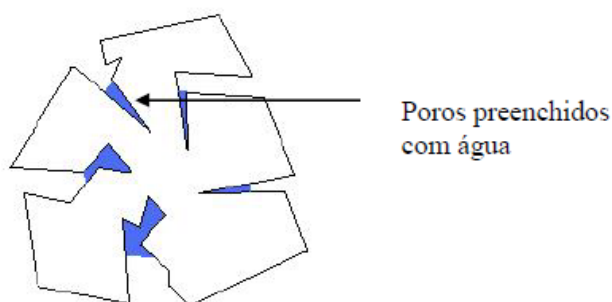


Figura 3.11 – Representação de uma partícula de agregado com poros permeáveis à água, porém, não ao asfalto

- **Equivalente de areia:**

Descrito pela norma DNER-ME 054/97, é a relação volumétrica que corresponde à razão entre altura do nível superior de areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de material. Este ensaio determina a proporção relativa de materiais argilosos ou pó em amostras de agregados miúdos (Valadares, 2016). A Figura 3.12 mostra os materiais utilizados no ensaio.



Figura 3.12 – Equipamentos de Equivalente de areia (Valadares, 2016)

- **Método AIMS:**

Para encontrar as características de forma, angularidade e textura dos agregados graúdos, pode ser utilizado o Método AIMS (Aggregate Imaging System), pois constata grande versatilidade técnica e potencialidade para analisar essas características com muita rapidez (Nascimento, 2015). A Figura 3.13 mostra o equipamento AIMS do CENPES/Petrobrás.

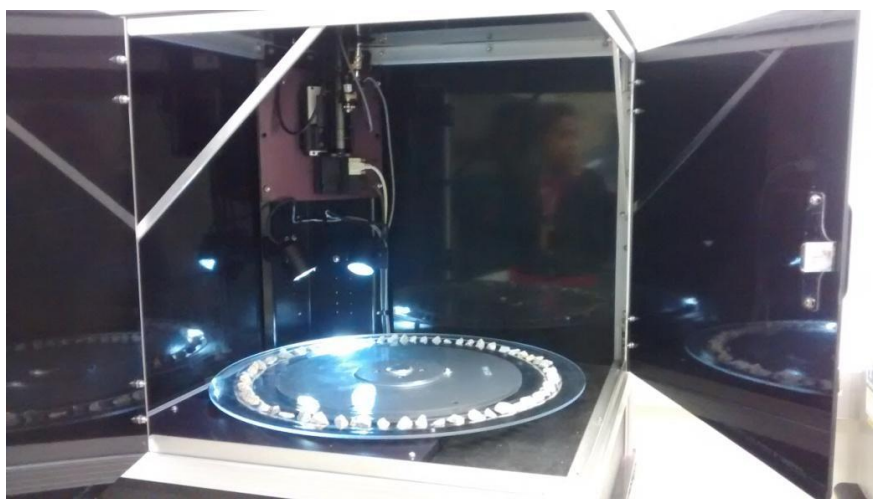


Figura 3.13 – Equipamento AIMS do CENPES/Petrobrás (Nascimento, 2015)

b) Ligante Asfáltico:

As normas utilizadas para a caracterização do ligante asfáltico estão apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Métodos utilizados para os ensaios de caracterização do CAP

Ensaio	Metodologia
Penetração	DNER ME 003/99
Ponto de Amolecimento	ASTM D36
Viscosidade Brookfield	ASTM D4402
Ponto de Fulgor	ABNT NBR 11341
Ductilidade	DNER ME 163/98
Densidade	ABNT NBR 6296
RTFOT	ASTM D2872

A Agência Nacional do Petróleo (ANP), a partir da Resolução N° 19/2005, determinou vários parâmetros recomendados de modo a garantir as características desejadas do asfalto, que serão brevemente descritas.

- **Penetração**

É a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha de massa padrão de 100g penetra, por 5 segundos, à uma temperatura de 25°C. A penetração a 25°C tem sido utilizada para a classificação de agregados em todos os países do mundo (Bernucci *et al.*, 2008). As normas utilizadas para este ensaio são: ASTM D5, ABNT 6576 e DNER-ME-003/99. A Figura 3.14 mostra o equipamento utilizado para o ensaio.



Figura 3.14 – Equipamento do ensaio de Penetração

- **Viscosidade Brookfield:**

Mede a consistência do cimento asfáltico e permite obter a curva da viscosidade-temperatura para projeto de mistura asfáltica, por meio de diferentes taxas de cisalhamento e a diferentes tensões de cisalhamento, obtidas por rotação de cilindros coaxiais que ficam mergulhados na amostra (Figura 3.15). As normas vigentes para este ensaio são: ABNT NBR 15184, ASTM D 4402.



Figura 3.15 – Viscosímetro Brookfield (Valadares, 2016)

- **Ponto de amolecimento:**

É a medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento (Bernucci *et al.*, 2008). Este ensaio também é conhecido com ensaio do anel e bola. As normas que descrevem este ensaio são: ABNT NBR 6560 e ASTM D36. A Figura 3.16 mostra o ensaio de Ponto de Amolecimento.



Figura 3.16 – Ensaio de Ponto de Amolecimento

- **Ensaio de Ductilidade:**

É um ensaio que mede a capacidade do ligante asfáltico de se alongar na forma de um filamento. A ductilidade é dada pelo alongamento em centímetros obtido antes da ruptura de uma amostra de CAP. As normas que regem este ensaio são: ABNT NBR 6293, DNER-ME-163/98 e ASTM D113.

- **Solubilidade:**

É utilizado para medir a quantidade de betume presente na amostra de asfalto, pois, o cimento asfáltico refinado consiste basicamente de betume puro, que é insolúvel em bissulfeto de carbono. As normas referentes a este ensaio são ASTM D2042 e ABNT NBR 14855.

- **Durabilidade:**

O método mais utilizado para este ensaio utiliza a estufa RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test), que consiste na simulação do envelhecimento do asfalto em curto prazo. Os ensaios são descritos pelas normas ABNT NBR 15235 e ASTM D2872. A Figura 3.17 mostra a estufa RTFOT.



Figura 3.17 – Forno RTFOT (Cavalcanti, 2010)

- **Ponto de Fulgor:**

É um ensaio relacionado à segurança de manuseio, estocagem e usinagem do asfalto, já que representam a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material asfáltico se inflamam por contato com uma

chama padronizada. Os ensaios são executados segundo as normas ABNT NBR 11341 e ASTM D92.

- **Massa específica:**

Este ensaio obtém a massa específica através de um picnômetro e é padronizada pela norma ABNT NBR 6296.

c) **Polietileno Tereftalato:**

Os flakes de PET e o pó de PET foram peneirados para encontrar suas curvas granulométricas e, também, foram feitos os ensaios de densidade. Os dois ensaios foram realizados seguindo as normas dos agregados: DNER ME 083/98 (Granulometria) e DNER ME 084/94 (Densidade de real dos agregados miúdos).

3.2.2.

Definição do teor ótimo

A definição do teor ótimo foi feita a partir da metodologia Marshall a partir de 5 teores de ligante com diferença de 0,5% em cada. A escolha dos teores utilizados poderia ser por experiência do projetista, como mencionado na Seção 2.5.2. Porém, nesta pesquisa, foi feita uma previsão do teor de ligante, conhecido como o método da superfície específica.

O cálculo do teor provável de ligante pelo método da superfície específica é feito por:

$$S = \frac{0,17.G + 0,33.g + 2,3.A + 12.a + 135.f}{100} \quad (3.1)$$

Onde:

S = Superfície específica do agregado m²/kg;

G = % retida na peneira 9,52 mm;

g = % passada na peneira 9,52 mm e retida na 4,76 mm;

A = % passada na peneira 4,76 mm e retida na 0,297 mm;

a = % passada na peneira 0,297 mm e retida na 0,075 mm

f = % passada na peneira 0,075 mm.

$$Tca = m.S^{0,2} \quad (3.2)$$

Dados:

Tca = Teor de betume em relação a massa de agregado;

M = Módulo de riqueza (adota-se de 3,5 a 4,0)

$$T'ca = 2,65 \cdot \frac{Tca}{dam} \quad (3.3)$$

Onde:

T'ca = Teor de asfalto corrigido devido à densidade do agregado mineral;

dam = densidade real média ponderada dos agregados.

$$Pca = \frac{100.T'ca}{100+T'ca} \quad (3.4)$$

Dado:

Pca = Porcentagem de asfalto em relação à mistura.

Assim, com o teor provável de ligante, confecciona-se corpos de prova com os teores: Pca-1,0%; Pca-0,5%; Pca; Pca+0,5%; Pca+1,0%. A moldagem dos CPs foi feita a partir do compactador Marshall, localizado no Laboratório de Ligantes e Misturas Asfálticas do IME (Figura 3.18).



Figura 3.18 – Compactador Marshall utilizado nesta pesquisa

O método Marshall, adotado pelo DNIT, utiliza o cálculo da densidade máxima teórica (DMT), que é feito pela média ponderada pelos teores das densidades reais dos agregados e da densidade do asfalto, para calcular os parâmetros volumétricos, porém, optou-se pelo uso da densidade máxima da mistura (Gmm), também conhecido por ensaio Rice, cujos procedimentos são dados pelas normas ASTM 2041/00 ou AASHTO T 209/99. A Figura 3.19 mostra o equipamento utilizado para este ensaio.



Figura 3.19 – Equipamento do Ensaio Rice

As densidades específicas aparentes (G_{mb}) dos corpos de prova foram determinadas por meio segundo a norma AASHTO T 166/05, que possui como fundamento a pesagem hidrostática. Primeiro, o CP seco é pesado, depois é mergulhado em água e, quando os seus vazios forem preenchidos pela água, seu peso é marcado e, por último, o CP é superficialmente seco com uma toalha úmida (para que não retire a água dos vazios) e é pesado (Figura 3.20). O seu cálculo é feito por:

$$G_{mb} = \frac{\text{Peso seco} \times \text{densidade da água}}{\text{Peso úmido} - \text{Peso imerso}} \quad (3.5)$$

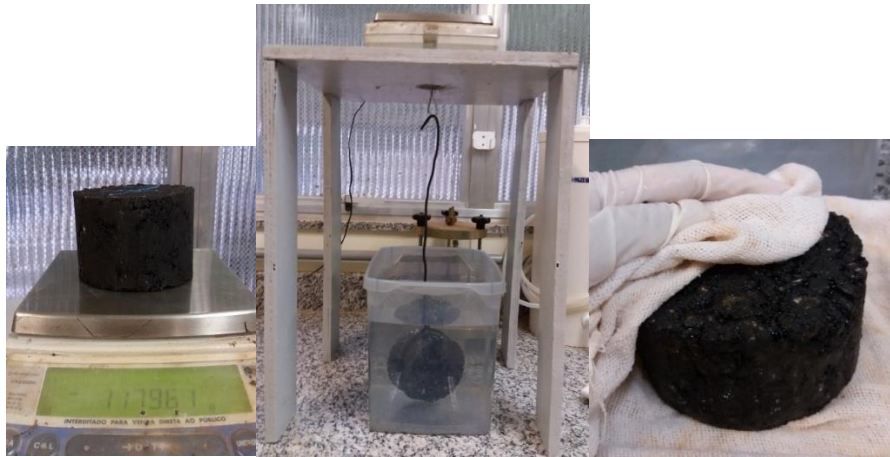


Figura 3.20 – Ensaio de massa específica aparente (Gmb)

Assim, os parâmetros volumétricos dos CPs são encontrados pelas fórmulas:

$$Vv = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (3.6)$$

Onde:

Vv = Volume de vazios;

Gmm = Densidade máxima medida;

Gmb = Densidade específica aparente;

$$VCB = \frac{Gmb \times \text{Porcentagem de ligante}}{Ga} \quad (3.7)$$

Onde:

VCB = Vazios com betume;

Ga = Densidade do asfalto.

$$VAM = Vv + VCB \quad (3.8)$$

Onde:

VAM = Vazios de agregado mineral;

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (3.9)$$

Onde:

RBV = Relação betume-vazios

Os limites dos parâmetros volumétricos e mecânicos para a Dosagem Marshall está apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Limites dos parâmetros volumétricos e mecânicos para a Dosagem Marshall

Características	Métodos de Ensaio	Limites para a Camada de rolamento
V_v (%)	DNER-ME 043	3 – 5
RBV (%)	DNER-ME 043	75 – 82
Estabilidade mín. (kgf) para 75 golpes	DNER-ME 043	500
RT a 25°C mín. (MPa)	DNER-ME 138	0,65

3.2.3. Execução dos ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos são importantes para a obtenção de parâmetros que possam indicar o desempenho das misturas asfálticas, já que é uma maneira de reproduzir em laboratório as condições de campo.

a) Estabilidade e Fluência Marshall:

O ensaio Marshall consiste da aplicação de uma carga de compressão sobre um corpo de prova cilíndrico regular de 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, aproximadamente. Essa carga é aplicada no CP por meio de cabeçotes curvos padronizados (Figura 3.21). A temperatura do ensaio é de 60°C e a taxa de carregamento de 5 cm/minuto. Em geral a parte superior da prensa é fixa e o prato inferior se desloca para cima conforme a taxa mencionada. Devido à resistência do material ensaiado, é necessária uma força crescente para manter o prato inferior movendo-se na taxa especificada. Esta força cresce até um determinado ponto em que ocorre uma perda de estabilidade de material, causada por deslocamento ou quebra dos agregados. A carga máxima correspondente a este ponto é denominada Estabilidade Marshall e é expressa em unidade de força. O deslocamento vertical total do prato, correspondente ao ponto de carga máxima, é denominado Fluência, expressa em unidade de deslocamento (Bernucci *et al.*, 2008).



Figura 3.21 – Prensa Marshall utilizada nesta pesquisa

A Estabilidade Marshall pode ser corrigida pelo fator da altura do corpo de prova e pela constante do anel dinamômetro para Marshall, este valor também é expresso em kgf, como mostra a equação:

$$E_{corrigida} = f \times E_{lida}, \text{ sendo } f = 927,23 \times h^{-1,64} \quad (3.10)$$

b) Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (Ensaio Brasileiro):

Foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro para a determinar a resistência à tração indireta através da compressão diametral de um cilindro. Este ensaio consiste na aplicação de um esforço no corpo de prova, que é dado por duas forças de compressão concentradas e diametralmente opostas em um cilindro, que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro.

O esquema do ensaio é apresentado na Figura 3.22. Ele pode ser realizado através da prensa Marshall, como mostrado na Figura 3.23 (Medina, 1997). As normas que descrevem esse ensaio são ABNT NBR 15087 e DNER-ME-138/94.

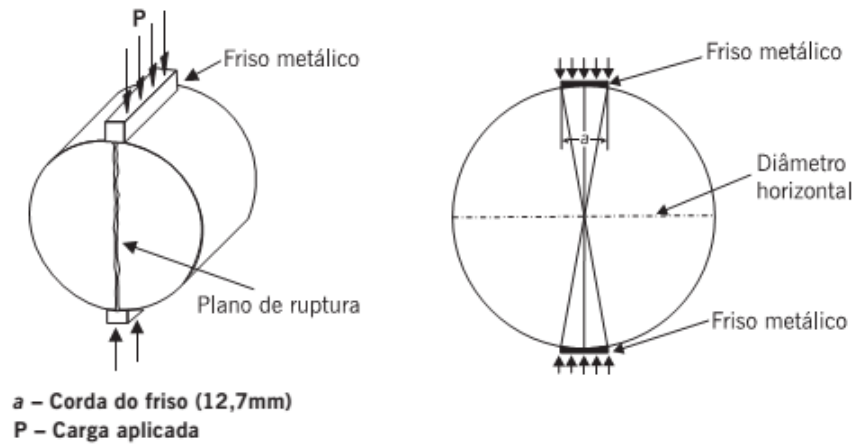


Figura 3.22 – Esquema do ensaio de RT por compressão diametral (DNER-ME 138/94)



Figura 3.23 – Equipamento de Resistência à Tração

O valor da resistência à tração indireta é dado pela equação:

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \quad (3.11)$$

Onde:

RT: Resistência à Tração;

F = Força obtida através do produto da constante do anel com valor máximo atingido pelo extensômetro do anel dinamométrico durante o ensaio;

D = Média das medidas do diâmetro dos CPs;

H = Média das medidas da altura dos CPs.

c) Ensaio de Módulo de Resiliência (MR):

Aplicam-se cargas repetidas durante um intervalo de tempo de 0,1s e repouso durante 0,9s, no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico. As cargas aplicadas geram uma tensão de tração no plano transversal ao plano de aplicação de carga. Assim, medidores de deformação (LVDT) medem o deslocamento diametral recuperável na direção correspondente à tensão gerada (Cavalcanti, 2010).

A norma que rege o ensaio de Módulo de Resiliência no Brasil é DNER-ME-133/94. O equipamento utilizado para este ensaio (Figura 3.24) é formado por: um sistema pneumático de carregamento, composto por reguladores de pressão, válvula de transmissão da carga vertical, cilindro de pressão e pistão de carga, dispositivo mecânico digital para controle do tempo de abertura da válvula e frequência de aplicação de aplicação da carga vertical; e um sistema de medição de deformação da amostra constituído de dois LVDTs, suporte de fixação dos LVDTs na amostra e oscilógrafo e amplificador para uso com os transdutores.



Figura 3.24 – Equipamento utilizado para o Ensaio de Módulo de Resiliência

O MR pode ser calculado como:

Para CPs com diâmetro aproximado de 10 mm:

$$MR = \frac{F}{\Delta.H} (0,9976\mu + 0,2712) \quad (3.12)$$

Para CPs com diâmetro aproximado de 15 mm:

$$MR = \frac{F}{\Delta.H} (0,999\mu + 0,2712) \quad (3.13)$$

Onde:

MR = Módulo de Resiliência;

F = Carga vertical repetida aplicada diametralmente no CP;

Δ = Deformação elástica ou resiliente;

H = Altura do CP;

μ = Coeficiente de Poisson

Nesta pesquisa foram realizados ensaios de MR em 36 corpos de prova, sendo seis para cada mistura estudada. No ensaio, obtêm-se uma média de três valores de módulo para cada CP, assim, optou-se por utilizar os resultados de módulos de cada corpo de prova agrupados, onde, após um tratamento estatístico, geraram um valor médio. A temperatura adotada foi 25°C, com condicionamento prévio dos CPs de duas horas.

d) Ensaio de Fadiga:

O fenômeno de fadiga ocorre em função de um processo de deterioração da estrutura do material quando sofre a ação de cargas repetidas das rodas dos veículos, gerando tensões de tração na camada de revestimento asfáltico (Benevides, 2000).

Segundo Bernucci *et al.* (2008), a vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura (Nf) ou vida de serviço (Ns). A primeira se refere ao número total de aplicações de uma certa carga necessária à fratura completa da amostra e a segunda ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível preestabelecido.

O ensaio de vida de fadiga mais comum no Brasil é feito por compressão diametral à tensão controlada (TC), sendo a carga aplicada a uma frequência de 1Hz

através de um equipamento pneumático. Durante o ensaio, a deformação de tração aumenta até o rompimento completo.

Este tipo de ensaio de vida de fadiga ainda não é normatizado, porém, tem sido muito utilizado no país. Utiliza-se uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,10 segundo de duração do carregamento repetido. A vida de fadiga (N) pode ser definida como sendo o número total de aplicações de carga suficiente para levar a amostra a um colapso estrutural, sendo expressas por:

$$N = k1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{n1} \quad (3.14)$$

$$N = k2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n2} \quad (3.15)$$

Onde:

N = Vida de fadiga ou número de aplicações de carga;

$\Delta\sigma$ = Diferença de tensões no centro do corpo de prova;

σ_t = tensão de tração;

k1, k2, n1 e n2 = constantes determinadas experimentalmente.

A Figura 3.25 mostra o equipamento utilizado neste ensaio. Nesta pesquisa foram as tensões utilizadas nesta pesquisa foram as de 10%, 20% e 30% da resistência à tração, para chegar a essas tensões, é necessário aplicar uma carga (F) que as induza, que é calculada pela equação:

$$F = \frac{\pi \times D \times H}{2} \times (\%RT) \quad (3.16)$$

Onde:

D = Diâmetro do corpo de prova

H = Altura do corpo de prova

%RT = Níveis de tensões do RT



Figura 3.25 – Equipamento utilizado para o ensaio de vida de fadiga

A partir do número de aplicações de carga (N), plota-se um gráfico logarítmico N vs diferença entre tensão máxima horizontal e vertical no centro do corpo de prova ($\Delta\sigma$), conforme a equação:

$$\Delta\sigma = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (3.17)$$

A curva de vida de fadiga também pode ser dada pelo gráfico N vs deformação específica resiliente (ϵ_i), que é calculado por:

$$\epsilon_i = \frac{\%RT}{MR} \quad (3.18)$$

3.2.4. Dimensionamento do Pavimento

O dimensionamento adequado do pavimento é importante para minimizar os defeitos que possam ocorrer. Os métodos para dimensionamento de pavimentos estão agrupados em dois grupos: empíricos, que são aqueles que são concebidos através de experiências em campo e com base em observações, e o método mecanístico, que é concebido a partir da teoria da elasticidade e consideram a estrutura do pavimento como um sistema de multicamadas, avaliando o comportamento mecânicos dos pavimentos (Silveira, 2005).

Franco (2007) elaborou um método com uma abordagem empírica e macanística através do software SisPav. Nesta pesquisa optou-se por utilizar as

equações características de cada mistura, oriundas do ensaio de vida de fadiga. Assim, é possível fazer uma simulação da deformação e, portanto, estimar a vida útil do pavimento.

A Figura 3.26 apresenta o fluxograma do método do dimensionamento desenvolvido por Franco (2007).

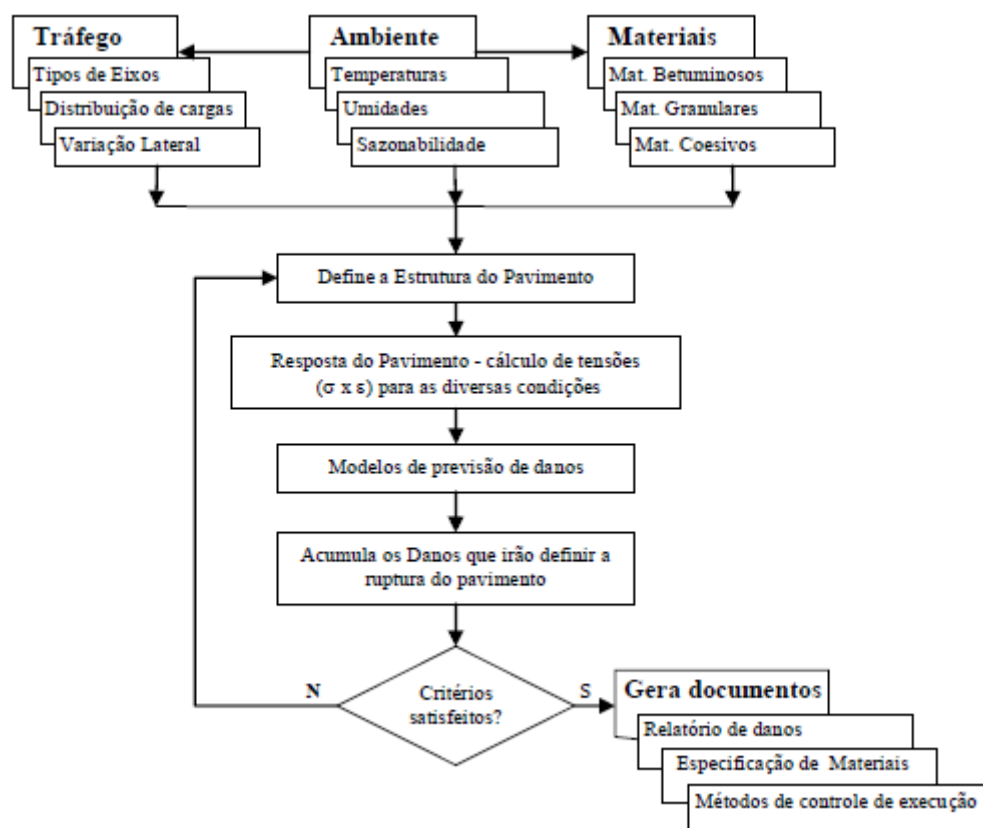


Figura 3.26 – Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento (Franco, 2007)

Para avaliar o comportamento da adição de PET nas misturas asfálticas, foi feita uma simulação no SisPav.

A estrutura de pavimentos adotada é composta por quatro camadas: revestimento, base, sub-base e subleito. Na composição de camadas de subleito, base e sub-base foram escolhidos a partir dos valores recomendados por Franco (2007), como mostrados da Figura 3.27. No revestimento asfáltico, foram utilizados os valores variáveis encontrados no ensaio de vida de fadiga e Módulo de Resiliência e a espessura adotada foi de 5,0 cm.



Figura 3.27 – Estrutura do pavimento adotado na pesquisa

Para o tráfego, foi escolhido um número N, que é definido pelo número de repetições de um eixo-padrão de 8,2 toneladas durante o período de vida útil do projeto, igual a $1,212 \times 10^7$, correspondendo a um tráfego pesado.

Para o clima, foi escolhida a região do Rio de Janeiro-RJ e o nível de confiabilidade adotado foi de 90%.

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo os resultados e as análises dos ensaios realizados nesta pesquisa são apresentados, tanto os da mistura convencional, quanto os das misturas com adição de flakes de PET e substituição do agregado miúdo por pó de PET. Estes resultados ajudarão a compreender como a presença do Polietileno Tereftalato pode melhorar os parâmetros de resistência dos revestimentos asfálticos.

4.1. Caracterização dos Agregados

Os resultados dos ensaios de caracterização de agregados realizados nos agregados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 -Resultado dos ensaios de caracterização dos agregados

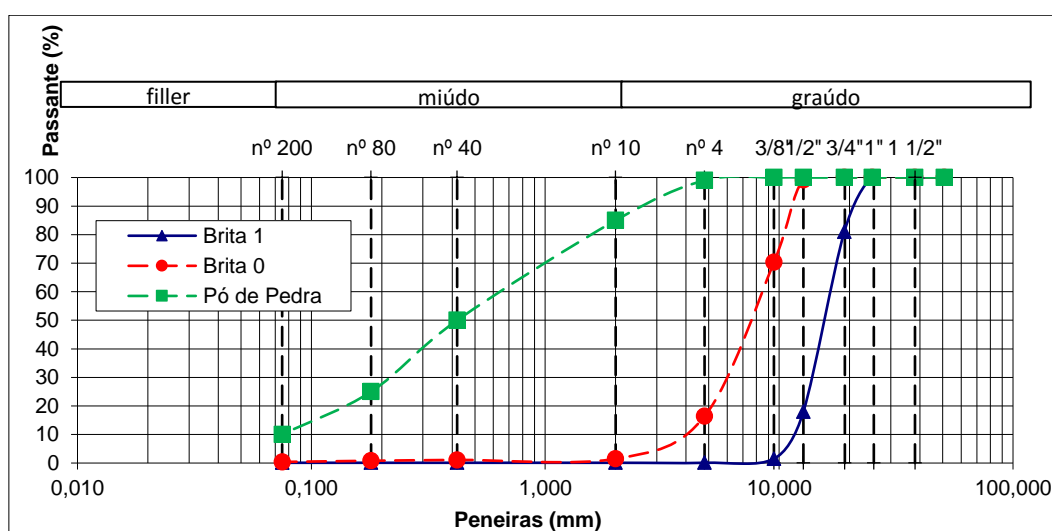
Ensaio	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	Limites
Abrasão Los Angeles	23%	35%	-	máx 40%
Densidade Real	2,7	2,8	2,74	-
Densidade Aparente	2,6	2,1	-	-
Absorção	0,75%	0,80%	-	-
Equivalente de Areia	-	-	78%	mín 35%
Adesividade (CAP 30/45 + DOPE)	Satisfatório	-	-	-
Sanidade	2,3	2,2	3,5	máx 10%

Assim, foi observado que os agregados possuem as características para a utilização em misturas asfálticas. Porém, a adesividade com o CAP 30/45 não foi satisfatória, portanto, optou-se pela utilização do aditivo DOPE na porcentagem de 1%.

Cada tipo de agregado foi peneirado para determinar as curvas granulométricas. A Tabela 4.2 mostra a granulometria dos agregados e a Figura 4.1 ilustra as suas curvas granulométricas.

Tabela 4.2 – Granulometria dos agregados

Peneiras		% Passante		
		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA
(pol.)	(mm)	Total	Total	Total
2"	50,8	100	100	100
1 1/2"	38	100	100	100
1"	25	100	100	100
3/4"	19	81	100	100
1/2"	12,7	18	99,2	100
3/8"	9,5	1,5	70,3	100
n.º 4	4,8	0,1	16,4	99
n.º 10	2	0,1	1,5	85
n.º 40	0,42	0,1	1,1	50
n.º 80	0,18	0,1	0,8	25
n.º 200	0,075	0,1	0,4	10

**Figura 4.1 – Curva Granulométrica dos agregados**

A Faixa Granulométrica escolhida foi a C, já que se deseja utilizar a mistura asfáltica com adição de PET na camada de rolamento. A composição dos agregados foi o método das tentativas. As proporções estão apresentadas na Tabela 4.3 e a curva granulométrica final da mistura está indicada na Figura 4.2.

Tabela 4.3 – Proporção de cada agregado e granulometria enquadrada na Faixa C do DNIT

% Passante		BRITA 1		BRITA 0		PÓ DE PEDRA		DNIT		Curva
(pol.)	(mm)	Amostra total	Tentativa	Amostra total	Tentativa	Amostra total	Tentativa	FAIXA C		
								Fx Proj.	Fx Proj.	Mistura
2"	50,8	100	9	100	46	100	45	100	100	100
1 1/2"	38	100	9	100	46	100	45	100	100	100
1"	25	100	9	100	46	100	45	100	100	100
3/4"	19	81	7,29	100	46	100	45	100	100	98,29
1/2"	12,7	18	1,62	99,2	45,632	100	45	80	100	92,25
3/8"	9,5	1,5	0,135	70,3	32,338	100	45	70	90	77,47
n.º 4	4,8	0,1	0,009	16,4	7,544	99	44,55	44	72	52,10
n.º 10	2	0,1	0,009	1,5	0,69	85	38,25	22	50	38,95
n.º 40	0,42	0,1	0,009	1,1	0,506	50	22,5	8	26	23,02
n.º 80	0,18	0,1	0,009	0,8	0,368	25	11,25	4	16	11,63
n.º 200	0,075	0,1	0,009	0,4	0,184	10	4,5	2	10	4,69

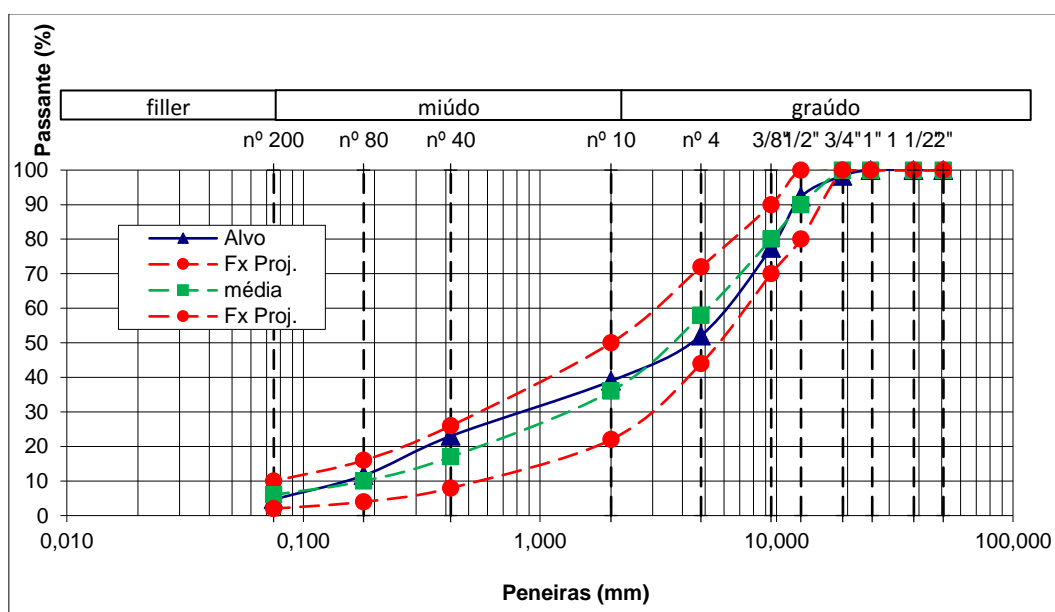


Figura 4.2 – Curva granulométrica final da mistura estudada

Nascimento (2015) utilizou os mesmos agregados desta pesquisa em seu trabalho e realizou o ensaio AIMS no Laboratório do CENPES/Petrobrás e chegou aos resultados da Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados do ensaio AIMS (Nascimento, 2015)

PROPRIEDADES	CLASSIFICAÇÃO	AGREGADO (PASSANTE / RETIDO)					
		19 / 12,5		12,5 / 9,5		9,5 / 4,75	
		%	% ACUMULADO	%	% ACUMULADO	%	% ACUMULADO
Esfericidade	Lamelar/Alongado	18%	18%	14%	14%	41%	41%
	Baixa	34%	52%	46%	61%	38%	78%
	Moderada	32%	84%	31%	92%	15%	93%
	Alta	16%	100%	8%	100%	7%	100%
Índice de Forma	Circular	46%	46%	42%	42%	30%	30%
	Semi-circular	34%	80%	32%	75%	32%	63%
	Semi-alongado	18%	98%	24%	99%	28%	91%
	Alongado	2%	100%	1%	100%	9%	100%
Angularidade	Arredondado	25%	25%	13%	13%	8%	8%
	Sub-arredondado	73%	98%	83%	96%	85%	94%
	Sub-angular	2%	100%	4%	100%	6%	100%
	Angular	0%	100%	0%	100%	0%	100%
Textura	Polido	4%	4%	7%	7%	40%	40%
	Liso	30%	34%	35%	42%	40%	79%
	Baixa rugosidade	20%	54%	18%	61%	9%	89%
	Moderada rugosidade	32%	86%	32%	93%	5%	94%
	Alta rugosidade	14%	100%	7%	100%	6%	100%
Partículas Chatas e Alongadas	Razão de dimensões > 1:3	11%	-	17%	-	39%	-
	Razão de dimensões > 1:5	0%	-	0%	-	2%	-

4.2.

Caracterização do Ligante Asfáltico

Os resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico, CAP 30/45, utilizado nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultado dos ensaios de caracterização do Ligante

Ensaio	Ligante 30/45	Limites
Penetração	36 mm	30 a 45
Ponto de Amolecimento	52 °C	mín 52
Viscosidade Brookfield	135°, SP 21, 20rpm	472,5 cp mín 374
	150° SP 21 20 rpm	227 cp mín 203
	177° SP 21 50 rpm	81,5 cp 76 a 285
Ponto de Fulgor	348 °C	mín 235
Ductilidade	>100 cm	mín 60
Solubilidade	99,9%	mín 99,5
Densidade	1,01	-
RTFOT	Penetração Retida	69% mín 60
	Aumento do PA	4°C máx 8
	Ductilidade	>100mm mín 10
	Variação em Massa	-0,09% máx 0,5

Os valores encontrados nos ensaios de caracterização do CAP 30/45 foram coerentes com os limites apontados pela Agência Nacional do Petróleo, podendo, então, ser utilizado nas misturas asfálticas deste estudo.

A partir dos valores de viscosidade encontrados pelo Viscosímetro Brookfield, foi possível traçar o gráfico Viscosidade vs Temperatura (Figura 4.3) e, assim, determinar as temperaturas de mistura e compactação, como explicado na Seção 2.5.2. A temperatura de compactação encontrada foi 152°C e a de mistura foi 164°C.

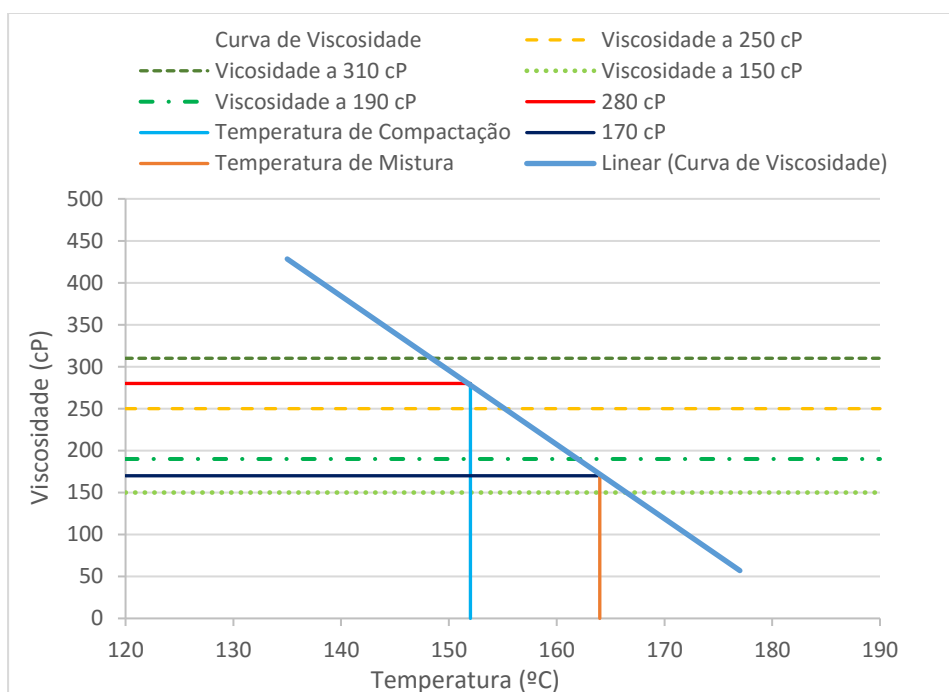


Figura 4.3 – Curva Viscosidade vs Temperatura

4.3. Caracterização do PET

Os flakes e o pó de PET foram peneirados e, assim, encontrou-se as seguintes porcentagens passantes, como são mostradas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Porcentagem passante do PET utilizado na pesquisa

% Passante		Flakes 2 mm	Flakes 10 mm	Pó de PET
(pol.)	(mm)	Amostra Total	Amostra Total	Amostra Total
2"	50,8	100	100	100
1 1/2"	38	100	100	100
1"	25	100	100	100
3/4"	19	100	100	100
1/2"	12,7	100	100	100
3/8"	9,5	100	100	100
n.º 4	4,8	100	97,7	100
n.º 10	2	81,6	27,5	100
n.º 40	0,42	3,7	0,9	100
n.º 80	0,18	0,13	0,05	86
n.º 200	0,075	0	0	15

Assim, foram encontradas as seguintes curvas granulométricas, que são mostradas na Figura 4.4.

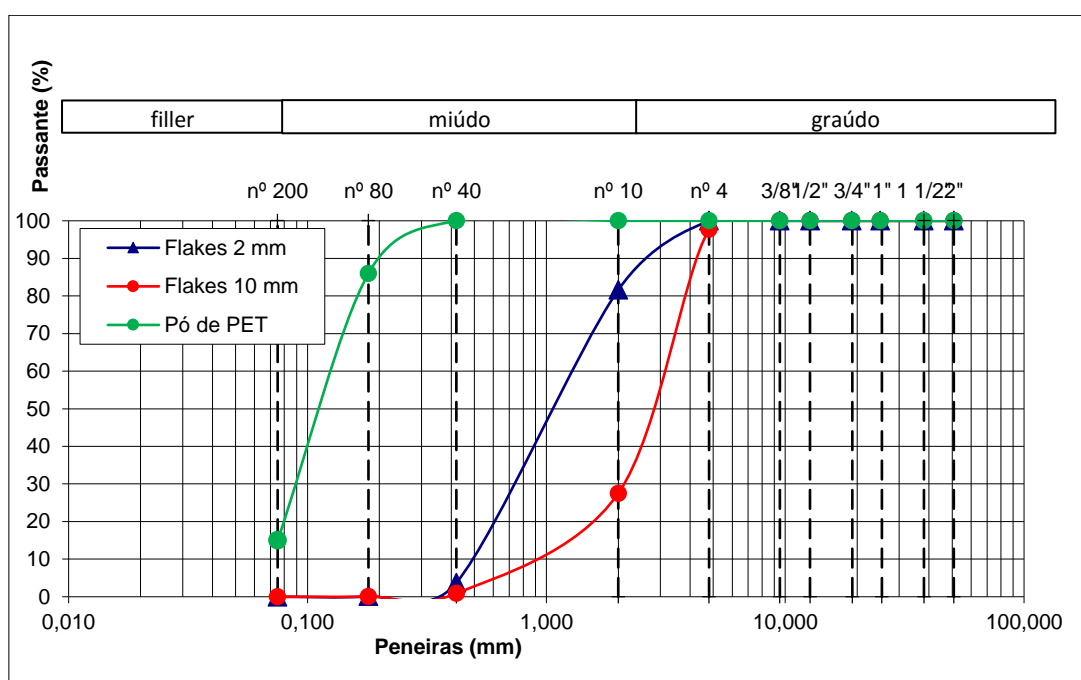


Figura 4.4 – Curvas Granulométricas do PET

Para determinar as curvas granulométricas dos flakes de PET, encontrou-se uma dificuldade no peneiramento. Os flakes são laminares, leves e flexíveis, por

isso, o peneiramento mecânico não foi possível ser realizado. Já o peneiramento manual, fez com que alguns flakes de PET passassem pelas peneiras dobrando-se, assim, foi concluído que as curvas granulométricas do PET triturado podem não ser “reais”.

O ensaio de densidade das partículas de PET não foi possível ser realizado, pois a baixa densidade fez as partículas de PET boiarem, o que impossibilitou a saída dos vazios. Segundo Louzada (2015), o peso específico do pó de PET utilizado é igual a 1,44.

O polietileno tereftalato é um material inerte e demora quase meio século para se decompor, por isso, não foram realizados os ensaios de durabilidade e absorção.

4.4. Determinação do Teor Ótimo

Como explicado na Seção 3.2.2, o teor provável de projeto foi calculado e o resultado encontrado foi igual a 5,2%, porém, optou-se por utilizar como 5,5%. Assim, foram compactados os CPs nos teores: 4,5%; 5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5%.

Os parâmetros volumétricos foram encontrados para os teores de 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5%, e são apresentados na Tabela 4.7. Pode-se perceber que os resultados dos ensaios mecânicos estão acima do limite mínimo estabelecido nas normas apresentadas na Tabela 3.5 dada na Seção 3.2.2.

Tabela 4.7 – Parâmetros volumétricos e mecânicos para cálculo do teor ótimo de ligante

Resultado das Tentativas	I	II	III	IV	V
Teor de CAP (%)	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50
Massa Específica Medida (Gmm)	2,545	2,479	2,450	2,434	2,448
Massa Específica Aparente (Gmb)	2,339	2,362	2,387	2,403	2,409
% Vazios (%V)	8,11	4,73	2,58	1,27	1,61
Vazios Cheios de Betume (VCB)	10,42	11,69	13,00	14,28	15,50
Vazios do Agreg. Mineral (VAM)	18,53	16,42	15,58	15,55	17,11
Relação Betume - Vazios (RBV)	56,23	71,19	83,44	91,83	90,59
Estabilidade (kgf)	1203	1398	1291	1624	1403
Resistência à Tração	1,0	1,7	1,2	1,3	1,2

A Figura 4.5 mostra o gráfico Vv e RBV vs Teor de Ligante encontrado nesta pesquisa, com os limites da Tabela 3.5 de Vv e RBV, para encontrar o teor ótimo de ligante.

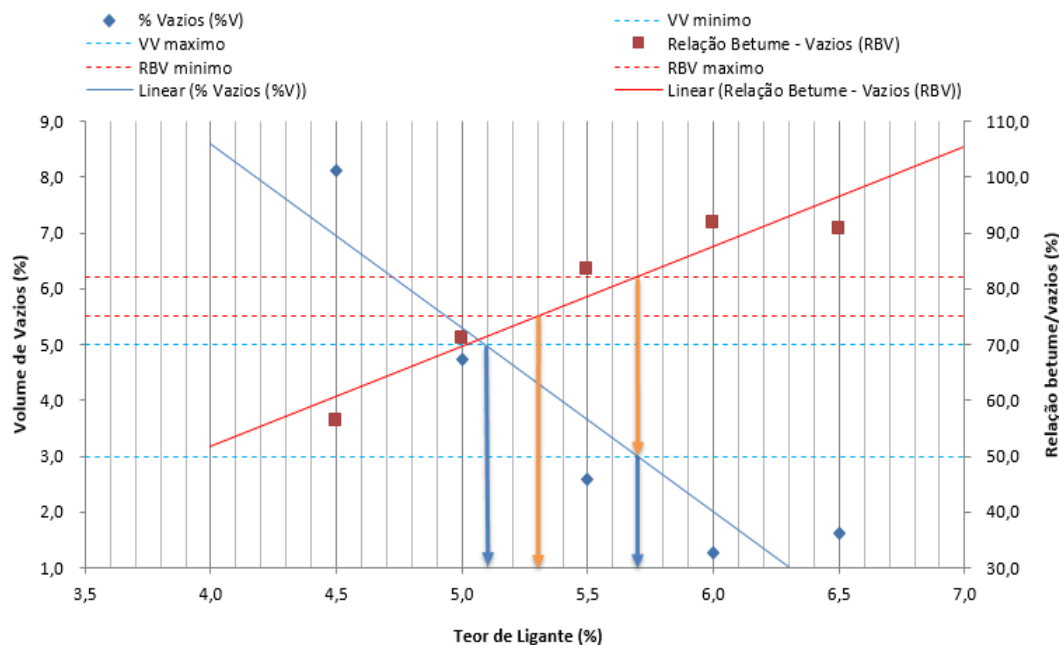


Figura 4.5 – Gráfico Vv e RBV vs Teor de Ligante, com os valores de X1, X2, X3 e X4 marcados no gráfico.

Assim, foram encontrados os valores de X: X1 = 5,1; X2 = 5,3; X3 = 5,7; X4 = 5,7. Portanto, o teor ótimo de ligante é 5,5%. Segundo Bernucci *et al.* (2008), o teor ótimo de ligante na mistura na Faixa C normalmente é de 4,5% a 9,0% para a camada de rolamento, portanto, pode-se considerar o teor encontrado coerente.

4.5. Compactação Marshall

A partir da determinação do teor ótimo, como mostrado na Seção 3.2.2, foram compactados os 72 corpos de prova para os ensaios mecânicos, para as seis misturas diferentes, cada um com aproximadamente 1200g, compactados a 75 golpes em cada face (correspondente para a camada de rolamento), com teor de ligante de 5,5%.

Ao contrário da maior parte das pesquisas com polímeros, não houve a modificação do CAP e, sim, a adição de PET diretamente na mistura e, também, a

substituição de uma parte do pó de pedra pelo pó de PET na granulometria da mistura. Deste modo, nas misturas em que os flakes que foram inseridos, houve a retirada a porcentagem de PET do total da mistura para não aumentar o peso do corpo de prova. A quantidade de cada material (porcentagem em peso) nas misturas é apresentada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Quantidade de material em cada mistura em porcentagem

Material	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)	M4 (%)	M5 (%)	M6 (%)
CAP 30/45	5,5	5,5	5,4	5,5	5,4	5,5
BRITA 1	8,5	8,5	8,4	8,5	8,4	8,5
BRITA 0	43,5	43,3	43,0	43,3	43,0	43,3
PÓ DE PEDRA	42,5	42,3	42,1	42,3	42,1	39,8
Flakes de PET	-	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
Pó de PET	-	-	-	-	-	2,5
Total (%)	100	100	100	100	100	100

Onde:

M1: CBUQ convencional;

M2: CBUQ com 0,5% de flakes de PET de 2 mm;

M3: CBUQ com 1,0% de flakes de PET de 2 mm;

M4: CBUQ com 0,5% de flakes de PET de 10 mm;

M5: CBUQ com 1,0% de flakes de PET de 10 mm;

M6: CBUQ com 0,5% de flakes de PET de 10 mm e substituição de pó de pedra por 2,5% de pó de PET.

4.5.1.

Parâmetros volumétricos

Após a confecção dos corpos de prova, os ensaios volumétricos para a determinação da massa específica aparente (G_{mb}) e da densidade máxima medida (G_{mm}) de cada mistura, para calcular os parâmetros volumétricos.

A Tabela 4.9 mostra a comparação entre os parâmetros volumétricos encontrados em cada mistura. Todas as misturas atenderam aos limites especificados pela norma do DNIT DNER-ME 043.

Tabela 4.9 – Tabela comparativa entre os parâmetros volumétricos encontrados em cada mistura.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Limites
Gmm(g/cm ³)	2,496	2,479	2,463	2,457	2,432	2,457	-
Gmb (g/cm ³)	2,395	2,375	2,361	2,369	2,342	2,369	-
Vv (%)	4,2	4,2	4,1	3,6	3,7	3,6	3-5
VCB (%)	12,8	12,9	12,6	12,7	12,5	12,7	-
VAM (%)	17,0	17,1	16,8	16,3	16,2	16,3	-
RBV (%)	75,3	75,2	75,3	78,0	77,2	78,0	75-82

Houve pouca mudança no volume de vazios (Vv) entre as misturas M1, M2 e M3. Isso pode ter acontecido pela baixa porcentagem de PET na mistura e, como as partículas dos flakes são de 2 mm, o volume de PET utilizado era baixo, logo, não influenciando muito nos parâmetros volumétricos.

Já nas misturas M4, M5 e M6, os volumes de vazios foram mais baixos em comparação às outras três misturas e similares entre si. Os flakes de PET de 10 mm aumentaram o volume de material na mistura, fazendo com que o Vv caísse, porém, ainda dentro dos limites estabelecidos em norma.

4.6. Ensaio mecânicos

Os resultados dos ensaios mecânicos de Estabilidade e Fluência Marshall, Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Vida de Fadiga serão apresentados neste item.

4.6.1. Estabilidade e Fluência Marshall

A execução dos ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall foram realizados após um banho dos corpos de prova por 40 minutos a 60°C. Para a determinação deste parâmetro, foram compactados 18 corpos de prova, sendo três para cada mistura. Os resultados estão apresentados na Figura 4.6 e na Figura 4.7.

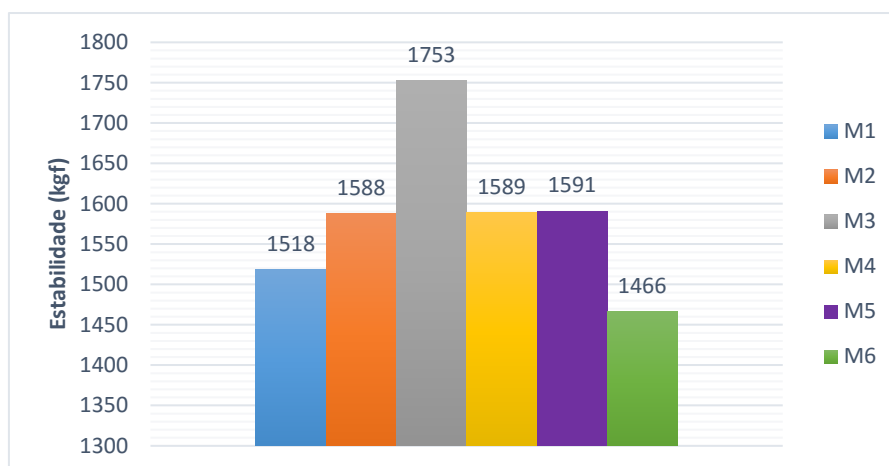


Figura 4.6 – Resultados dos ensaios de Estabilidade Marshall

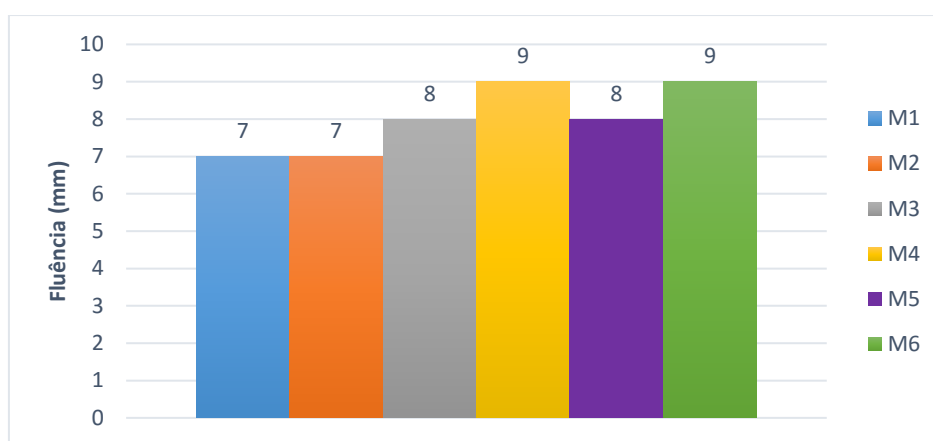


Figura 4.7 – Resultados dos ensaios de Fluência Marshall

Os ensaios Estabilidade Marshall obtiveram resultados satisfatórios. As misturas M2, M4 e M5 tiveram um pequeno aumento em relação à mistura convencional (M1) e com resultados muito semelhantes entre si.

Já a mistura M3 resultou em um aumento significativo da Estabilidade, isso ocorreu porque a mistura com a porcentagem de 1,0% de flakes de PET com tamanho de 2 mm pode ter melhorado o entrosamento entre as partículas. Além disso, esse resultado aponta que pode haver uma maior rigidez nessas misturas.

Na mistura M6, houve uma diminuição da Estabilidade e, provavelmente, isso deve ter ocorrido pela presença do pó de PET como substituição do pó de pedra na mistura, diminuindo o entrosamento entre as partículas.

Os resultados dos ensaios de Fluência apresentaram valores similares, porém, os resultados um pouco mais elevados nas misturas M4 e M6 podem mostrar que a deformação dessas misturas é maior.

4.6.2. Resistência à Tração

A execução dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral foi realizada seguindo à norma DNER-ME 138/94 na temperatura de 25°C. Foram moldados 18 corpos de prova, sendo três para cada mistura. Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 4.8.

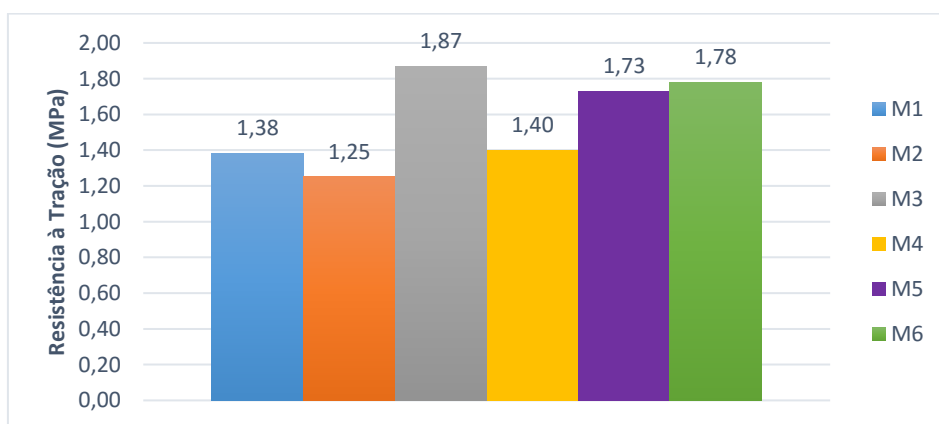


Figura 4.8 – Resultados dos ensaios de RT

Os resultados dos ensaios mostraram uma tendência de aumento de Resistência à Tração com o aumento de quantidade de PET na mistura.

A mistura M2 apresentou uma resistência menor do que a mistura convencional, porém, a diminuição foi pequena, menos de 10% do valor de M1. Além disso, o resultado apresentou maior resistência do que a recomendada pela norma, que é 0,65 MPa, ou seja, a mistura M2 obteve valor maior do que o dobro do preconizado.

A mistura M4 obteve um resultado de resistência parecido com a da mistura convencional M1. Apesar disso, a mistura M6, que possui a mesma quantidade de flakes de PET da mistura M4, obteve uma resistência muito maior. A diferença entre as duas é a utilização de pó de PET como agregado e isso pode ter influenciado nos resultados.

No trabalho de Silva *et al.* (2013), os valores de RT diminuíram quanto maior fosse a porcentagem de pó de PET na mistura, encontrando um resultado igual a 1,109 MPa com 2,5% de PET como agregado. Levando em consideração que o ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70 e não foram adicionados os flakes de PET na mistura, os valores encontrados nesta pesquisa não diferem muito do apresentado pela mistura M6.

As misturas M3 e M5 alcançaram valores altos de resistência, o que indica um aumento do RT em função do aumento de flakes de PET.

4.6.3. Módulo de Resiliência

Para os ensaios de Módulo de Resiliência, foram moldados seis corpos de prova para cada mistura, totalizando 36 CPs. O ensaio foi realizado no equipamento de compressão diametral com cargas repetidas a uma temperatura a 25°C.

Os resultados do ensaio de Módulo de Resiliência e seus parâmetros estatísticos estão contidos na Tabela 4.10. Os valores de MR foram primeiramente tratados estatisticamente pelo Teste de Grubbs, que verifica se existe algum valor discrepante dentro de um espaço amostral. Portanto, como não houve nenhum valor extremo, a partir deste método estatístico, o valor de MR foi calculado através da média aritmética.

Tabela 4.10 – Tabela com os resultados do ensaio de MR em Mpa e os parâmetros estatísticos do Teste de Grubbs

CP	MR - M1	MR - M2	MR - M3	MR - M4	MR - M5	MR - M6
1	6432	9068	5619	5062	4533	5203
	6512	8863	5660	4953	4339	5415
	6429	11963	5637	4981	4256	5223
2	6111	14463	4886	4798	5191	6992
	6167	10683	4798	4771	4993	6966
	5898	11517	4680	4897	4857	6845
3	6394	4746	5698	5335	9622	6308
	6410	4996	5631	5372	9739	5996
	6303	4565	5460	5372	9714	5991
4	7700	5543	5311	6136	4592	6819
	7440	5441	5351	6212	4712	6659
	7170	5374	5291	5987	4653	6760
5	6263	5129	4932	6448	4589	6940
	6202	5122	5044	6412	4625	6820
	6173	4731	4875	6485	4636	6549
6	5355	6135	4729	5058	5485	5972
	5039	6150	4631	5099	5216	5509
	5006	6034	4653	5001	5486	6243
MR Médio (Mpa)	6278	7251	5160	5466	5624	6289
Desvio Padrão	707	3046	396	625	1904	625
Valor Mínimo	5006	4565	4631	4771	4256	5203
Valor Máximo	7700	14463	5698	6485	9739	6992
T mínimo	1,798	0,882	1,335	1,111	0,719	1,738
T máximo	2,010	2,368	1,356	1,631	2,161	1,124
T crítico	2,504	2,504	2,504	2,504	2,504	2,504
Valor Extremo?	Não	Não	Não	Não	Não	Não

A Figura 4.9 mostra um gráfico comparativo dos valores médios dos ensaios de Módulo de Resiliência para cada mistura desenvolvida nesta pesquisa.

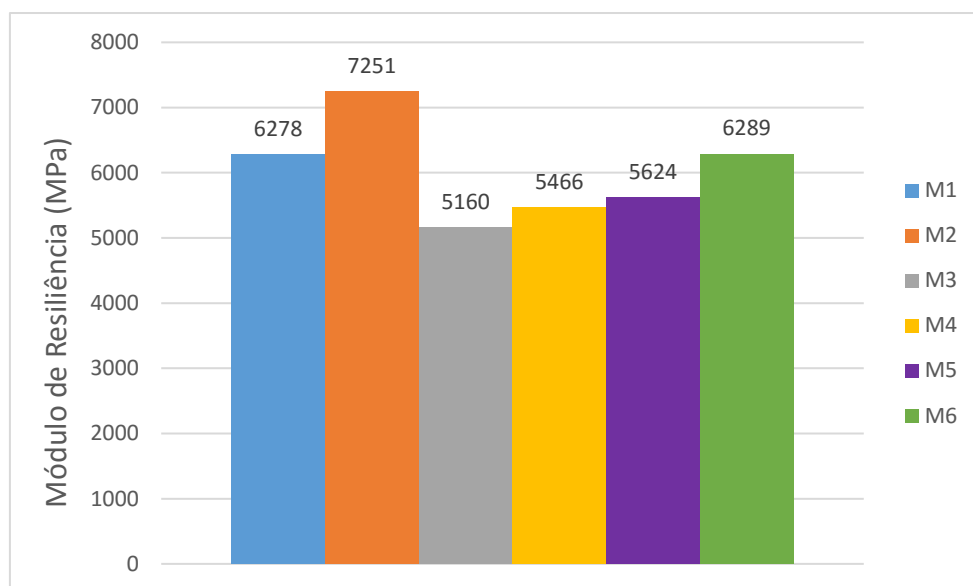


Figura 4.9 – Resultados dos ensaios de MR para cada mistura

Pela análise do gráfico, pode-se perceber que os valores de Módulo de Resiliência se mantiveram muito próximos, com exceção da mistura M2, que obteve um resultado muito mais alto, porém, foi a mistura que obteve o maior nível de dispersão, apesar de passar pelo Teste de Grubbs.

Nas misturas M3, M4 e M5, os Módulos de Resiliência foram menores em relação à mistura convencional M1. Esses valores são coerentes, já que na pesquisa de Moghaddam *et al.* (2012), foram obtidos resultados menores de MR quanto maior era a quantidade de flakes de PET na mistura SMA. Acredita-se que, como o ponto de fusão do PET é alto (aproximadamente 250°C), ele não derrete na mistura asfáltica, que chega a aproximadamente a 160°C, porém, o calor pode mudar algumas características do PET, pois alcança a temperatura de transição vítrea (70°C), o que deixa as misturas mais flexíveis e, por conseguinte, causando maiores deformações e menores valores de Módulo de Resiliência.

O Módulo de Resiliência também apresentou o mesmo comportamento na pesquisa de Silva *et al.* (2013), os valores diminuíram quanto maior a porcentagem de pó de PET na mistura, sendo o valor encontrado, para 2,5% de PET, igual a 4381,5 MPa. Porém, o valor de MR na mistura M6, quando foi utilizado o pó de PET, foi obtido um pequeno aumento da rigidez em relação à mistura M1, obtendo o valor de 6289 MPa.

Assim, com o valor de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência, pode-se calcular a relação MR/RT, como mostra a Tabela 4.11, que está sendo utilizada como um indicador da vida de fadiga de misturas asfálticas.

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de MR e RT e a relação MR/RT

Mistura	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
M1	6278	1,38	4549
M2	7251	1,25	5801
M3	5160	1,87	2759
M4	5466	1,40	3904
M5	5624	1,73	3251
M6	6289	1,78	3533

As misturas asfálticas com Módulo de Resiliência muito elevados significam que possuem uma rigidez elevada e necessitam de altos valores de Resistência à Tração, devido à concentração de esforços no seu interior. Um valor pequeno na razão MR/RT é favorável, já que muitas vezes é procurado baixa rigidez para evitar a elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro do revestimento.

4.6.4. Vida de Fadiga

O comportamento das misturas em relação à fadiga foi encontrado através do ensaio de compressão diametral sob tensão controlada. O ensaio de fadiga foi realizado com três níveis de tensões: 10%, 20% e 30% da Resistência à Tração. Foram utilizados os mesmos seis corpos de prova, para cada mistura, utilizados no ensaio de Módulo de Resiliência, totalizando 36 CPs.

A vida de fadiga pode ser expressa em função da diferença de tensões verticais de compressão e horizontais de tração, no centro do corpo de prova. Assim, com os resultados, foi possível traçar os gráficos de N vs $\Delta\sigma$. Além disso, é possível expressar a vida de fadiga em função da deformação específica de cada mistura, através dos resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência. Os resultados dos ensaios foram também expressos através dos gráficos N (número de aplicações) vs ϵ_r (deformação específica resiliente).

4.6.4.1. Mistura M1

A Figura 4.10 apresenta o resultado dos ensaios de vida de fadiga pelo gráfico de Número de aplicações vs Diferença de tensões da mistura convencional M1.

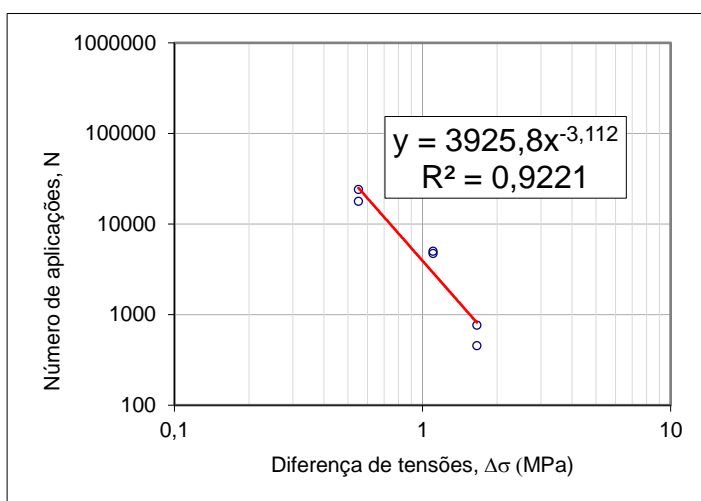


Figura 4.10 – Gráfico Número de Aplicações vs Diferença de Tensões de M1

A

Figura 4.11 ilustra o resultado do ensaio de vida de fadiga da mistura convencional M1, através do gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente.

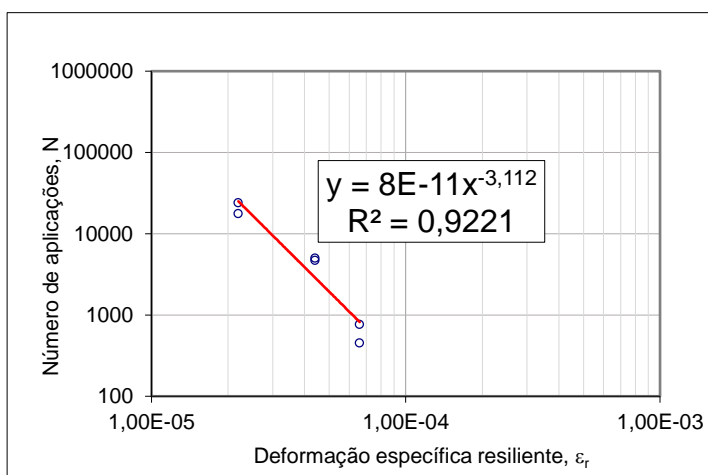


Figura 4.11 – Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente M1

4.6.4.2. Mistura M2

A Figura 4.12 apresenta o resultado dos ensaios de vida de fadiga pelo gráfico de Número de aplicações vs Diferença de tensões da mistura M2, com 0,5% de flakes de PET de 2 mm.

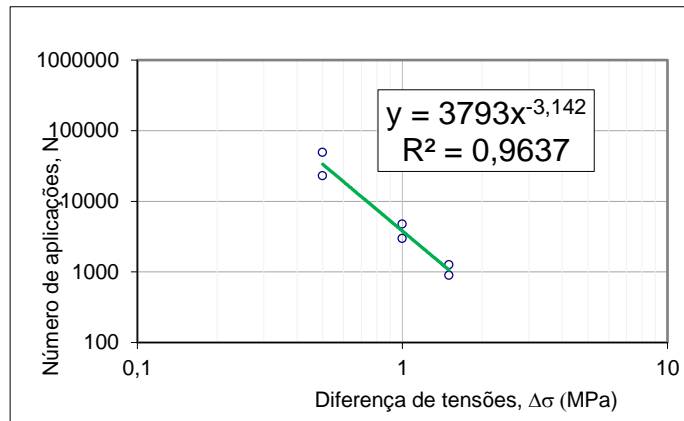


Figura 4.12 – Gráfico Número de Aplicações vs Diferença de Tensões de M2

A Figura 4.13 ilustra o resultado do ensaio de vida de fadiga da mistura convencional M2, através do gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente.

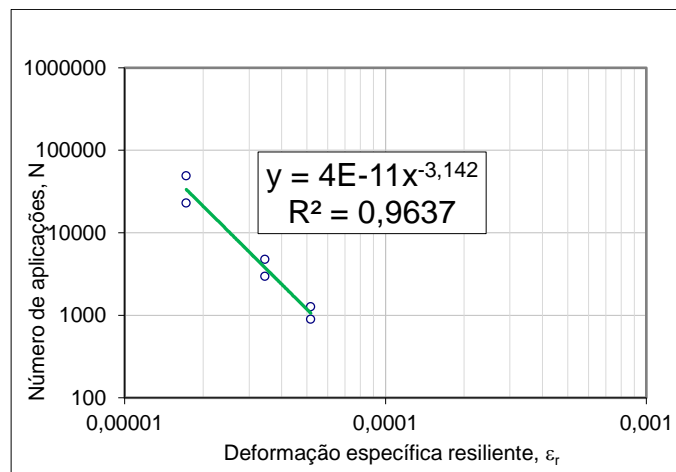


Figura 4.13 - Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M2

4.6.4.3. Mistura M3

A Figura 4.14 apresenta o resultado dos ensaios de vida de fadiga pelo gráfico de Número de aplicações vs Diferença de tensões da mistura M3, com 1,0% de flakes de PET de 2 mm.

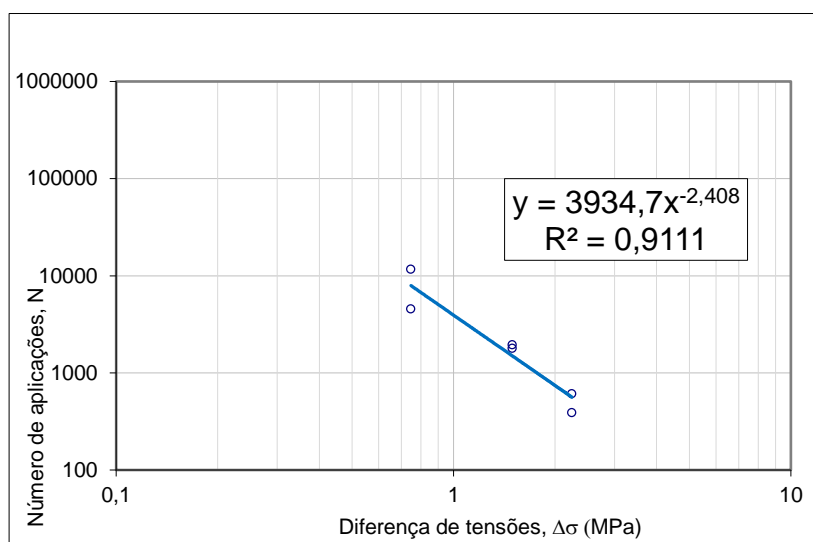


Figura 4.14 – Gráfico Número de Aplicações vs Diferença de Tensões de M3

A Figura 4.15 ilustra o resultado do ensaio de vida de fadiga da mistura convencional M3, através do gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente.

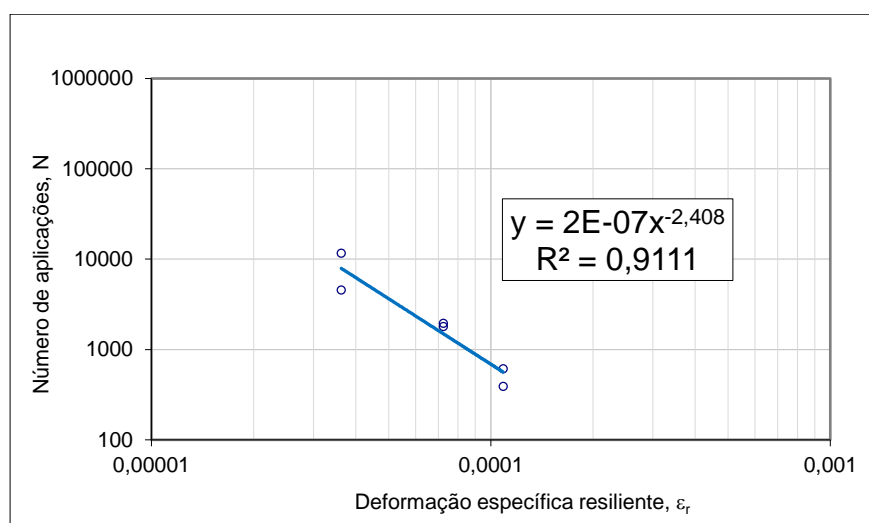


Figura 4.15 – Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M3

4.6.4.4. Mistura M4

A Figura 4.16 apresenta o resultado dos ensaios de vida de fadiga pelo gráfico de Número de aplicações vs Diferença de tensões da mistura M4, com 0,5% de flakes de PET de 10 mm.

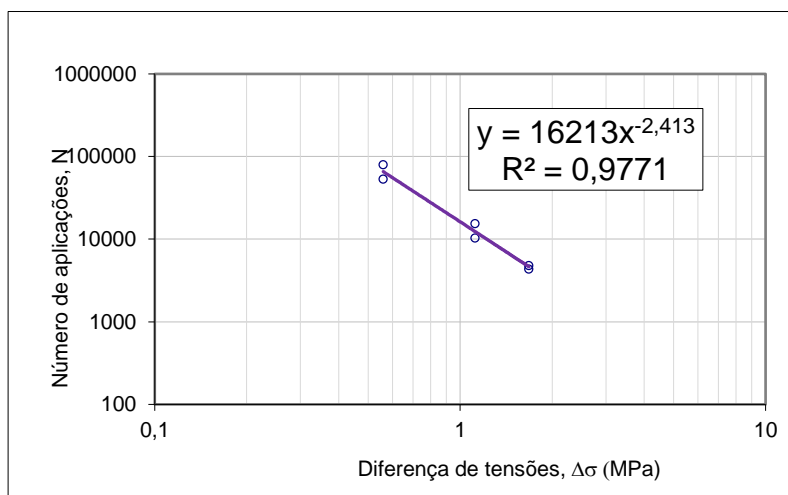


Figura 4.16 – Gráfico Número de Aplicações vs Diferença de Tensões de M4

A Figura 4.17 ilustra o resultado do ensaio de vida de fadiga da mistura convencional M4, através do gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M4.

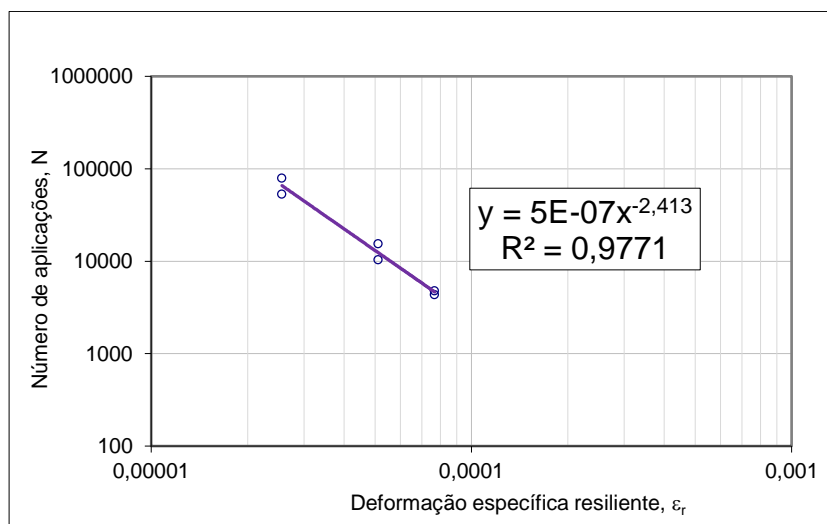


Figura 4.17 – Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M4

4.6.4.5. Mistura M5

A Figura 4.18 apresenta o resultado dos ensaios de vida de fadiga pelo gráfico de Número de aplicações vs Diferença de tensões da mistura M5, com 1,0% de flakes de PET de 10 mm.

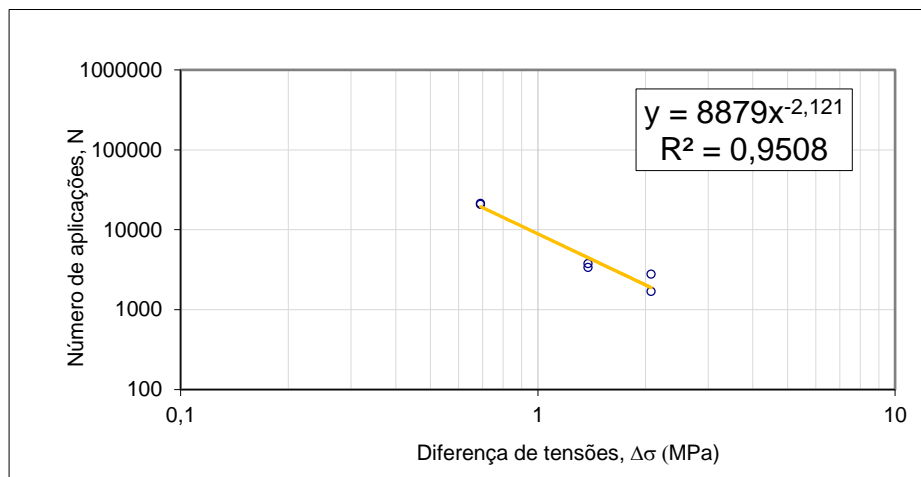


Figura 4.18 – Número de aplicações vs Diferença de tensões da mistura M5

A Figura 4.19 ilustra o resultado do ensaio de vida de fadiga da mistura convencional M5, através do gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M5.

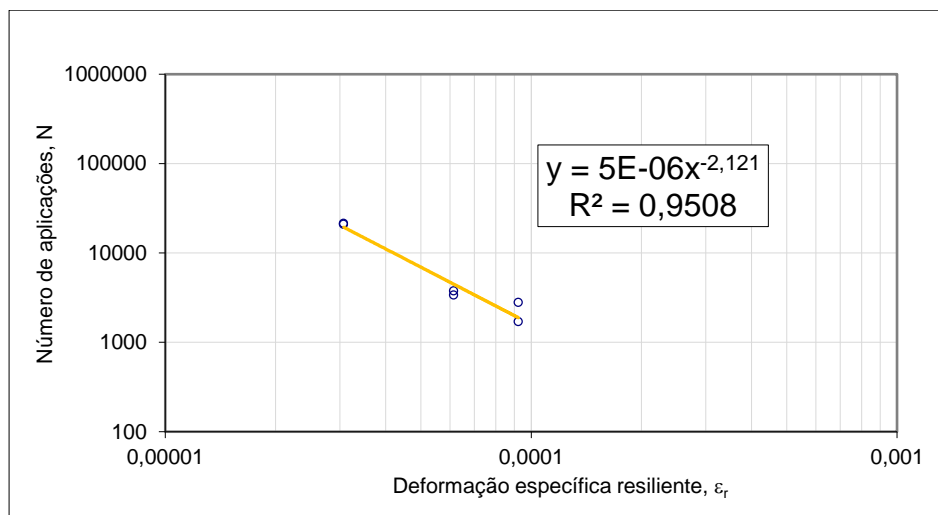


Figura 4.19 – Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M5

4.6.4.6. Mistura M6

A Figura 4.20 apresenta o resultado dos ensaios de vida de fadiga pelo gráfico de Número de aplicações vs Diferença de tensões da mistura M6, com 0,5% de flakes de PET de 10 mm e substituição do pó de pedra por pó de PET na porcentagem de 2,5%.

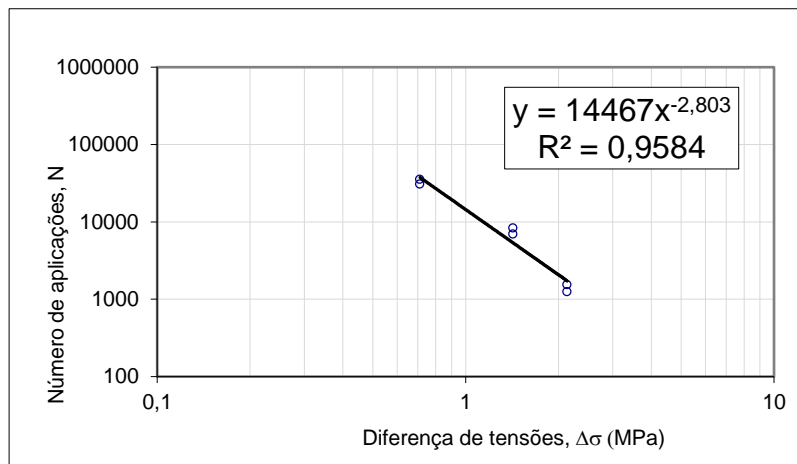


Figura 4.20 – Gráfico Número de aplicações vs Diferença de tensões da mistura M6

A Figura 4.21 ilustra o resultado do ensaio de vida de fadiga da mistura convencional M6, através do gráfico de Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente.

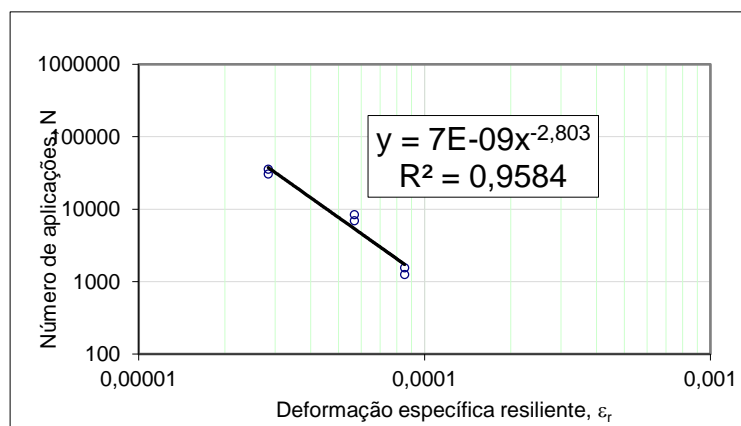


Figura 4.21 – Gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente de M6

4.6.4.7.

Comparação entre as curvas de vida de fadiga

Para fins de comparação, a Figura 4.22 mostra as curvas de vida de fadiga de todas as misturas em apenas um gráfico Número de aplicações vs Diferença de tensões. Na Figura 4.23, apresenta o gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente.

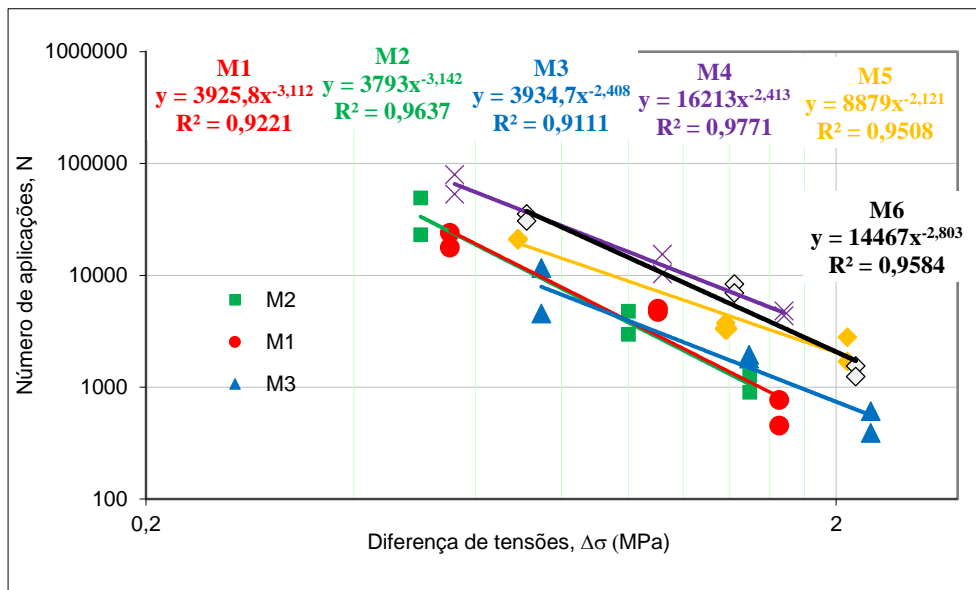


Figura 4.22 – Gráfico com as curvas de vida de fadiga (N vs $\Delta\sigma$) de todas as misturas

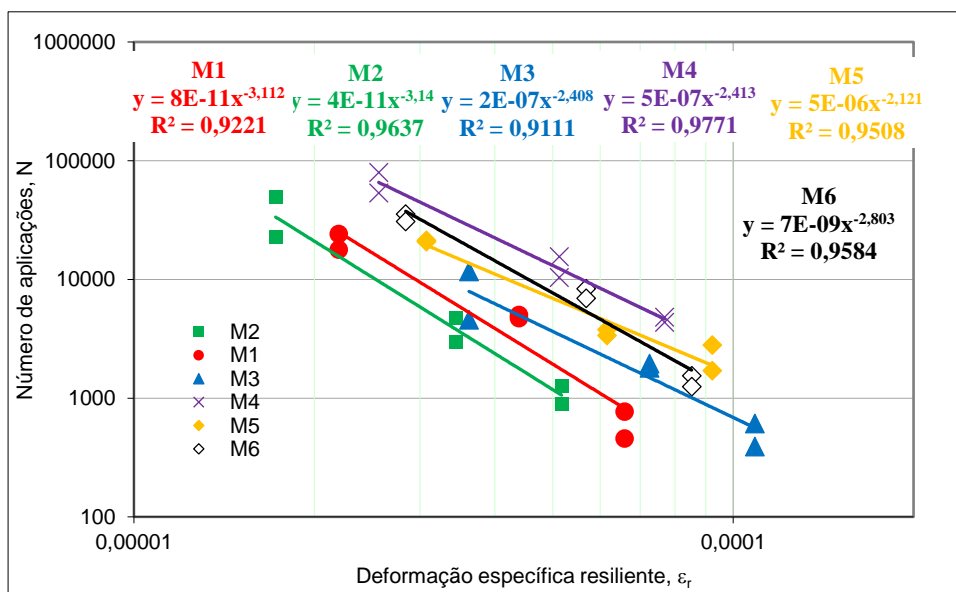


Figura 4.23 – Gráfico com as curvas de vida de fadiga (N vs ϵ_r) de todas as misturas

Os parâmetros de coeficientes de regressão e de correlação referentes às curvas de vida de fadiga são informados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Parâmetros das curvas de vida de fadiga

Mistura	Nf = a1 ($\Delta\sigma$) ^{b1}			Nf = k1 (ϵ_r) ^{k2}		
	a1	b1	R ²	k1	k2	R ²
M1	3925,8	-3,112	0,9221	8,00E-11	-3,112	0,9221
M2	3793	-3,142	0,9637	4,00E-11	-3,142	0,9637
M3	3934,7	-2,408	0,9111	2,00E-07	-2,408	0,9111
M4	16213	-2,413	0,9771	5,00E-07	-2,413	0,9771
M5	8879	-2,121	0,9508	5,00E-06	-2,121	0,9508
M6	14467	-2,803	0,9584	7,00E-09	-2,803	0,9584

A partir das curvas de fadiga, percebe-se que a mistura M4, com 0,5% de PET de 10 mm, apresentou, a priori, um melhor comportamento. Em comparação à mistura convencional M1, apenas a mistura M2 apresentou pior resistência à fadiga.

Porém, segundo Fontes (2009), existe uma tendência de se comparar as curvas de fadiga diretamente no gráfico, porém, isso só é válido quando as diferenças de tensões são as mesmas. Assim, é necessário utilizar outros métodos de comparação, como, por exemplo, a simulação do comportamento dos pavimentos a partir de softwares de dimensionamento, como os programas Elsym e SisPav, inserindo os valores de Módulo de Resiliência e os parâmetros da curva de vida de fadiga, que foram encontrados pelos ensaios realizados nas misturas asfálticas.

4.7.

Dimensionamento do pavimento

Para o dimensionamento do pavimento, foi utilizado o software Sispav, desenvolvido por Franco (2007). Assim, pode-se entender melhor o comportamento das misturas utilizadas nesta pesquisa.

Foram utilizados os parâmetros encontrados nos ensaios de Módulo de Resiliência e de vida de fadiga para as misturas asfálticas e fixou-se a espessura de 5 cm para o revestimento. As espessuras e parâmetros mecânicos das camadas de base, sub-base e subleito foram fixadas como 12 cm, 15 cm e 0, respectivamente. As espessuras das camadas foram escolhidas por serem as menores espessuras que

são aceitas pelo programa, já que existe a intenção em reduzir a quantidade de material utilizado no pavimento. Os parâmetros utilizados foram mostrados na Figura 3.27 e foram recomendados por Franco (2007). Esses valores foram utilizados apenas para que a comparação entre as vidas úteis das misturas estudadas fosse possível.

Portanto, a vida útil para cada mistura, com tráfego pesado ($N = 1,212 \times 10^7$) está apresentada na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Vida útil estimada para cada mistura

Mistura	Vida útil em anos
M1	2,2
M2	1,4
M3	14,7
M4	157,4
M5	73,2
M6	52,6

Assim, pode-se observar que houve um aumento muito significativo na vida útil das misturas M3, M4, M5 e M6, inclusive, as três últimas misturas possuem uma vida útil tão elevada que poderia considerar que o pavimento está superdimensionado. Portanto, seria possível aumentar o volume de tráfego do pavimento para muito pesado.

Deve-se levar em consideração que a vida útil calculada pelo SisPav estuda o comportamento da estrutura do pavimento em relação aos possíveis defeitos, como as trincas por fadiga e a deformação permanente, logo, os defeitos causados pelo envelhecimento natural do pavimento não são representados no dimensionamento, por isso, essa vida útil tão elevada não é “real”, porém, mostra que o comportamento das misturas M4, M5 e M6 são melhores do que as das misturas M1, M2 e M3.

Deste modo é possível concluir que as misturas com 0,5% de flakes de PET 10 mm (M4), 1,0% de PET de 10 mm (M5) e 0,5% de flakes 10 mm e com substituição de 2,5% do pó de pedra por pó de PET (M6) de fato melhoraram o comportamento mecânico das misturas asfálticas em relação à fadiga. Relacionando estes resultados com os de Módulo de Resiliência, pode-se considerar que a mistura

M6 com 0,5% de flakes de PET e substituição do filler pelo pó de PET em 2,5% na granulometria foi a mistura mais adequada, já que apresentou um valor de MR muito próximo ao da mistura convencional, assim, o seu comportamento em relação à deformação permanente pode ser melhor do que as misturas M4 e M5.

4.8.

Estimativa de quantidade de PET a ser utilizado na pavimentação

A ABIPET estima que, em 2016, a quantidade de garrafas PET consumidas no Brasil, estimulado pelos Jogos Olímpicos no Rio de Janeiro, é estimado em 840 kilotoneladas. Assim, é interessante realizar uma estimativa da quantidade de PET que poderia ser reciclado com utilização na pavimentação. Este cálculo foi feito considerando as seguintes características:

- Rodovia com duas faixas de rolamento com 6 metros de largura cada;
- Espessura da camada de revestimento asfáltico de 5 cm;
- Peso da garrafa PET com capacidade de 2 litros igual a 57 gramas.

A Tabela 4.14 apresenta a quantidade de PET que pode ser reutilizada em uma rodovia por quilômetro de extensão.

Tabela 4.14 – Quantidade de PET utilizada por quilômetro de uma rodovia

Mistura	Quantidade de PET (kg)	Quantidade de garrafas PET
M2	7.640	134.029
M3	15.279	268.058
M4	7.640	134.029
M5	15.279	268.058
M6	23.723	416.192

Estes resultados são interessantes, pois, em um quilômetro de rodovia, poderiam ser reutilizados cerca de 0,002% do total do consumo estimado de garrafas PET em 2016.

5 Conclusões

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento de misturas asfálticas do tipo CBUQ com adição de flakes de PET e utilização do pó de PET como agregado miúdo.

A revisão bibliográfica foi montada e, assim, com os recursos disponíveis, foi planejado um programa experimental, cuja metodologia Marshall foi empregada. Assim, foram confeccionadas seis misturas, sendo uma mistura convencional, quatro utilizando flakes de PET de 2 mm e 10 mm e uma utilizando flakes de PET e pó de PET como agregado miúdo.

Portanto, baseadas nos resultados dos ensaios apresentados e analisados previamente, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A utilização de PET influenciou positivamente as misturas asfálticas, porém, o comportamento foi diferente em relação ao tamanho e aos teores de flakes de PET e a substituição do agregado miúdo pelo pó de PET.
- Em relação aos parâmetros volumétricos, todas as misturas se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelo DNIT de volume de vazios (V_v) e de relação betume vazios (RBV). As misturas M2 e M3 (com flakes de PET de 2 mm) obtiveram os parâmetros de V_v e RBV muito similares à mistura convencional, sendo o V_v aproximadamente igual a 4%. Essa semelhança deve ter acontecido pelo fato das partículas de PET serem pequenas e estarem em porcentagem baixa. Já as misturas M4, M5 (flakes de PET de 10 mm) e M6 (flakes de 10 mm e pó de PET) obtiveram um V_v menor, provavelmente pelo fato das partículas serem maiores e, assim, ocuparem um maior volume. Porém, o RBV dessas misturas exibiu um resultado mais adequado, já que as misturas M2, M3 e M4 obtiveram o RBV muito próximo dos limites inferiores preconizados pelo DNIT;
- Nos ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall, observou-se que a mistura M3 apresentou o valor de Estabilidade mais alto e uma Fluência baixa, significando que essa mistura é mais rígida e possui uma deformação menor. Isso pode ter acontecido pela presença de flakes de PET que podem ter melhorado o

entrosamento entre as partículas da mistura. As misturas M2, M4 e M5 apresentaram um resultado de Estabilidade um pouco maior do que a mistura M1, porém, muito similares entre si, mostrando que não houve muita diferença neste parâmetro. Já a mistura M6 obteve o menor valor de Estabilidade, os motivos podem ser a diminuição do entrosamento entre as partículas da mistura e a sua rigidez. Além disso, vale ressaltar que todos os resultados de Estabilidade e Fluência estão de acordo com os limites estabelecidos em norma;

- Nos ensaios de Resistência à Tração, a mistura M2 apresentou um resultado de RT menor do que o da mistura M1, porém essa diminuição foi pequena e o valor do RT continuou acima do preconizado em norma. Já a mistura M4 (com 0,5% flakes de PET de 10 mm) apresentou um resultado semelhante à mistura convencional e a mistura M6, que possui os mesmos flakes de PET de M4, teve um comportamento melhor e isto pode ter sido influenciado pela presença de pó de PET. As misturas M3 e M5 alcançaram valores altos de resistência, o que indica um aumento do RT em função do aumento de flakes de PET;

- Os valores de Módulo de Resiliência encontrados foram muito similares, com exceção da mistura M2, que apresentou um resultado mais alto. As misturas M3, M4 e M5 obtiveram menores valores de MR, em relação à M1. Essa diminuição do MR é coerente com as pesquisas que já utilizaram flakes de PET, como o trabalho de Moghaddam *et al* (2012) e Silva *et al* (2013). Isso pode ocorrer porque as misturas asfálticas chegam a temperaturas aproximadas de 160°C, enquanto que o ponto de transição vítrea do PET é de 70°C, o que pode mudar as propriedades do polietileno tereftalato e, assim, deixar as misturas mais flexíveis e com valores de MR menores. Na mistura M6, entretanto, a presença de pó de PET aumentou um pouco o valor de MR, deixando a mistura mais rígida;

- Nos ensaios de vida de fadiga, observou-se que a mistura M4 e M6 obtiveram curvas mais favoráveis. Porém, como as diferenças de tensões não eram as mesmas em todas as misturas, apenas os resultados deste ensaio não são conclusivos para indicar o comportamento em relação à fadiga;

- Para avaliar o comportamento das misturas, foi realizado o dimensionamento dos pavimentos pelo software SisPav. Assim, notou-se que as misturas M4, M5 e M6 resultaram em vidas úteis muito altas, o que indicou que essas misturas possuíram o melhor comportamento em relação à fadiga, enquanto

que, nos mesmo carregamentos e na mesma estrutura, as outras misturas obtiveram vidas úteis mais curtas.

Assim, foi possível concluir que a utilização de PET, tanto em forma de flakes, como na forma de pó de PET, nas misturas asfálticas do tipo CBUQ, foram positivas, principalmente no seu comportamento em relação à vida de fadiga. A mistura M2 não possuiu um bom comportamento, porém, as misturas M4, M5 e M6, podem ser consideradas muito eficientes.

Portanto, pode-se considerar que a mistura com 0,5% de flakes de PET de 10 mm e com substituição de 2,5% do pó de pedra por pó de PET seria a mais indicada, já que houve melhoria nos resultados mecânicos e, por conseguinte, aumento dos parâmetros mecânicos. Além disso, é a mistura que mais reutilizou garrafas PET, já que, em uma rodovia de duas faixas com 6 metros cada, esta mistura reutiliza mais de 400 mil garrafas PET de dois litros por quilômetro, isto é, possuem uma boa influência no aspecto ambiental e socioeconômico. Este fato contribui para a ratificação da possibilidade de utilização de PET em misturas asfálticas na camada de rolamento, podendo influenciar em projetos futuros. Além disso, é capaz de dar uma utilização nobre a este material, contribuindo com a redução do consumo dos recursos naturais.

5.1. Sugestão para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram encontrados alguns assuntos que podem ser estudados para melhorar o entendimento do material e, assim, incentivar a utilização de PET na pavimentação asfáltica. Algumas sugestões são apresentadas:

- a) Realização de uma análise química e reológica completa do polietileno tereftalato para melhor compreensão do seu comportamento após o aquecimento juntamente com o ligante asfáltico;
- b) Aplicação da metodologia Superpave para a dosagem e compactação dos corpos de prova, afim de se obter melhores resultados;
- c) Utilização de outros tipos de ligantes asfálticos e aplicação do PET em outros tipos de misturas, como a Camada Porosa de Atrito (CPA), SMA (Stone Matrix Asphalt) e AAUQ (areia asfalto);
- d) Realização de outros ensaios de vida de fadiga, como o a fadiga de 4 pontos;

- e) Utilização de outros softwares de dimensionamento, como o Elsym5;
- f) Realização de ensaios que indiquem melhor como as misturas se comportarão em relação à deformação permanente, como o ensaio Bailey dos agregados;
- g) Utilização de outros teores de flakes de PET e de pó de PET;
- h) Avaliação de solos-PET para base de pavimentos, afim de gerar um estudo completo de dimensionamento com todas as camadas com adição de PET, formando um pavimento ecológico;
- i) Utilização do pó de PET para substituição parcial da parte fina em bases de pavimentos;
- j) Simulação das misturas em Métodos Discretos para melhor entendimento do comportamento da mistura asfáltica com inserção de PET;
- k) Realização de trechos experimentais, afim de retificar a eficiência do pavimento com a inserção de flakes de PET.

ABIPET. **Industria do PET no Brasil**. Associação Brasileira da Indústria do PET, São Paulo, 2005.

ABIPET. **Nono Censo da Reciclagem do PET no Brasil**. Associação Brasileira da Indústria do PET, São Paulo, 2013.

ABTAHI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; HEJAZI, S. M. **Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review**. Construction and Building Materials, v. 24, p. 871-877, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Resolução n. 19 de 11. Jul. 2005**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4402**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperature Using Rotational Viscosimeter, Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D287**: Effect of Heat and Air on Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), Philadelphia, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D70**: Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method). Philadelphia, 2009.

AWWAD, M. T.; SHBEEB, L. **The use of polyethylene in hot asphalt mixtures**. American Journal of Applied Sciences, v. 4, n. 6, p. 390-396, 2007.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; VALE, A. C.; SOARES, J. B.; CASAGRANDE, M. D. T. **Análise do Escorrimento em Misturas Asfálticas do Tipo SMA com Fibras de Polipropileno**. 19º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

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

BENEVIDES, S. A. S. **Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos Asfálticos: Empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do Estado do Ceará**. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**, 1ª Edição PETROBRAS/ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

BONICA, C.; TORALDO, E.; ANDENA, L.; MARANO, C.; MARIANI, E. **The effects on the performance of bituminous mastics for road pavements**. Compositers Part B, v. 95, p. 76-81, 2016.

CAVALCANTI, L. S. **Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 177 p., 2010.

CEMPRE (COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM). Informação em: <<http://www.cempre.org.br>>. Acessado em: julho de 2016.

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; PRIETTO, P. D. M. **Comportamento mecânico de uma areia cimentícia reforçada com resíduos plásticos**. Seminário Nacional sobre reuso/reciclagem de resíduos sólidos industriais SMA. São Paulo, 2000.

COSTA, L. M. B.; SILVA, H. M. R. D.; OLIVEIRA, J. R. M.; FERNANDES, S. R. M. **Incorporation of waste plastic in asphalt binders to improve their performance in the pavement.** Int. J. Pavement Res.Technol, v. 6, n. 4, p. 457-464, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 003/99.** Material Betuminoso – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 035/98.** Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 043/95.** Misturas Asfálticas a Quente – Ensaio Marshall: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 054/97.** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 078/94.** Adesividade. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 081/94.** Agregado Graúdo – Determinação da Densidade. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 083/98.** Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 084/1995.** Agregado miúdo-determinação da densidade real. Norma rodoviária – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 089/94**. Durabilidade. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 131/2010**. Ponto de Amolecimento. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 133/1994**. Misturas betuminosas-determinação do módulo de resiliência. Norma rodoviária – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 138/94**. Misturas Asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 148/94**. Material Betuminoso – Determinação do ponto de fulgor e de combustão. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 163/1998**. Materiais betuminosos – determinação da ductilidade. Norma rodoviária – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **ME 195/97**. Absorção e Massa específica real dos agregados e filer. Rio de Janeiro, 1997.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

FUENTES-AUDÉN, C.; SANDOVAL, J. A.; JEREZ, A, NAVARRO, F. J.; MARTÍNEZ-BOZA, F. J.; PARTAL, P.; GALLEGOS, C. **Evaluation of thermal**

and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen. Polymer Testing, v. 27, n. 8, p. 1005–1012, 2008.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2007.

GARCÍA-MORALES, M.; PARTAL, P, NAVARRO; GALLEGOS, C. **Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen.** Fuel, v. 85, n. 7-8, p. 936–943, 2006.

HASSAN, A.; GANJIDOUST, H.; MAGHANAKI, A. A. **Use of plastic waste (polyethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregates replacement.** J. Waste Managements and Research, v. 23, n. 4, p.322–327, 2005.

KALANTAR, Z. N. **Properties of bituminous binder modified with waste polyethylene terephthalate.** Malaysia Universities Transportation Research Forum and Conferences, 2010.

LOUZADA, N. S. L. **Experimental study of soils reinforcement with crushed Polythylene Terephthalate (PET) residue.** Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015.

MANO, E. B., MENDES, L. C. **Introdução a polímeros.** 2nd ed., Ed Edgard Blucher Ltda, p.118, 2001.

MAURER, D. A.; MALASHESKIE, G. J. **Field performance of fabrics and fibers to retard reflective cracking.** Geotext Geomem, v. 8, p. 239-267, 1989.

MEDINA, J., 1997, **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro-RJ, Editora UFRJ.

MELO, J. W. **Produção e caracterização de pó de PET – Poli (Tereftalato de etileno), obtido a partir de garrafas pós-consumo.** Dissertação de Mestrado.

Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, UFOP P CETEC – UFMG. Belo Horizonte, 2004.

MENESES, I. A. **Avaliação de concreto com adição de fibras de PET submetido a altas temperaturas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

MODRO, N. L. R.; MODRO, N. R.; OLIVEIRA, A. P. N. **Avaliação de concreto Portland contendo resíduos de PET.** Revista Matéria, v. 14, n. 1, p. 725-736, 2009.

MOGHADDAM, T. B.; KARIM, M. R. **Properties of SMA mixtures containing waste polythylene terephthalate.** World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 6, p. 612-622, 2012.

NASCIMENTO, F.A.C. **Estudo Comparativo sobre Deformação Permanente em Misturas Asfálticas a partir de Ensaio de Tração Indireta e Simulador de Tráfego.** Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia – IME. Rio de Janeiro, 2015.

NEGRÃO, D. P. **Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Engenharia de Transportes - Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2006.

ODA, S.; Fernandes Júnior, J.L.; **Borracha de Pneus como Modificador de Cimentos Asfálticos para Uso em Obras de Pavimentação;** Acta Scientiarum, v.23, n. 6, 2001.

PINTO, S., **Materiais Pétreos e Concreto Asfáltico: Conceituação e Dosagem,** 1996.

PRASAD, K. V. R.; MAHENDRA, S. P.; KUMAR, N. S. **Study on utilization of PET (Polythylene Teraphthalate) waste in bituminous mixes,** International Journal of Eletronics & Communication Technology, v. 4, p 187-190, 2013.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. **Poli(Tereftalato de Etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 19; n. 2; p. 121-132, 2009.

SILVA, J. A. A.; RODRIGUES, J. K. G.; LUCENA, L. C.; LUCENA, A. E.; PATRICIO, J. D. **Estudo da utilização do politereftalato de etileno (PET) para compor as misturas asfálticas dos revestimentos rodoviários.** 42ª Reunião Anual de Pavimentação e 16º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Gramado, 2013.

SILVA, L. S. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM – UFRGS. Porto Alegre, 2005.

SONCIM, S. P.; JUNIOR, G. B. A.; ALMEIDA, M. O.; JUNIOR, M. J. F.; ALMEIDA, S. G.; VIDAL, F. X. R. **Resíduo de reciclagem de PET (Polietileno Tereftalato) como material alternativo na construção de reforço de subleitos de rodovias.** Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia e Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Florianópolis, Book of Abstract, São Paulo, 2004.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS. Porto Alegre, 2004.

SULYMAN, M.; HAPONIUK, J.; FORMELA, K. **Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review.** International Journal of Environmental Science and Development, Vol.7, Nº 2, p. 100-108, 2016.

SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. **A tecnologia de reciclagem de polímeros.** Revista Quim. Nova, v.28, n.1, p.65-72, 2005.

TAPKIN, S. **The effect of polypropylene fibers on asphalt performance.** J Build Environ, v. 43, p. 1065–71, 2008.

VALADARES, R. G. **Comportamento mecânico de areia-asfalto contendo resíduo do beneficiamento do minério de ferro.** Dissertação de Mestrado – Instituto Militar de Engenharia, 2016.

YI, J.; MCDANIEL, S. **Application of cracking and seating and use of fibers to control reflection cracking.** Trans Res Rec, v. 1388, p. 150-159, 1993.