

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DESEMPENHO DE MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO AREIA  
ASFALTO USINADA A QUENTE (AAUQ) COM A INSERÇÃO  
DE PET (POLIETILENO TEREFTALATO) MICRONIZADO**

**GABRIELLA QUEIROZ BRITO**

**ORIENTADORA: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA  
PUBLICAÇÃO: G.DM-350/2020**

**BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2020**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DESEMPENHO DE MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO AREIA  
ASFALTO USINADA A QUENTE (AAUQ) COM A INSERÇÃO DE PET  
(POLIETILENO TEREFTALATO) MICRONIZADO**

**GABRIELLA QUEIROZ BRITO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA  
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE (UnB)  
ORIENTADORA**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS (UnB)  
EXAMINADOR INTERNO**

---

**LILIAN RIBEIRO DE REZENDE (UFG)  
EXAMINADORA EXTERNA**

**BRASÍLIA/DF, 17 DE DEZEMBRO DE 2020.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

BRITO, GABRIELLA QUEIROZ

**Desempenho de Mistura Asfáltica do Tipo Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) com a Inserção de PET (Polietileno Tereftalato) Micronizado** [Distrito Federal], 2020.

xviii, - 69., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2020)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Pavimentação

2. Misturas Asfálticas

3. Areia Asfalto

4. Polietileno Tereftalato

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRITO, G. Q. (2020). **Desempenho de Mistura Asfáltica do Tipo Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) com a Inserção de PET (Polietileno Tereftalato) Micronizado**. Dissertação de Mestrado. Publicação G.DM-350/2020. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gabriella Queiroz Brito

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: **Desempenho de Mistura Asfáltica do Tipo Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) com a Inserção de PET (Polietileno Tereftalato) Micronizado**.

GRAU / ANO: Mestre / 2020

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

*Gabriella Queiroz Brito*

---

Gabriella Queiroz Brito

Brasília/DF – Brasil

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela minha vida, e por preparar sempre o que é melhor para mim, mesmo quando eu não sei o que é.

Agradeço aos meus pais, Cleide e Sebastião e à minha irmã, Isabella. Obrigada por sempre me apoiar, pelos conselhos, pela dedicação em me ajudar a realizar os meus sonhos. Obrigada pelos puxões de orelha também. Vocês são tudo pra mim!

Agradeço aos meus amigos da vida, Lucas e Gabriel, que sempre foram meu refúgio. Minhas melhores companhias para espalhar e meus maiores incentivadores para conseguir continuar.

Agradeço aos meus amigos da UnB, Matheus, Juan e José Wilson, sem vocês essa caminhada seria quase impossível. Obrigada pelo apoio e parceria! Agradeço também aos colegas do mestrado, pelas horas de estudos, pela companhia em Brasília e pelo carinho.

Agradeço a Universidade Federal de Goiás e a Universidade de Brasília por me acolher tão bem na minha vida acadêmica.

Agradeço à professora Michéle Casagrande, principalmente pela amizade. Dessa forma, todas as etapas ficaram mais fáceis. Obrigada pela orientação, por aprender e estudar junto comigo, pela confiança e por respeitar o meu tempo. Você é o meu maior exemplo dentro da academia.

Um obrigada especial a todos os professores que passaram pela minha vida, desde o fundamental, ensino médio, graduação e pós-graduação. De alguma forma eu fui marcada pela presença de vocês em minha vida e sou grata por isso.

Agradeço ao INFRALAB e toda sua equipe pela disponibilidade e acolhimento, e aos laboratórios de Geotecnia da UFG e do DER/DF pelo apoio na pesquisa.

A todos que de alguma forma passaram pela minha vida, o meu muito obrigada.

**DESEMPENHO DE MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO AREIA ASFALTO USINADA  
A QUENTE (AAUQ) COM A INSERÇÃO DE PET (POLIETILENO  
TEREFTALATO) MICRONIZADO**

**RESUMO**

A execução de pavimentos para receber baixo volume de tráfego muitas vezes está associada a baixos custos, mas isto só ocorre se alguns fatores forem cumpridos, dentre eles, a proximidade entre o local onde a obra será realizada e os locais onde obter-se-á os materiais a serem utilizados. Algumas regiões do Brasil são deficientes em agregados graúdos, o que onera a execução do pavimento com revestimento de concreto asfáltico. Essas mesmas regiões, em sua maioria, são ricas em areia, o que traz a possibilidade de executar o revestimento do pavimento em Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ). Este tipo de mistura asfáltica é considerado para baixo volume de tráfego, e a utilização de novos materiais, a fim de melhorar o comportamento mecânico de misturas asfálticas, vem mostrando resultados positivos e promissores. Esta pesquisa visa estudar o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo areia asfalto usinada a quente (AAUQ) com a inserção de Polietileno Tereftalato (PET) micronizado, oriundo de garrafas PET moídas. Foram estudadas misturas sem a adição de PET (convencional) e com substituição de areia por 10 e 18% de PET, em massa. A partir dos ensaios de caracterização dos agregados e do ligante asfáltico (CAP 50/70) foram realizadas a dosagem das misturas asfálticas pelo método Marshall e os ensaios mecânicos de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência, vida de fadiga e desgaste cântabro. Com esses resultados foi realizado o dimensionamento do pavimento, através do software MeDiNa, a fim de observar as espessuras das camadas e a vida útil de projeto das misturas estudadas. Os resultados mostraram que a adição de PET micronizado à mistura AAUQ melhora os parâmetros de resistência, resiliência e fadiga das misturas. Além da resposta positiva no comportamento mecânico do pavimento, possibilitando um pavimento sustentável e mais eficiente, existe também um ganho ambiental, dando uma destinação nobre a elevada geração de resíduo plástico, considerado o grande problema ambiental do século 21.

# **PERFORMANCE OF SAND-ASPHALT HOT MIX (SAHM) WITH MICRONIZED PET (POLYETHYLENE TEREPHTHALATE) INSERTION**

## **ABSTRACT**

The execution of low traffic volume pavements is often associated with low costs, but this only occurs if certain factors are met, among them, the proximity between the location where the work will be carried out and the places wherein the materials will be obtained. Some regions of Brazil are deficient in coarse aggregates, which increases the execution's cost of the asphalt concrete pavement. Mostly, these regions are abundant in sand, which makes it possible to execute the asphalt layer of the pavement in Sand-Asphalt Hot Mix (SAHM). This type of asphalt mixture is considered for low traffic volume, and the use of new materials, in order to improve the mechanical behavior of the asphalt mixture, has been showing positive and promising results. This research aims to study the mechanical behavior of sand-asphalt hot mix (SAHM) with the insertion of micronized Polyethylene Terephthalate (PET), from crushed PET bottles. Mixtures without the addition of PET (conventional) and with replacement of sand by 10 and 18% PET, by mass, were studied. From the characterization tests of the aggregates and the asphalt binder (CAP 50/70), the dosage of the asphalt mixtures by the Marshall method, Marshall mechanical tests of stability and flow, tensile strength, resilient modulus and fatigue life were carried out. Based on that, the pavement design was performed using the MeDiNa software, to observe the thickness of the layers and the service life of the studied mixtures. The results showed that the addition of micronized PET to the SAHM mixture improves the parameters of resistance, resilience and fatigue of the mixtures. In addition to the positive response in the mechanical behavior of the pavement, enabling a sustainable and more efficient pavement, there is also an environmental gain, giving a more noble destination to the high generation of plastic waste, considered the major environmental problem of the 21st century.

# ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	3
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	4
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 MECÂNICA DO PAVIMENTO.....	6
2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS.....	6
2.3 POLIETILENO TEREFTALATO (PET) .....	10
2.3.1 ASPECTOS GERAIS .....	10
2.3.2 RECICLAGEM .....	12
2.3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO PET EM DIFERENTES FORMATOS 13	
2.4 UTILIZAÇÃO DE PET EM OBRAS GEOTÉCNICAS .....	15
2.4.1 MISTURAS ASFÁLTICAS COM PET.....	17
2.5 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS .....	20
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>23</b>
3.1 MATERIAIS .....	24
3.1.1 AGREGADO .....	24
3.1.2 FÍLER ATIVO (CAL) .....	25
3.1.3 POLIETILENO TEREFTALATO (PET) MICRONIZADO .....	25
3.1.4 LIGANTE ASFÁLTICO .....	25
3.2 MÉTODOS .....	25
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO.....	27
3.2.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO.....	28
3.2.1.2 EQUIVALENTE DE AREIA .....	29
3.2.1.3 DENSIDADE DOS GRÃOS .....	30
3.2.1.4 ADESIVIDADE .....	30
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO PET MICRONIZADO.....	31

3.2.3	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO .....	31
3.2.3.1	PENETRAÇÃO .....	31
3.2.3.2	PONTO DE AMOLECIMENTO (MÉTODO ANEL E BOLA).....	32
3.2.3.3	VISCOSIDADE ROTACIONAL (OU BROOKFIELD) .....	33
3.2.3.4	PONTO DE FULGOR.....	34
3.2.3.5	DENSIDADE E MASSA ESPECÍFICA.....	34
3.2.4	DOSAGEM MARSHALL (DEFINIÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE LIGANTE)	35
3.2.5	EXECUÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS .....	38
3.2.5.1	ENSAIO MARSHALL – ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL	38
3.2.5.2	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	39
3.2.5.3	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	40
3.2.5.4	ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA.....	41
3.2.5.5	DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR ABRASÃO CÂNTABRO	42
3.3	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO .....	43
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	45
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE.....	47
4.3	DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE LIGANTE .....	48
4.4	PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS NO TEOR ÓTIMO.....	52
4.5	ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL .....	53
4.6	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT)....	55
4.7	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR).....	55
4.8	RELAÇÃO MR/RT .....	58
4.9	FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA	59

4.10	ABRASÃO CÂNTABRO .....	60
4.11	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO .....	61
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>64</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	64
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Requisitos de composição da mistura areia asfalto usinada a quente (modificado – DNIT ES 032/05) .....	8
Tabela 2.2 - Faixas granulométricas (DERT ES 14/00).....	8
Tabela 2.3 - Especificações para verificação de condições de vazios, estabilidade e fluência (DNIT ES 032/05; DERT ES 14/00).....	9
Tabela 3.1 - Quantidade de CP's moldados no decorrer da pesquisa .....	27
Tabela 3.2 - Número das peneiras e abertura da malha (DNIT ME 412/19) .....	29
Tabela 3.3 - Ensaio de caracterização do ligante e as suas respectivas normativas. ....	31
Tabela 3.4 - Lista de ensaios mecânicos realizados e suas respectivas normas.....	38
Tabela 4.1 - Granulometria dos agregados.....	45
Tabela 4.2 - Ensaio de caracterização da areia .....	46
Tabela 4.3 - Resultado dos ensaios realizados para caracterização do ligante.....	47
Tabela 4.4 - Leituras do ensaio de viscosidade Brookfield.....	48
Tabela 4.5 - Parâmetros volumétricos da mistura convencional.....	49
Tabela 4.6 - Parâmetros volumétricos da mistura com 10% de PET.....	49
Tabela 4.7 - Parâmetros volumétricos da mistura com 18% de PET.....	49
Tabela 4.8 – Leitura e determinação do teor ótimo de ligante para cada mistura.....	51
Tabela 4.9 - Parâmetros volumétricos das misturas no teor ótimo de ligante.....	52
Tabela 4.10 – Resultados da estabilidade e fluência Marshall.....	53
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração .....	55
Tabela 4.12 - Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a mistura M1.....	56
Tabela 4.13 - Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a mistura M2.....	57
Tabela 4.14 - Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a mistura M3.....	57
Tabela 4.15 – Relação MR/RT.....	58
Tabela 4.16 - Resultados do ensaio de desgaste por abrasão cântabro .....	61
Tabela 4.17 – Resultado do dimensionamento para 10 anos de vida útil de projeto .....	62
Tabela 4.18 – Resultado do dimensionamento para as camadas com as espessuras mínimas. 62	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Como é constituído um polímero .....	11
Figura 2.2 - Classificação quanto a estrutura química da cadeia polimérica .....	11
Figura 2.3 - Consumo de polímeros plásticos no Brasil .....	12
Figura 2.4 - Processo de reciclagem mecânica de materiais plásticos .....	13
Figura 2.5 - Utilização apenas de parte da garrafa.....	14
Figura 2.6 - Processo de fabricação de fibras de PET com desfiadora artesanal (Meneses, 2011).....	14
Figura 2.7 - Fibras de PET (Meneses, 2011).....	15
Figura 2.8 - Flakes de PET de tamanhos distintos. À esquerda os flakes possuem 10 mm, e à direita 2 mm (Arao, 2016).....	16
Figura 2.9 – Do lado esquerdo uma trinca por fadiga do tipo couro de jacaré e do lado direito um exemplo de deformação permanente (Franco, 2007).....	20
Figura 3.1 - Areia utilizada nas misturas do tipo AAUQ.....	24
Figura 3.2 - Polietileno tereftalato (PET) micronizado.....	25
Figura 3.3 - Fluxograma das etapas da pesquisa.....	26
Figura 3.4 - Agitador mecânico com as peneiras utilizado para os ensaios de análise granulométrica por peneiramento.....	28
Figura 3.5 - Passo a passo do ensaio de equivalente de areia .....	29
Figura 3.6 - Equipamento utilizado para determinar a densidade real dos grãos (Chrusciak, 2013).....	30
Figura 3.7 - Ensaio de penetração .....	32
Figura 3.8 - Ensaio de ponto de amolecimento.....	33
Figura 3.9 - Ensaio de densidade do ligante em três repetições.....	34
Figura 3.10 - Gráfico $V_v \times$ Teor de CAP $\times$ RBV para determinação do teor ótimo de ligante pela metodologia Marshall (Bernucci <i>et al.</i> , 2010).....	37
Figura 3.11 - Processo de moldagem dos CP's.....	37
Figura 3.12 - Ensaio de estabilidade e fluência Marhsall .....	38
Figura 3.13 - Ensaio de resistência a tração por compressão diametral.....	40
Figura 3.14 - Ensaio de vida a fadiga.....	41
Figura 3.15 - Ensaio de desgaste cântabro .....	43
Figura 3.16 – Dados de entrada para o dimensionamento do pavimento .....	44
Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia e do PET.....	46

Figura 4.2 - Composição da mistura sem a inserção de PET .....	47
Figura 4.5 - Curva viscosidade-temperatura do ensaio de viscosidade Brookfield .....	48
Figura 4.6 - Determinação do teor ótimo de ligante para a mistura convencional .....	50
Figura 4.7 - Determinação do teor ótimo de ligante para a mistura com 10% de PET .....	50
Figura 4.8 - Determinação do teor ótimo de ligante para a mistura com 18% de PET .....	51
Figura 4.9 - Resultados de estabilidade Marshall .....	53
Figura 4.10 - Resultado de fluência Marshall .....	54
Figura 4.11 – Resultados de RT e MR plotados .....	58
Figura 4.18 - Gráfico com as curvas de vida de fadiga ( $N$ vs $\Delta\sigma$ ) de todas as misturas.....	59
Figura 4.19 - Gráfico com as curvas de vida de fadiga ( $N$ vs $\epsilon_r$ ) de todas as misturas.....	60
Figura 4.20 - Dados de entrada para o dimensionamento do pavimento .....	61

## LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AAUQ	Areia Asfalto Usinada a Quente
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
Bracal	Brasil Calcário e Areia LTDA
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Concreto Asfáltico de Petróleo
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CP's	Corpos de Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DERT	Departamento de Edificações, Rodovia e Transportes
DF	Distrito Federal
DMM	Massa Específica Máxima Medida
DMT	Massa Específica Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EA	Equivalente de Areia
EPS	Poliestireno Expandido
ES	Especificação de Serviço
EVA	Etileno Acetato de Vinila
Gmb	Massa Específica Aparente da Mistura
Gs	Densidade Real dos Grãos
Ica	Indústria de Calcinação Ltda
ICC	Índice de Condição de Conserva
ICM	Índice de Condição de Conserva
ICU	Ilhas de Calor Urbana
Infralab	Laboratório de Infraestrutura Rodoviária
ME	Método de Ensaio
MeDiNa	Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos

MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PET	Polietileno Tereftalato
PMMA	Polimetacrilato de Metila
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
RBV	Relação Betume Vazios
RSU	Resíduos Urbanos Sólidos
RT	Resistência à Tração
SMA	Matriz Pétreas Asfálticas
UFG	Universidade Federal de Goiás
UnB	Universidade de Brasília
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VCB	Vazios Cheios com Betume
Vv	Volume de Vazios

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	% de perda de massa (ensaio cântabro)
D	média de quatro medidas de diâmetro do corpo de prova
D <sub>s</sub>	densidade do ligante asfáltico
f	% passante na peneira n° 200
F	carga de ruptura
F'	carga aplicada
h	média de quatro medidas de altura do corpo de prova
k1, k2, k3	coeficientes
N	vida de fadiga
p	quantidade de ligante asfáltico no ensaio acelerado
P	carga cíclica
R <sup>2</sup>	coeficiente de determinação
ΔH	deslocamento horizontal
Δσ	diferença de tensão
ε <sub>r</sub>	deformação específica resiliente
σ <sub>r</sub>	resistência à tração
σ <sub>t</sub>	tensão aplicada
ν	coeficiente de Poisson

### 1 INTRODUÇÃO

Um dos pilares da economia de um país diz respeito ao setor de transportes, seja para escoar a produção ou para possibilitar o deslocamento das pessoas. No Brasil, esse transporte é feito prioritariamente por rodovias, de acordo com o Relatório de Gestão (DNIT, 2018) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes existe uma extensa malha viária sob concessão deste órgão de aproximadamente 63 mil km, onde 85% está pavimentada. No entanto, cabe observar a qualidade delas. Este relatório aponta que o índice de condição de manutenção (ICM) é considerado bom para 58% das vias e o índice de condição de conserva (ICC) é de 38% regular e 37% bom. No Distrito Federal, especificamente, o ICC é de 53% bom e 43% regular.

Analisando a malha rodoviária do país, segundo um levantamento de 2019 da Confederação Nacional de Transportes (CNT), existe um total de 1 720 700 km de rodovias, onde 12,4% estão pavimentadas e que dessas, apenas 32% estão em perfeito estado de conservação.

Os problemas encontrados podem ser de diversas naturezas e em quaisquer camadas que constituem um pavimento. A camada de revestimento asfáltico do pavimento é aquela que deve garantir ao condutor a sensação de conforto e segurança. É ela que recebe diretamente as ações do tráfego e as condições climáticas da região. Assim sendo, ela merece uma atenção especial para que novas e eficientes alternativas melhorem o seu desempenho.

Existem vários tipos de revestimento, o mais usado no Brasil é o concreto asfáltico (CA) composto por agregados de vários tamanhos (grãos e miúdos) e ligante. Mas o que se encontra em algumas regiões do Norte e Nordeste país é uma deficiência do agregado grão, isso porque esses locais não dispõem de pedreiras em abundância para ser fonte de agregados para pavimentação ou devido ao esgotamento das jazidas que produzem esse material. Assim, é preciso outras alternativas para confecção do revestimento. Nessas regiões, a areia é o agregado mais abundante e, portanto, a mistura do tipo areia asfalto deve ser uma alternativa viável de revestimentos para vias de baixo volume de tráfego.

Embora nem sempre seja possível associar vias de baixo volume de tráfego com vias de baixo custo, tradicionalmente essa relação é feita. De forma geral, vias cujo projeto é realizado para receber esse tipo de tráfego são executadas com o intuito de ligar sedes municipais com a malha pavimentada estadual, desenvolvendo o escoamento da produção agrícola, garantindo um acesso mais fácil à educação, saúde e lazer. Para tanto, busca-se os menores custos

possíveis, e para isso conta-se com menores espessuras das camadas do pavimento, bem como utilização de recursos que estejam o mais próximo possível, para minimizar os custos de transporte.

A associação correta a se fazer, quando se propõe a execução de vias para baixo volume de tráfego, é a de que seu comportamento mecânico será inferior àquele encontrado nas misturas asfálticas convencionais. A mistura do tipo areia asfalto, objeto deste estudo, apresenta baixos valores de resistência à tração e à deformação permanente, além de elevado desgaste devido à passagem de pneus e falta de aderência pneu/pavimento quando a pista está molhada (Aldigueri & Bernucci, 2002).

Como alternativa para melhorar o comportamento mecânico dos pavimentos, vem sendo propostos e estudados polímeros promissores para acurar o revestimento asfáltico. Esses polímeros podem ser inseridos em uma mistura asfáltica de duas formas: como modificantes e/ou como materiais de substituição. A modificação é quando o polímero é colocado diretamente no ligante, modificando suas características. Por exemplo, o asfalto-borracha que já foi largamente estudado e já está implantado em algumas rodovias no sul do país, como na BR 116 no estado do Rio Grande do Sul. Já a substituição é quando se retira uma quantidade do agregado que compõe a mistura e o substituí por algum polímero. Por exemplo, o uso de plásticos, em específico, de garrafas PET que passaram pelo processo de micronização.

Os resultados de misturas alteradas com polímeros estão sendo satisfatórios, promovendo melhoria nas características do pavimento, levando a uma diminuição das deformações permanentes, melhorando a adesividade entre o agregado e o ligante e evitando trincas por fadiga (Sulyman *et al.*, 2016).

A forma como lida-se com o plástico, o transformou no maior desafio ambiental do século XXI, segundo a ONU Meio Ambiente. De todo o plástico produzido, apenas 9% está sendo reciclado (Hamilton *et al.*, 2019). O Polietileno Tereftalato (PET) é o tipo de material plástico do qual é feito as garrafas de bebidas. A grande preocupação sobre esse produto é quanto ao seu descarte.

Existem hoje muitos esforços quanto a reciclagem do PET, que pode gerar benefícios não só ambientais, mas também sociais (gerando empregos) e econômicos (gerando impostos e renda). Essa reciclagem é utilizada principalmente pela indústria têxtil (ABIPET, 2012). O 10º censo da reciclagem do PET no Brasil, promovido pela Associação Brasileira de Indústria do PET (ABIPET, 2016), mostra uma queda na taxa de reciclagem desde 2012. A justificativa para tal fato está na queda das atividades têxtil, químico, automotivo e de transporte, principais consumidores do material reciclado.

Dessa forma, esta pesquisa visa estudar se a utilização de PET na forma micronizada é uma alternativa tecnicamente viável, já que promete melhorar o desempenho do revestimento e é um material barato, que atende às preocupações ambientais, dando destino adequado para este insumo.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A pavimentação de uma malha viária urbana, de forma geral, deve ser eficiente quanto ao seu planejamento técnico-econômico. Um fator importante para garantir essa eficiência diz respeito ao estudo das tecnologias que melhor se adaptam em regiões onde será executada a obra. Dessa forma, a utilização de materiais naturais e presentes nas proximidades da via deve ser considerada a fim de garantir economia.

Além disso, deve-se pensar em formas alternativas de se inserir resíduos, que antes eram vistos como problema ambiental, em obras de engenharia em geral. Assim, a reutilização desses resíduos minimizam os impactos ambientais e ainda, quando utilizados em substituição de agregados, diminuem a quantidade de matéria prima a ser utilizada, preservando assim, os recursos naturais. Portanto, inserir materiais alternativos em obras de pavimentação promove uma economia na sua construção e como tem sido pesquisado, melhora o comportamento mecânico das camadas.

Não se encontrou na literatura estudos que tenham unido a mistura do tipo areia asfalto com a adição de PET. Sendo ela, por todos os motivos já apresentados, uma excelente alternativa para minimizar os impactos ambientais. Esta pesquisa busca estudar a eficiência técnica, visando o desempenho mecânico deste revestimento.

## **1.2 OBJETIVOS**

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar a influência do polietileno tereftalato (PET) micronizado no comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo areia asfalto usinadas a quente (AAUQ), produzidas em laboratório.

A fim de alcançar o objetivo principal, foram traçados objetivos específicos:

- Verificar se a presença do PET micronizado promove alteração nos valores de teor ótimo de ligante da mistura.
- Analisar a influência da inserção de PET micronizado nos parâmetros volumétricos de uma mistura do tipo AAUQ;

- Analisar de que forma a presença de PET micronizado altera os resultados de mecânicos como: estabilidade e fluência Marshall, cântabro, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e fadiga;
- Observar como o aumento do PET micronizado altera os resultados dos ensaios mecânicos;
- Avaliar no software MeDiNa o comportamento das misturas estudadas, a partir do dimensionamento de pavimentos cuja camada de revestimento considera os resultados dos ensaios mecânicos realizados nesta pesquisa.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

A dissertação está dividida em cinco capítulos, distribuídos da seguinte forma:

No Capítulo 1 – Introdução é introduzido o tema proposto, mostrando a relevância da pesquisa em âmbito comportamental, econômico e ambiental. Neste capítulo também é explicado a forma como está estruturado o presente trabalho.

No Capítulo 2 – Revisão da Literatura e Fundamentação Teórica é apresentado aspectos gerais, definições e referências bibliográficas acerca dos assuntos tratados nesta pesquisa. Foram abordados assuntos como: mecânica dos pavimentos, misturas asfálticas, areia asfalto usinada a quente (AAUQ), materiais alternativos usados na pavimentação, polietileno tereftalato (PET) e misturas asfálticas com PET.

No Capítulo 3 – Programa Experimental é mostrado os passos trilhados para atingir os objetivos traçados. Assim, é exposto quais foram, onde foram obtidos e como foram caracterizados os materiais utilizados na pesquisa: areia, cal, PET micronizado e ligante asfáltico; e qual a metodologia utilizada para avaliar o comportamento da mistura proposta. Neste capítulo é explicado o passo a passo da metodologia Marshall e quais foram os ensaios mecânicos aos quais a mistura foi submetida, bem como as normativas seguidas, os equipamentos utilizados e as considerações realizadas.

No Capítulo 4 – Resultados e Discussões são expostos todos os resultados obtidos com o que foi proposto no programa experimental. Portanto, é mostrado a caracterização de todos os materiais, os parâmetros volumétricos obtidos através da dosagem Marshall, os resultados de estabilidade e fluência Marshall, cântabro, resistência a tração, módulo de resiliência e vida à fadiga. Juntamente com os resultados, é feita uma análise comparativa entre as misturas propostas e uma análise geral dos resultados afim de obter elementos para a conclusão.

No Capítulo 5 – Conclusões é compilado a análise dos resultados afim de tirar conclusões acerca da adição de PET micronizado em misturas asfálticas. Também são apresentadas recomendações para trabalhos futuros

### 2 REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos e pesquisas anteriores para melhor compreensão dos resultados encontrados nesta pesquisa.

#### 2.1 MECÂNICA DO PAVIMENTO

Um pavimento é constituído de várias camadas com quaisquer espessuras que devem ser dimensionadas para resistir aos esforços do tráfego de veículos e do clima, garantindo conforto e segurança ao usuário. O pavimento asfáltico é aquele cujo revestimento é formado por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. Ele é formado por quatro camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito.

Consideram-se duas categorias de pavimentos: os pavimentos flexíveis e os pavimentos rígidos. Os pavimentos flexíveis são caracterizados por um revestimento asfáltico sobre uma base granular, historicamente se considerava para esse tipo de pavimento uma ruptura do subleito por cisalhamento. Já os pavimentos rígidos são compostos por placas de concreto de cimento *portland* sobre um solo de fundação, e se caracterizavam por uma ruptura de fadiga.

O revestimento asfáltico é a camada mais superficial do pavimento flexível. Ela é responsável por receber diretamente a ação do tráfego, resistindo ao desgaste e aumentando a durabilidade da estrutura, e portanto, deve ser tão impermeável quanto possível (salvo em situações em que a permeabilidade é prevista). Em seu dimensionamento, considera-se o tráfego previsto para adotar uma espessura dessa camada (Bernucci *et al.*, 2010; Senço, 2007).

A concepção de um pavimento deve levar em conta dois aspectos: o seu comportamento estrutural e seu comportamento funcional. O primeiro é determinado pelos materiais, espessura das camadas e fundação do mesmo. O segundo determina as condições de textura e acabamento o revestimento (Jiménez, 2014).

#### 2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS

Simplificadamente, as misturas asfálticas pressupõem um revestimento do agregado por um ligante asfáltico. Esse revestimento pode ser executado a quente ou a frio, sendo que neste último é utilizado, geralmente, emulsão asfáltica.

A mistura a quente mais utilizada no Brasil é o concreto asfáltico (CA), onde são utilizados agregados de vários tamanhos. Além dele, existem muitos outros: camada porosa de

atrito (CPA), matriz pétreo asfáltica (SMA), mistura sem agregados de certa graduação (gap-graded) e areia asfalto usinada a quente (AAUQ) (Bernucci *et al.*, 2010).

O ligante asfáltico tem como função ligar os agregados e fornecer coesão e estabilidade à mistura. Essa ligação é tenaz e flexível. A flexibilidade se dá devido ao caráter viscoelástico desse material, que também garante baixo módulo de rigidez e alta capacidade de se deformar (Jiménez, 2014).

No Brasil, o ligante mais usado é denominado Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP) e tem características: semissólido a baixas temperaturas, viscoelástico a temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas.

De acordo com a norma ABNT NBR 9935/2005, agregado é um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto. Agregado é um termo genérico para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou britado.

Os agregados podem ser classificados quanto a sua natureza (natural, artificial ou reciclado), quanto ao seu tamanho (gráudo, miúdo ou material de enchimento (fíler) ou quanto a distribuição dos grãos (densa, uniforme, aberta ou com degrau).

Agregados oriundos de rochas ígneas podem ser classificados ainda como ácidos, neutros, básicos ou ultrabásicos, sendo nessa ordem, de maior quantidade de sílica e quartzo. Agregados classificados com ácidos costumam ter baixa adesividade (Bernucci *et al.*, 2010).

Algumas regiões do Norte e Nordeste do Brasil, são deficientes em agregados pétreos gráudos, insumo da mistura asfáltica a quente mais utilizada como revestimento, o CA. Dessa forma, foi necessário encontrar alternativas para o revestimento nessas regiões. Surge então, a ideia da mistura do tipo AAUQ, também chamada de argamassas asfálticas, que é uma mistura que utiliza como agregado a areia, fíler e grandes quantidades de ligante (Bernucci *et al.*, 2010).

A norma DNIT ES 032/05, define que “areia asfalto a quente é a mistura executada a quente em usina apropriada, com características específicas, composta de areia (agregado miúdo), material de enchimento (fíler) se necessário, e cimento asfáltico espalhado e compactado quente.” Quando essa mistura for utilizada como revestimento, deve satisfazer preferencialmente às tolerâncias mínimas apresentadas na Tabela 2.1, especificadas nesta norma.

Tabela 2.1 - Requisitos de composição da mistura areia asfalto usinada a quente (modificado – DNIT ES 032/05)

Designação		A	B	Tolerâncias
<b>Peneiras</b>		<b>Porcentagem total passando (por peso)</b>		
Nome	Abertura mm			
(3/8 pol.)	9,5	100	-	
(n° 4)	4,75	80 - 100	100	± 5 %
(n° 10)	2,00	60 - 95	90 - 100	± 4 %
(n° 40)	0,42	16 - 52	40 - 90	± 4 %
(n° 80)	0,18	4 - 15	10 - 47	± 3 %
(n° 200)	0,075	2 - 10	0 - 7	± 2 %
<b>Cimento Asfáltico % sobre o total da mistura</b>		6 - 12	7 - 12	± 0,3 %

Existe também uma especificação técnica do Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes (DERT ES 14/00) do estado do Ceará, que traz uma nova proposta de composição para mistura de AAUQ. Nela está acrescida a faixa C e os limites da faixa A e B diferem em seus intervalos (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Faixas granulométricas (DERT ES 14/00)

Peneira ASTM	mm	A	B	C	Tolerâncias
N° 4	4,8	100	100	100	± 5 %
N° 10	2,0	90 – 100	90 – 100	85 – 100	± 5 %
N° 40	0,42	40 – 90	30 – 95	25 – 100	± 5 %
N° 80	0,18	10 – 47	7 – 60	8 – 62	± 3 %
N° 200	0,074	0 – 7	0 – 10	0 – 12	± 2 %

Assim orientado quanto à granulometria e à quantidade de ligante, foi utilizado o método de compactação Marshall para moldar os corpos de prova (CP's), verificando as condições de vazios, estabilidade e fluência da mistura. Atendendo às recomendações apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Especificações para verificação de condições de vazios, estabilidade e fluência (DNIT ES 032/05; DERT ES 14/00)

<b>DISCRIMINAÇÃO</b>	<b>50 GOLPES</b>	<b>75 GOLPES</b>
Porcentagem de vazios	3 – 8	3 – 8
Relação betume/vazios	65 – 82	65 – 82
Estabilidade, mínima	200 – 450 kgf	300 – 550 kgf
Fluência, mm	2,0 – 4,5	-

A norma DNIT ES 032/05 indica que o equivalente de areia deve resultar em  $EA \geq 55\%$ . Mas a DERT ES 14/00 admite areia com  $EA \geq 40\%$ . Apesar dessas recomendações, o ensaio de equivalente de areia tem pouca influência nos resultados dos ensaios mecânicos das misturas de AAUQ. Em uma pesquisa realizada com duas areias encaixadas na faixa C, uma com  $EA = 57\%$  e outra com  $EA = 27\%$ , é mostrado que a areia que não se enquadra na norma apresentou melhores resultados nos ensaios de estabilidade Marshall, módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral (Oliveira *et al.*, 2017).

Essa mistura, devido a não utilização de agregado graúdo, possui uma maior superfície específica, portanto, é esperada uma quantidade alta de ligante asfáltico (entre 6,0 e 12%), maior que o CA (entre 4,5 e 6,0%) e que o SMA (entre 6,0 e 7,5%). Além disso, o fíler natural proveniente da areia, geralmente não é suficiente para obter a melhor curva granulométrica, assim, é necessário a adição de um outro fíler, geralmente a cal. Esse tipo de revestimento deve ser utilizado em rodovias de baixo e médio tráfego, pois apresentam menor resistência do que outras misturas a quente.

Algumas pesquisas sobre esse tipo de mistura foram realizadas ao longo dos anos, com variações quanto ao material ou metodologia utilizada.

Dias (2004) estudou o revestimento de areia asfalto com fíler ativo de cinzas. Ele verificou que a porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM), pelo ensaio GoldBeck, era muito grande e, portanto, seria necessário utilizar elevadas quantidades de fíler. Assim, foram adicionados 15, 18 e 21% de fíler a misturas com 8, 9, 10, 11 e 12% de ligante. Os melhores resultados de estabilidade e fluência foram para as misturas com 18% de fíler. O ensaio de cântabro registra resultados que variam de 6 a 44%, aumentando com a diminuição da quantidade de ligante.

Foram realizados outros ensaios como resistência à tração e módulo de resiliência. Os resultados desses ensaios aumentam com o aumento dos finos nas proporções estudadas, chegando a um valor máximo de 0,73 MPa de resistência e 2200 MPa de resiliência. É

interessante notar que a pesquisa mostra a tendência de: aumentar a densidade aparente, o RBV e a resistência e de diminuir o volume de vazios com o aumento do teor de ligante.

Onofre *et al.* (2012) estudaram comparativamente os comportamentos mecânicos de misturas CA, SMA e AAUQ. Utilizou-se dosagem *Superpave* para manter um padrão para comparação. A respeito dos resultados encontrados na mistura de areia-asfalto: foi adicionado cal hidratado nessa mistura e encontrou-se um teor ótimo de ligante de 8,3%. Neste traço, obteve-se volume de vazios de 4,6%, densidade aparente de 2,242, relação betume vazios de 82,3, resistência a tração de 0,77 MPa e módulo de resiliência de 1833 MPa. Também foi feito o ensaio de fadiga que teve o N variando de 200 a 2000.

Também foram traçadas curvas mestras e conclui-se que em baixas frequências (tráfego lento) o comportamento das três misturas é semelhante. Já em altas frequências, o AAUQ apresenta módulo complexo pequeno, ou seja, sua capacidade de absorver as tensões em um tráfego rápido é pequena.

Oliveira *et al.* (2017) estudaram a influência do equivalente de areia da areia utilizada estar conforme a norma ou não, sem adição de fíler. A partir da dosagem Marshall foi encontrado para a Areia A (areia conforme a norma) um teor ótimo de 8,0% de ligante, e para a Areia B (areia não conforme) de 7,7%. Os resultados mecânicos foram: estabilidade de 1,58 – 3,67 kN, resistência a tração de 0,59 – 0,54 MPa, módulo de resiliência 1671 – 2683 MPa. Também foi realizado ensaio de fadiga por compressão diametral, e encontrados N's (número de ciclos até a ruptura do corpo de prova) variando entre 266 – 1922 para Areia A e 727 – 12497 para a Areia B.

Lédo (2019) utilizou pó de pedra basáltica para compor a fração de fíler da mistura, na porcentagem de 5%. Nesta pesquisa, foi executada dosagem Marshall e encontrado um traço de referência de 10,0%. Nesse traço, foram encontrados os seguintes resultados: estabilidade 5,01 kN, fluência 3,33 mm, volume de vazios 7,52%, relação betume vazios 73,25%, densidade aparente 20,96 kN/m<sup>3</sup> e resistência a tração de 0,58 MPa.

## **2.3 POLIETILENO TEREFTALATO (PET)**

### **2.3.1 ASPECTOS GERAIS**

Polímeros são macromoléculas compostas por unidades menores que se repetem denominadas monômeros, formados por reações denominada polimerização (Oliveira & Gomes, 2013). A Figura 2.1 apresenta a constituição de um polímero.

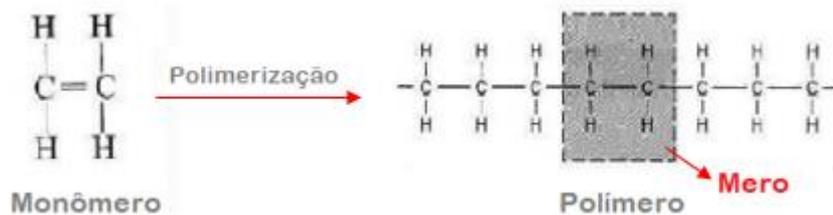


Figura 2.1 - Como é constituído um polímero

Os polímeros podem ser classificados quanto a diversas coisas: origem, número de monômeros, método de preparação, estrutura química da cadeia polimérica, fusibilidade e/ou solubilidade do polímero.

O polietileno tereftalato, conhecido popularmente como PET, é quimicamente caracterizado como um polímero de origem sintética, advindo da polimerização do etileno (produzido mediante processos químicos), cuja cadeia polimérica tem a estrutura mostrada na Figura 2.2, e classificado como termoplástico (ABIPET, 2012; Oliveira & Gomes, 2013).

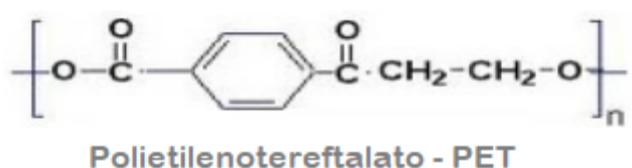


Figura 2.2 - Classificação quanto a estrutura química da cadeia polimérica

A propriedade de polímero termoplástico infere que o PET se torne viscoso a uma dada temperatura tornando possível moldá-lo. Tal fato garante sua capacidade de ser reciclado, ou seja, reprocessado, sem perder suas propriedades físicas (Oliveira & Gomes, 2013; Giraldi, 2008).

Polímeros termoplásticos podem ser subdivididos em: amorfos e semicristalinos. Polímeros amorfos são aqueles que possuem baixa resistência química e de resistência à tração e fundem rapidamente. São exemplos desse tipo: PVC (policloreto de vinila), usado nas tubulações da construção civil; PMMA (polimetacrilato de metila), materiais de acrílico, cadeiras, mesas etc.; e PS (poliestireno), copos plásticos descartáveis. Já o PET é um polímero termoplástico semicristalino, que possui excelente resistência química, alta resistência à tração e temperatura de fusão. Além do PET, utilizado na produção de garrafas, também fazem parte desse grupo o PE (polietileno), usado para fazer sacos plásticos, garrações e caixa d'água (Oliveira & Gomes, 2013).

O PET é largamente utilizado em todo o mundo como embalagem, principalmente em bebidas carbonatadas (por exemplo, refrigerante e água com gás). O fato de ser um material

com leveza, brilho e transparência estimula a sua utilização pelo mercado, já que chama atenção do consumidor e tem alta capacidade volumétrica, além de não se quebrar o que favorece no quesito segurança (ABIPET, 2012).

### 2.3.2 RECICLAGEM

Segundo ABIPLAST (2018), os polímeros plásticos mais consumidos no Brasil são: PP (polipropileno), PEAD (polietileno de alta densidade), PVC (policloreto de vinila), PEBD (polietileno de baixa densidade), PEBDL (polietileno de baixa densidade linear), plásticos de engenharia, plásticos reciclados, PET (polietileno tereftalato), PS (poliestireno), EPS (poliestireno expandido) e EVA (etileno acetato de vinila); nessa ordem, como mostra a Figura 2.3

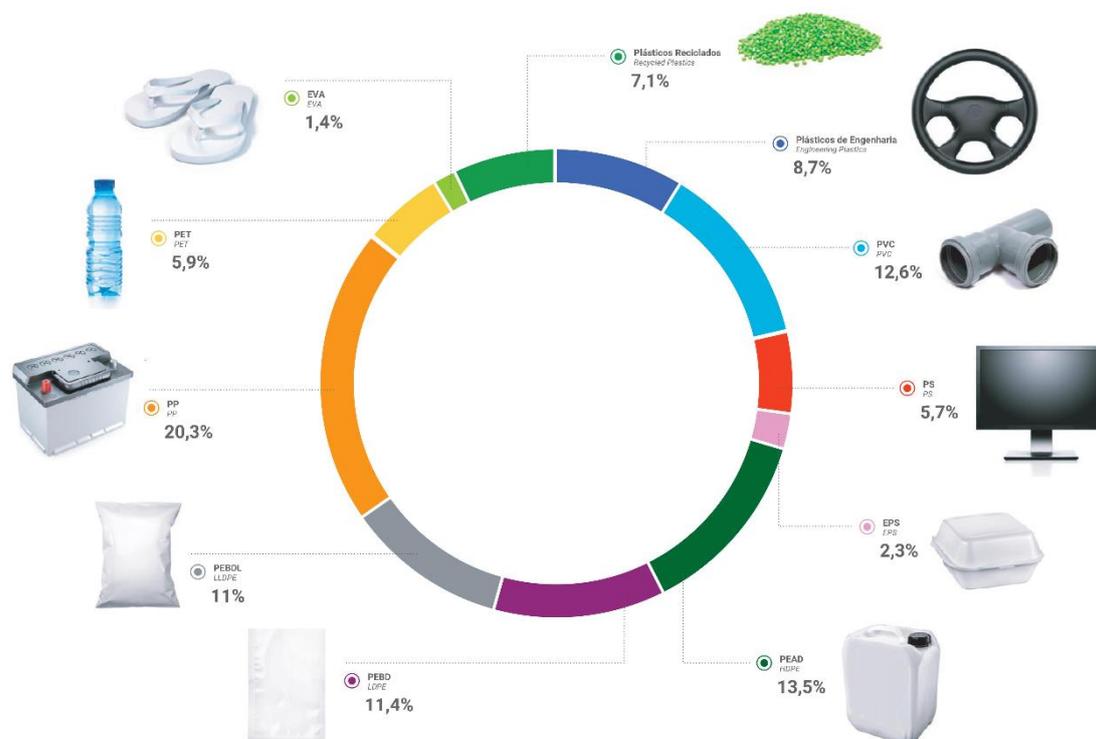


Figura 2.3 - Consumo de polímeros plásticos no Brasil

Existem no Brasil, mais de mil empresas responsáveis pela reciclagem de materiais plásticos pós consumo, sendo que mais de 50% estão localizadas nas regiões sul e sudeste do país. E mais de 11 mil empresas responsáveis pela transformação desses plásticos. Em 2018, aproximadamente 758 mil toneladas de resina plástica pós consumo foi produzido (ABIPLAST, 2019).

São seis etapas para reciclagem de materiais plásticos: concepção, consumo, destinação adequada, centrais de triagem, reciclagem mecânica e indústria de transformação (Figura 2.4).

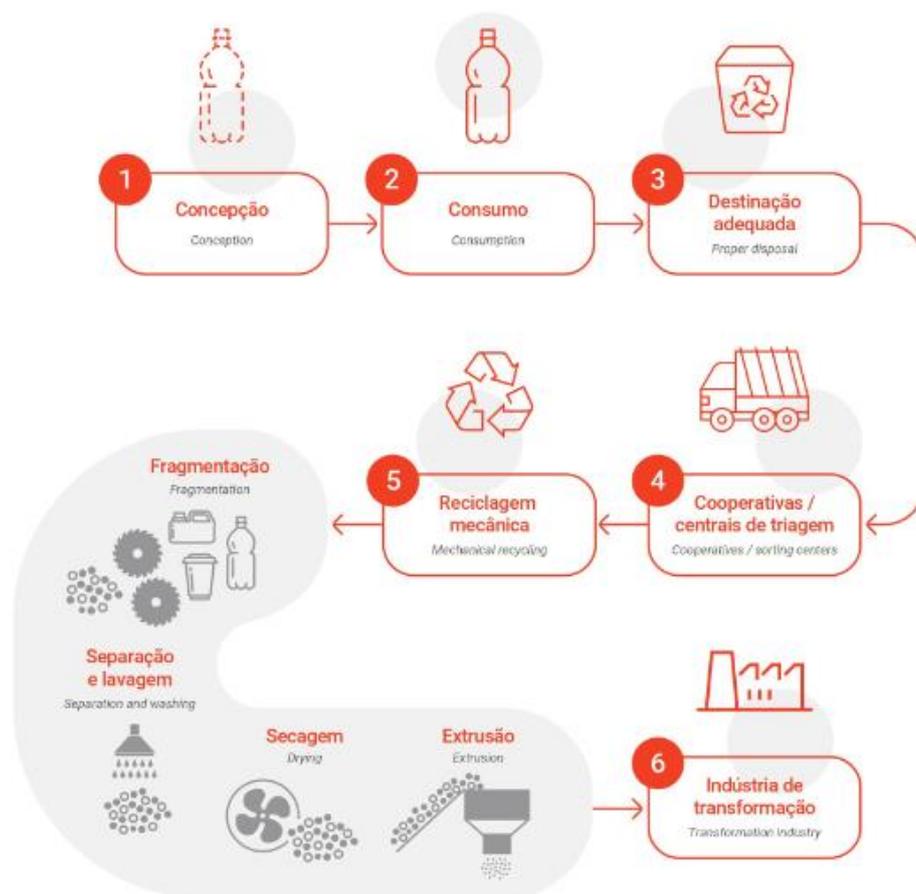


Figura 2.4 - Processo de reciclagem mecânica de materiais plásticos

A reciclagem de materiais plásticos gera ganhos socioambientais significativos. A cada tonelada de material reciclado produzido, gera-se emprego para 3 catadores, são economizados 450 L de água na produção e 75% de energia, reduz mais de 1 tonelada de resíduos plásticos dispostos em aterros e reduz a emissão de gases do efeito estufa na atmosfera (ABIPLAST, 2019). Visto a emergência de uma preocupação ambiental quanto aos resíduos urbanos sólidos (RSU), é imprescindível que haja um olhar mais atento para a reciclagem desse material.

### 2.3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO PET EM DIFERENTES FORMATOS

Não existe uma forma única e/ou normatizada para transformar as garrafas PET em materiais triturados, micronizados ou em fibras. Nas várias pesquisas citadas, encontra-se distintas formas de se conseguir esse material.

Em determinados casos, as garrafas são trituradas e micronizadas pelos próprios pesquisadores, em outros casos, esse material é comprado e admite-se um processo industrial. No caso das fibras, descreve-se um processo manual onde a garrafa é cortada do tamanho que

se pretende estudar ou no caso de fibras de diâmetros muito pequenos, as indústrias têxteis fabricam fibras desenvolvidas com 100% de garrafa PET como matéria prima.

De forma geral, o processo é o mesmo em todos os casos, diferindo apenas do ponto onde termina esse processo, sendo o formato de fibras o mais rápido e o micronizado o mais trabalhoso. Melo (2004) divide esse processo em etapas.

O primeiro passo é coletar e selecionar as garrafas, nesse momento são retirados a tampa e o rótulo dela. Depois disso elas são lavadas com água. Arao (2016) teve o cuidado de retirar as partes superior e inferior da garrafa, que são partes mais duras e resistentes, e utilizar apenas a parte do meio (Figura 2.5).



Figura 2.5 - Utilização apenas de parte da garrafa.

Caso a intenção seja utilizar fibras de PET, é após o primeiro passo que se inicia o processo manual de cortar os pedaços da garrafa do tamanho desejado ou de forma mais mecanizada, como em Meneses (2011) por meio de uma desfiadora artesanal (Figura 2.6).



Figura 2.6 - Processo de fabricação de fibras de PET com desfiadora artesanal (Meneses, 2011)

O segundo passo é a granulação, quando as garrafas são moídas em moinhos de facas. Assim são produzidos os flakes. Caso queira trabalhar com o material nesse formato, é nesse momento que o resultado dessa trituração é passado por peneiras e classificados seus tamanhos. Caso queira um material com dimensões menores, deve-se repetir esse processo.

O terceiro passo é chamado de aglomeração. É quando os flakes passam por um tratamento térmico de calor com o intuito de diminuir seu volume e consequentemente aumentar sua densidade. Isso porque os flakes possuem baixas densidades, o que inviabilizaria a próxima etapa que é a rotomoldagem.

A etapa de rotomoldagem consiste basicamente em cortar essas aglomerações produzidas no item anterior. Isso ocorre por meio de moagem em moinho de facas. O novo produto é chamado de Pellets, que é uma forma granulada do PET.

A última etapa é quando os Pellets são micronizados em moinho de bolas, tornando-se um pó, que se denomina PET micronizado, objeto de estudo desta pesquisa.

## 2.4 UTILIZAÇÃO DE PET EM OBRAS GEOTÉCNICAS

As pesquisas sobre a utilização de PET em obras geotécnicas são bem diversificadas quanto à forma desse polímero e ao tipo de obra.

Na construção civil, algumas pesquisas mostram viabilidade da utilização do concreto com pequenas quantidades de fibras de PET (Pelisser, 2002; Meneses, 2011; Guerra *et al.*, 2017) (Figura 2.7).



Figura 2.7 - Fibras de PET (Meneses, 2011)

Em Pelisser (2002) foi adicionado ao concreto, fibras de PET em diferentes tamanhos e quantidades. Os resultados mostram uma redução do módulo de deformação com o aumento do volume de fibras, um aumento da resistência à tração quando as fibras são maiores e aumento da tenacidade. Foram ensaiados concretos com idade de 35 e 150 dias. Notou-se um aumento da resistência ao impacto naqueles com 35 dias, fato que não ocorreu naqueles com 150 dias. Isso justifica-se devido a uma degradação das fibras na matriz do concreto observada por uma análise de microscopia eletrônica de varredura.

Em Guerra *et al.* (2017), a adição de fibras de PET em substituição ao agregado miúdo do concreto aumentou sua tenacidade (o que reduz o efeito do colapso da estrutura de concreto), mas reduziu a resistência a compressão axial, o que tornaria o concreto com PET não recomendado quando sua função for estrutural.

As fibras de PET também vêm sendo estudadas como reforço de solos, seja na utilização em aterros sanitários, reforço de taludes ou controle de erosão.

Casagrande (2005) esclarece que o termo reforço de solos, geralmente está associado a uma situação em que um material passa por um processo físico de melhoramento das suas propriedades mecânicas, tornando-se um novo material, denominado compósito.

Santos & Silva (2015) estudaram a viabilidade de reforço de um solo tropical adicionando fibras de PET. Os resultados mostram que as fibras promovem melhores resultados em termos de controle da perda da resistência do material, visto que no ensaio de compressão, após o pico, a queda de resistência no compósito ocorre de maneira mais suave. Também foi possível observar que as fibras foram eficientes no combate as fissuras do solo, já que elas se apresentaram em menor quantidade, menos abertas e mais rasas.

Senez (2016) avaliou o compósito areia-fibras PET, em diferentes tamanhos. Obteve-se resultados positivos e diferentes quanto ao tamanho da fibra nos parâmetros de resistência ao cisalhamento e no comportamento carga-recalque, reduzindo os recalques em até 60%. Fibras de tamanhos menores apresentaram resultados melhores de resistência mecânica.

O PET também vem sendo utilizado em outros formatos, como: triturado (chamados de flakes de diferentes tamanhos – Figura 2.8), e de forma micronizada.



Figura 2.8 - Flakes de PET de tamanhos distintos. À esquerda os flakes possuem 10 mm, e à direita 2 mm (Arao, 2016)

Em Louzada (2015), foram estudados três solos: argiloso, areia e bentonita. Neles foram adicionadas distintas porcentagens de PET triturado e micronizado. De forma geral, os

resultados mostram que a utilização de PET manteve ou melhorou os parâmetros de resistência ao cisalhamento quando comparados com o solo puro.

Em Ribeiro (2018) utilizou-se borracha e garrafas PET trituradas, fibras e micronizado, com o intuito de melhorar uma bentonita a ser utilizada em obras geotécnicas. Para ambos os resíduos foram encontradas melhoras no comportamento mecânico do solo. Foram inseridas duas porcentagens de PET micronizado, 5 e 10%. No ensaio de cisalhamento, nota-se que o aumento da porcentagem de PET gera uma queda na resistência de pico e na residual para a menor tensão. Em todas as misturas com PET houve um aumento no intercepto coesivo e uma redução no ângulo de atrito. No ensaio de adensamento, as misturas com PET desenvolveram um maior coeficiente de adensamento e uma redução da permeabilidade.

Carvalho (2019) propôs a utilização de resíduos de garrafas PET nas formas trituradas, em fibras e micronizado como forma de melhorar as características de um solo argiloso para camadas de base de pavimentos. Foram utilizadas porcentagens de 10, 20 e 30% de PET micronizado e realizados ensaios de: caracterização, mecânicos e módulo de resiliência.

Os resultados mostram que o PET micronizado diminui a massa específica aparente seca e a umidade ótima. Ele também altera a interação do solo com a água, tornando as misturas menos plásticas. Em uma quantidade menor de PET, observa-se um aumento da rigidez do solo e gera uma melhor resposta do módulo de resiliência. Sendo, portanto, importante o estudo de cada caso para se definir a melhor porcentagem de PET a ser utilizada.

A análise de todos os resultados obtidos em misturas utilizando o PET micronizado, Carvalho (2019) conclui que aquela onde foi utilizado 10% de PET é a mais recomendada a ser executada.

#### **2.4.1 MISTURAS ASFÁLTICAS COM PET**

Além das destinações de PET já citadas no item 2.4 existem também muitas pesquisas onde foi adicionado PET diretamente na mistura asfáltica a fim de alterar as suas características mecânicas. Há duas formas de se inserir esse polímero na mistura: como modificante do ligante (Moghaddam *et al.*, 2012; Ogundipe, 2019; Dalhat *et al.*, 2019) e como substituinte do agregado miúdo (Silva *et al.*, 2013; Arao, 2016; Räder, 2018).

Moghaddam *et al.* (2012) pesquisaram características de rigidez e fadiga em misturas do tipo SMA quando adicionados diferentes teores de resíduos de PET. Foi adicionado de 0,2% a 1% do material nas misturas. Observa-se que quanto maior a quantidade de PET menor é a rigidez da mistura, sendo significativa essa diferença em baixas cargas aplicadas, já em altas

cargas a rigidez é praticamente constante. A justificativa para tais fatos gira em torno do fato que as misturas não chegam à temperatura de fusão do PET (cerca de 250 °C), atingindo aproximadamente 160 °C, o que faria o material passar pelo processo de cristalização. Dessa forma, ao adquirir propriedades cristalinas a mistura tende a ficar mais flexível.

Sobre o estudo de fadiga, os resultados mostram que quanto mais PET melhor é a vida de fadiga da mistura, nas porcentagens estudadas. Assim, fica provado que, em misturas de SMA com adição de PET a rigidez e a vida de fadiga não possuem correlação direta, já que aquelas com menor rigidez apresentaram os melhores resultados de fadiga. Duas justificativas foram usadas: ou o PET melhora as propriedades elásticas ou ele promove uma melhor distribuição da tensão pela mistura, postergando suas trincas.

Ogundipe (2019) estudou a mistura asfáltica do tipo concreto asfáltico (CA) com modificação do ligante por resíduos de PET no teor ótimo, em porcentagens que variam de 4 a 16% (em massa do ligante) por meio da metodologia Marshall. O teor ótimo de ligante foi determinado a partir dos procedimentos do *Asphalt Institute* que propõe uma média entre os valores de teor onde foram encontrados: o maior valor de estabilidade, a maior densidade e o volume de vazios mais próximo de 4%. O PET utilizado foi triturado e derretido em forno para posterior modificação do ligante.

Os resultados obtidos mostram que a estabilidade da mistura sem adição de PET é maior que nas misturas modificadas, fato que foi justificado pela estabilidade da mistura entre o PET e o ligante asfáltico, e não é muito influenciada pela quantidade de PET. A fluência foi menor nas misturas modificadas até a porcentagem de 12% (devido ao aumento da rigidez do ligante modificado), e segue um padrão que mostra que quanto mais PET maior é a fluência. Também segue um padrão com a quantidade de PET adicionado a densidade, que aumenta e o volume de vazios que diminui com o aumento da quantidade de PET.

Dalhat *et al.* (2019) fizeram uma comparação entre uma mistura de CA quando inserido, como agregado, resíduos plásticos no geral (contendo polietileno de alta e baixa densidade, polietileno tereftalato, polipropileno reciclado, cloreto de polivinila reciclado e polipropileno reciclado) e com ligante asfáltico modificado por vários materiais, com uma mistura de CA apenas com PET.

Por meio da metodologia Superpave foram realizados os ensaios de módulo de resiliência, vida a fadiga, *flow number* e módulo dinâmico. De forma geral, o estudo mostrou que a mistura com resíduos plásticos apresentou melhores resultados quanto ao desempenho viscoelástico do que a mistura apenas com PET. O fato é que não se pode concluir se todos os resíduos plásticos

utilizados foram benéficos para o desempenho mecânico da mistura e nem como eles se interagem entre si.

Em Silva *et al.* (2013), foi estudado o CA na metodologia *Superpave* com substituição da areia por PET micronizado em porcentagens que variam entre 2,5 e 12,5%. Foram realizados ensaios de resistência a tração, *Lottman* modificado e módulo de resiliência. Os resultados mostram que, com o aumento da quantidade de PET aumenta-se o volume de vazios e diminui a relação betume-vazios. Os autores justificam tais resultados devido a massa específica do PET ser menor que a da areia, torna a mistura menos densa.

Sobre as propriedades mecânicas, o PET micronizado em maiores quantidades diminuiu a resistência, ficando fora dos requisitos de normas para teores acima de 7,5% de PET. Também diminuiu o módulo de resiliência, o que indica uma mistura menos suscetível a deformação permanente e conseqüentemente aumenta sua vida a fadiga.

Arao (2016) também estudou o CA, executando dosagem na metodologia Marshall, com substituição do pó de pedra pelo PET micronizado e de parte do agregado por flakes de PET com 10 e 2 mm. Todos em pequenas porcentagens. Os resultados não seguiram um padrão sobre a quantidade de PET adicionado e o tamanho dos flakes, mas de forma geral, em todas as situações houve um melhoramento mecânico da mistura.

Nota-se que a adição de PET micronizado fez com que a estabilidade da mistura fosse inferior a mistura convencional e a fluência maior, fato justificado pela diminuição no entrosamento das partículas. Em contrapartida, a resistência a tração foi a segunda maior encontrada e o módulo de resiliência foi um pouco maior, indicando leve alteração (aumento) na rigidez da mistura.

Räder (2018) também estudou CA dosado a partir da metodologia Marshall com diferentes teores de flakes (não especificado o tamanho) e de PET micronizado. Semelhante ao resultado encontrado em Arao (2016) o PET micronizado, em sua maior porcentagem estudada (1,5%) diminuiu a estabilidade e aumentou a fluência. No entanto, nesta pesquisa, todas as misturas estudadas que tiveram a inserção de PET apresentaram resultados de resistência a tração menor do que a encontrada na mistura convencional.

O ensaio de módulo de resiliência mostra que independente do formato de PET utilizado, triturado ou micronizado, quando colocados em pequenas quantidades (neste trabalho, 0,7%) apresentam módulo maior do que o da convencional, e nas misturas com maior quantidade de PET (1,5%), este valor é menor.

Serra *et al.* (2018) adicionaram 1, 2 e 3% de PET triturado (não especificado o tamanho) em uma mistura do tipo CA. Diferentemente dos resultados explanados dos trabalhos

anteriores, aqui a estabilidade foi superior nas misturas com PET. A resistência a tração e o módulo de resiliência variou pouco, mas percebe-se uma tendência a aumentar, em ambos os ensaios, com o aumento da quantidade de PET. O módulo de resiliência, levemente menor nas misturas com PET, indicam que este polímero flexibiliza a mistura, podendo ser um indicativo positivo sobre a resposta a fadiga.

Bastos *et al.* (2020) adicionaram porcentagens maiores de flakes de PET passantes na peneira 4,8 mm em substituição ao pó de pedra de uma mistura do tipo CA (5, 10 e 15%). A inserção e o aumento da quantidade de PET diminuíram a estabilidade e aumentou a fluência de forma significativa. A resistência à tração não obedeceu a um padrão com a quantidade de PET, mas de forma geral apresentou resultados inferiores ao encontrado na mistura convencional. Neste trabalho, também foi realizado um estudo térmico comparativo da mistura com PET e da mistura com a menor porcentagem de PET. Conclui-se que o PET reduz o coeficiente de condutividade térmica do CA, isso é positivo para o meio urbano uma vez que reduzindo o armazenamento calorífico dentro dos revestimentos também se reduz o fenômeno de Ilhas de Calor Urbana (ICU).

## 2.5 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Um pavimento é um conjunto de camadas capazes de resistir às ações do tráfego. O dimensionamento de um pavimento consiste em determinar as espessuras dessas camadas. Essas espessuras são calculadas a fim de garantir que o pavimento apresente patologias precoces e excessivas como o trincamento ou o afundamento de trilhas de roda na camada de revestimento (Figura 2.9). Essas espessuras são calculadas a fim de garantir que o pavimento apresente patologias excessivas apenas no final da vida de projeto.



Figura 2.9 – Do lado esquerdo uma trinca por fadiga do tipo couro de jacaré e do lado direito um exemplo de deformação permanente (Franco, 2007)

O trincamento mais comum do revestimento é resultado do fenômeno de fadiga, que pode levar essa camada à ruptura. O afundamento de trilhas de roda é o resultado do acúmulo do excesso de deformação permanente. Tais problemas ocorrem por dois motivos: quando o pavimento recebe cargas maiores e num volume mais elevado do que foi considerado no seu dimensionamento e/ou quando o dimensionamento não considera nenhuma variável de um pavimento (Ferreira, 2013).

No Brasil, tradicionalmente, é utilizado para dimensionar um pavimento o método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis, criado em 1966 pelo DNER, atual DNIT. Este método não considera o efeito de fadiga, visto que foi desenvolvido a partir de observações a respeito de deformações que ocorriam superficialmente em alguns tipos de pavimentos, composto por materiais específicos e em condições particulares de clima. Ele é caracterizado em função de ensaios de CBR e considera de forma muito simplificada todas as situações a serem dimensionadas (Coutinho, 2011).

Assim, o método CBR, como é conhecido, possui como limitação não considerar situações particulares da execução de um pavimento. Ele não é capaz de analisar de forma profunda variáveis que podem influir em um pavimento e que a posteriori podem influenciar no seu desempenho funcional e estrutural gerando assim um dimensionamento que pode não ser confiável para uma situação diferente daquela para qual ele foi desenvolvido (Franco, 2007).

Muitas pesquisas têm sido realizadas a fim de melhorar o conhecimento sobre o comportamento dos pavimentos e de compatibilizar em um método de dimensionamento todas as variáveis conhecidas que podem levá-lo a situações inadequadas de tráfego. Busca-se entender o problema de forma mais analítica, reduzindo o empirismo e tratando o pavimento de fato como uma obra de engenharia, onde seu comportamento mecânico é tratado em função da resistência dos materiais e do carregamento a qual vai ser submetido. No entanto, se torna muito difícil eliminar essa parcela de empirismo visto que no pavimento, muitos fatores se modificam com o tempo e são afetados com o acúmulo de passagem de cargas que são variáveis quanto a intensidade, distribuição e velocidade (Franco, 2007)

Dessa forma, tem surgido alguns métodos mecanísticos-empíricos, capaz de levar em conta principalmente o efeito de trincamento por fadiga, e que consideram as características dos materiais a serem utilizados de forma individual, apoiada em ensaios diversos de laboratório e por vezes considerando o clima da região.

Atualmente, tem-se falado muito do novo Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos, também chamado de MeDiNa, considerado o novo método de dimensionamento que vem sendo implantado e divulgado pelo DNIT, como substituto do

método CBR. Este método analisa a estrutura a partir do cálculo de tensões, deformações e deslocamentos do sistema de camadas levando em conta o carregamento e as características dos materiais (a partir dos resultados de ensaios laboratoriais). Assim, é possível prever o comportamento mecânico do pavimento durante a sua vida útil quanto aos dois problemas recorrentes: trincamento por fadiga e deformação permanente (Knabben & Carpio, 2019).

O dimensionamento é realizado a partir do software MeDiNa, em que são colocados dados de entrada como: o tráfego ao qual esse pavimento estará submetido (vida útil de projeto) e propriedades mecânicas dos materiais (módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e coeficientes da vida a fadiga) (Knabben & Carpio, 2019).

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental tem como objetivo analisar o comportamento mecânico de misturas do tipo areia asfalto usinada a quente (AAUQ) quando adicionado PET micronizado.

O PET em seu formato micronizado foi escolhido para ser utilizado nessa pesquisa por se tratar de um material fino que substituiria a parcela de filer da mistura, visto a dificuldade de se conseguir esse material naturalmente na maioria das areias. Além disso, em se tratando de uma mistura predominantemente constituída de agregado miúdo, utilizar um material de dimensões maiores descaracterizaria a mistura de AAUQ.

Foram realizados os seguintes ensaios: estabilidade e fluência Marshall, resistência a tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral e cântabro.

Era planejado a execução de ensaios no simulador de tráfego afim de verificar características da deformação permanente, mas devido ao momento de pandemia do COVID-19 no qual essa pesquisa foi realizada, esses ensaios não puderam ser realizados.

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados na confecção das misturas e detalhes da execução dos ensaios: equipamentos utilizados, considerações adotadas e normas de referência. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB) da Universidade de Brasília (UnB), com apoio do Laboratório do DER/DF e do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Goiás (UFG).

Como se trata de uma mistura pouco utilizada no centro-oeste brasileiro, o primeiro passo foi investigar traços de obras reais de Brasília – DF, onde a mistura AAUQ já tenha sido utilizada. Junto ao DER/DF tomou-se conhecimento de uma capa asfáltica com areia asfalto na rodovia DF-001 trecho DF-170/BR-020 onde a porcentagem de betume era de 8%.

A fim de se aproximar dessa realidade, coletou-se amostras de duas areias de pedreira (comercial e grossa), que foram indicadas como as mais utilizadas nessa região, na Bracal – Brasil Calcário e Areia Ltda. Apesar da granulometria estar de acordo com a Faixa C e o equivalente de areia estar dentro do recomendado por norma, apenas a adesividade da areia comercial se mostrou satisfatória, portanto, foi descartada a utilização da areia grossa.

Com a areia comercial, foram realizados os primeiros passos para dosagem Marshall, ou seja, moldados 15 corpos de prova, sendo 3 CP's para 5 teores pré-determinados (8%, 8,5%, 9%, 9,5% e 10%). Os parâmetros volumétricos encontrados nesta mistura estavam muito

distantes dos limites recomendados por norma, principalmente no que diz respeito ao volume de vazios, que foi superior a 20%, quando o máximo admitido é de 8%. Por isso, também foi descartada a utilização dessa areia.

Assim, buscou-se uma terceira areia, que embora não seja a utilizada nas obras do DF se encaixou melhor em todos os parâmetros recomendados por norma. Ela será apresentada no item 3.1.1.

Alguns ensaios

### **3.1 MATERIAIS**

Foram utilizados quatro materiais nesta pesquisa: agregado (areia), cal, PET micronizado e ligante asfáltico.

#### **3.1.1 AGREGADO**

O agregado dessa mistura é a areia. Foi utilizada uma areia de rio, classificada como de granulometria média, adquirida em um estabelecimento comercial. A Figura 3.1 mostra a areia utilizada.



Figura 3.1 - Areia utilizada nas misturas do tipo AAUQ

Toda a areia utilizada foi passada pela peneira nº 4 (4,75 mm) e o material retido foi descartado, configurando assim uma mistura exclusiva de agregados miúdos.

### **3.1.2 FÍLER ATIVO (CAL)**

A cal virgem utilizada para compor a mistura convencional AAUQ estudada, para que esta se enquadrasse nos parâmetros exigidos por normas, foi a SUPERCAL, adquirida em um estabelecimento comercial, cujo produtor é a Ica – Indústria de Calcinação Ltda.

### **3.1.3 POLIETILENO TEREFTALATO (PET) MICRONIZADO**

O PET micronizado foi cedido pela empresa Micropet Beneficiamento de Termoplásticos Ltda. A empresa trabalha com esse produto com a finalidade de reduzir custos no seguimento colchoeiro, sendo este polímero matéria prima na industrialização de espumas de poliuretano.

O material vem estocado em sacos de 25kg, resultados de garrafas PET moídas, seguindo o processo de micronização, e tem o aspecto apresentado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Polietileno tereftalato (PET) micronizado

### **3.1.4 LIGANTE ASFÁLTICO**

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa é o CAP 50/70, que é o mais usado nas obras do Distrito Federal. Ele foi cedido para esta pesquisa pela Centro Oeste Asfaltos.

## **3.2 MÉTODOS**

Nesta etapa são apresentados detalhes dos procedimentos adotados na execução dos ensaios de caracterização e mecânicos realizados. O fluxograma da Figura 3.3 resume as etapas seguidas para realização dessa pesquisa.

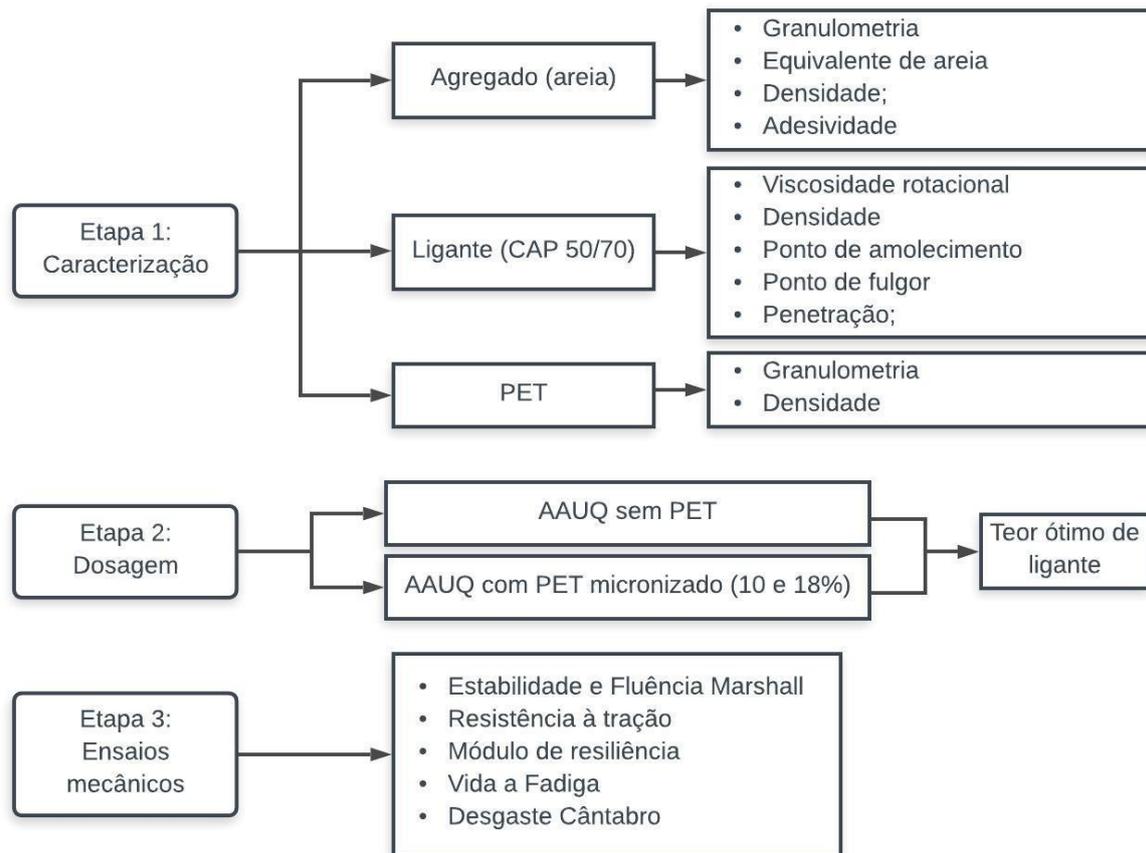


Figura 3.3 - Fluxograma das etapas da pesquisa

De acordo com o fluxograma, após a caracterização de todos os materiais que foram utilizados na pesquisa, a confecção das misturas seguiu a metodologia de dosagem Marshall e posteriormente foram realizados os ensaios mecânicos. Assim, a pesquisa pode ser dividida em seis partes:

**1)** Caracterização dos materiais utilizados: agregado (areia), cal, PET micronizado e ligante;

**2)** Definição do teor ótimo de ligante das misturas propostas:

- M1: mistura asfáltica do tipo AAUQ convencional, com a adição de 10% de cal;

- M2: mistura asfáltica do tipo AAUQ, com a adição de 10% de PET micronizado em substituição (por massa) da areia;

- M3: mistura asfáltica do tipo AAUQ, com a adição de 18% de PET micronizado em substituição (por massa) da areia.

**3)** Compactação de corpos de prova para realização dos ensaios volumétricos e mecânicos;

**4)** Realização dos ensaios volumétricos para determinação dos parâmetros: volume de vazios (Vv) e relação betume vazios (RBV);

5) Execução dos ensaios mecânicos: estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral à tensão controlada e cântabro;

6) Dimensionamento do pavimento por meio do método MeDiNa.

Os teores de cal e PET apresentados foram adotados pelos seguintes motivos: a utilização de 10% de cal foi necessária para se enquadrar a mistura nos parâmetros volumétricos exigidos. A utilização de 10% de PET foi escolhida a fim de garantir boa comparação com a mistura convencional. E a utilização de 18% de PET foi a máxima porcentagem em que era possível adequar parâmetros volumétricos e manter a curva granulométrica na faixa de projeto escolhida (Faixa C). Vale ressaltar que a utilização da cal só ocorreu na mistura convencional.

Após definição dos teores de cal e PET micronizado utilizados, adequados aos parâmetros volumétricos exigidos por norma, foram contabilizados os corpos de provas moldados para cada mistura proposta. Essa quantidade está apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Quantidade de CP's moldados no decorrer da pesquisa

<b>Processos</b>	<b>Quantidade de CPs por mistura</b>
Determinação do teor ótimo de ligante e ensaio Marshall	15
Estabilidade e fluência Marshall	3
Resistência à tração por compressão diametral	3
Módulo de resiliência e Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	12
Cântabro	3
<b>Total por mistura</b>	<b>36</b>
<b>Total da pesquisa</b>	<b>108</b>

### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO

O agregado utilizado nessa pesquisa foi a areia. A areia estudada passou por ensaios de caracterização: análise granulométrica (DNIT ME 412/19), equivalente de areia (DNER ME 054/97), densidade dos grãos (pentapicnômetro do modelo PENTAPYC 5200E) e adesividade por um processo conhecido como ensaio acelerado, descrito na DERT ES 14/00.

### 3.2.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO

Na análise granulométrica busca-se conhecer as características do agregado a ser utilizado, quanto ao tamanho e suas proporções. Uma distribuição granulométrica adequada leva a um bom intertravamento das partículas e conseqüentemente uma melhor estabilidade para a mistura.

De acordo com a norma DNIT ME 412/19, como todo material utilizado é passante na peneira nº 4, o tamanho máximo dos agregados utilizados é de 4,75 mm, portanto, foi utilizado 500 gramas de areia para realizar esse ensaio. O peneiramento foi feito com um agitador mecânico (Figura 3.4), em 3 repetições.



Figura 3.4 - Agitador mecânico com as peneiras utilizado para os ensaios de análise granulométrica por peneiramento

As peneiras utilizadas seguem as recomendações da norma do DNIT ME 412/19 e tem as especificações apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Número das peneiras e abertura da malha (DNIT ME 412/19)

<b>Peneiras ASTM</b>	<b>Abertura da malha (mm)</b>
4	4,75
8	2,36
16	1,18
30	0,60
50	0,30
100	0,15
200	0,075

### 3.2.1.2 EQUIVALENTE DE AREIA

O equivalente de areia (EA) define as proporções arenosas e argilosas do material estudado, em bases volumétricas. Ou seja, ele é capaz de determinar a pureza do material em relação à porcentagem de argila. O resultado é a média aritmética de três determinações. Os processos do ensaio são apresentados na Figura 3.5.

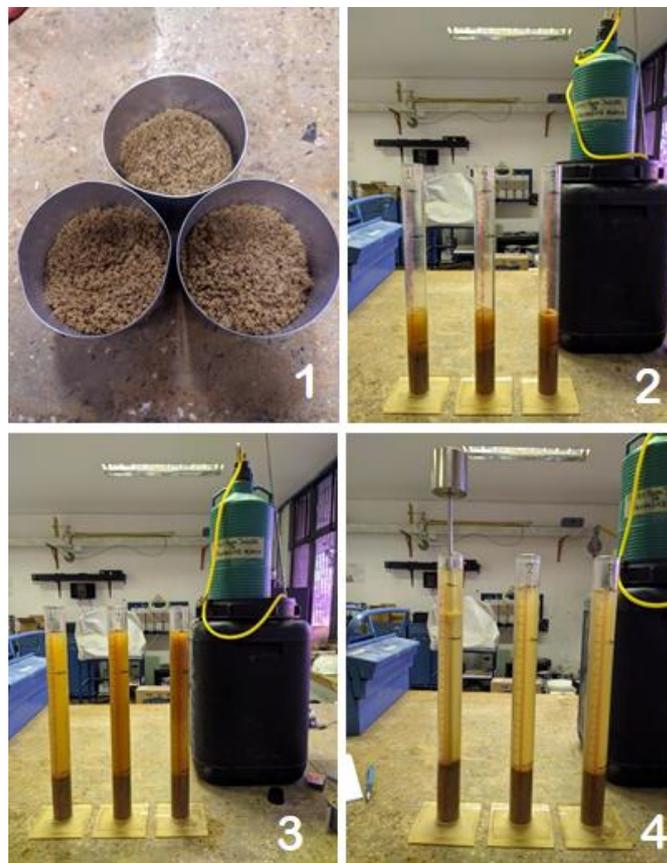


Figura 3.5 - Passo a passo do ensaio de equivalente de areia

### 3.2.1.3 DENSIDADE DOS GRÃOS

Para a determinação da densidade real dos grãos (Gs) foi utilizado um pentapicnômetro. O equipamento da marca Quantachrome Instruments e do modelo PENTAPYC 5200E está no Laboratório de Geotecnia da UnB. Ele analisa automaticamente a densidade sem interferências do operador (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Equipamento utilizado para determinar a densidade real dos grãos (Chrusciak, 2013)

Este equipamento utiliza a injeção de gás hélio para determinação da densidade. É medido o volume de gás inserido para preencher os vazios, dessa forma o volume ocupado pela amostra é calculado. O resultado será a média aritmética de 5 medidas geradas pelo equipamento.

### 3.2.1.4 ADESIVIDADE

Foi realizado o ensaio de adesividade acelerada, seguindo as recomendações da DERT ES 14/00. O ensaio consiste em utilizar 100g do material seco passante na peneira nº 10 (2,00 mm) para preparar uma mistura com uma quantidade de CAP encontrada por meio da equação:

$$p = 7,0 * (5 + 1,3 * f)^{0,2} \quad (3.1)$$

Onde  $f$  é a % passante na peneira nº 200.

Depois, se coloca a mistura em água e deixar ferver por 3 minutos. Neste processo, observa-se se houve ou não deslocamento da película de CAP, em caso negativo, a adesividade é considerada satisfatória, em caso positivo, a adesividade é não satisfatório e é necessário a adição de DOPE (melhorador de adesividade).

### 3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO PET MICRONIZADO

O PET micronizado passou pelos ensaios de análise granulométrica (DNIT ME 412/19) e densidade dos grãos (pentapicnômetro do modelo PENTAPYC 5200E).

Os procedimentos utilizados foram os mesmos e explicados no item 3.2.1. Com a ressalva de que, como se trata de um material leve, o peneiramento mecânico não pareceu adequado, pois os grãos não caíam somente com a agitação. Assim foi feito peneiramento manual, com atrito das mãos na peneira, a fim de forçar que ele passasse na malha da peneira.

### 3.2.3 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

A Tabela 3.3 mostra os ensaios realizados para caracterizar o ligante asfáltico (CAP 50/70) e seus respectivos métodos de ensaio.

Tabela 3.3 - Ensaios de caracterização do ligante e as suas respectivas normativas.

Ensaios de caracterização	Método de ensaio
Penetração	DNIT ME 155/10
Ponto de amolecimento (método anel e bola)	DNIT ME 131/10
Viscosidade rotacional (Brookfield)	ASTM D4402/02
Ponto de fulgor	ABNT NBR 11341/15
Densidade e massa específica	DNER ME 193/96

#### 3.2.3.1 PENETRAÇÃO

É o método utilizado para determinação do tipo de ligante que será utilizado a partir do dado de penetração. Ou seja, a profundidade que uma agulha de peso padronizado (todo o aparato deve pesar 100 g) penetra em uma amostra a 25°C por 5 segundos. O resultado é a média de 3 medidas (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Ensaio de penetração

### 3.2.3.2 PONTO DE AMOLECIMENTO (MÉTODO ANEL E BOLA)

O ponto de amolecimento é uma estimativa da suscetibilidade térmica do ligante, é uma medida empírica que indica a que temperatura, em condições predeterminadas, o ligante começa a escoar. O ensaio consiste em dois anéis preenchidos com o CAP estudado, colocados em um aparato próprio para o ensaio e com uma bolinha de aço de peso 3,50 g sob cada um deles. O aparato é submetido a aquecimento a uma razão de 5°C por minuto (que foi realizada em uma chapa aquecedora) e munido de um termômetro. O aquecimento faz com que a bolinha desça recoberta pelo ligante até encostar em uma placa inferior do aparato, quando isso ocorre deve-se medir a temperatura (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Ensaio de ponto de amolecimento

### 3.2.3.3 VISCOSIDADE ROTACIONAL (OU BROOKFIELD)

O ensaio de viscosidade determina a consistência do ligante. Através dele é possível traçar a curva de viscosidade-temperatura de onde será possível tirar a temperatura na qual o ligante apresenta condições de consistência ideal para cobrir perfeitamente os agregados da mistura. O ensaio de Brookfield consiste em aplicar rotação em uma haste mergulhada em uma amostra de ligante a diferentes temperaturas, o torque gerado e a velocidade medida determinam a viscosidade do material.

O ensaio foi realizado e as leituras foram feitas obedecendo as recomendações da norma de torque entre 10 e 98%, de forma que foi necessário alterar a velocidade (em rpm) para cada temperatura. Foram feitas 3 medições em cada uma das temperaturas: 135, 150 e 177 °C.

Com esses resultados, foi possível traçar a curva viscosidade-temperatura. Neste gráfico, foram marcadas linhas de referência nos limites determinados pela a norma DNIT PRO 178/18 para temperatura de mistura ( $0,17 \pm 0,02$  Pa.s) e para temperatura de compactação ( $0,28 \pm 0,03$  Pa.s). Logo, a temperatura de mistura e de compactação foi a média dos valores encontrados no limite inferior e superior do gráfico.

### 3.2.3.4 PONTO DE FULGOR

Este ensaio é realizado como forma de segurança para o transporte e usinagem do ligante, visto que a partir de dada temperatura ele pode se tornar inflamável. É justamente essa temperatura que o ensaio indica. Ou seja, o resultado do ensaio é a menor temperatura na qual os gases desprendidos devido ao aquecimento do ligante asfáltico podem se inflamar quando em contato com o aparato padronizado.

De forma geral, o ponto de fulgor de ligantes asfálticos costuma ser em uma temperatura acima de 230°C.

### 3.2.3.5 DENSIDADE E MASSA ESPECÍFICA

A densidade do ligante asfáltico é a relação da massa de um dado volume do material a 25°C para a massa de igual volume de água destilada a essa mesma temperatura. Para isso, utiliza-se a equação abaixo para essa determinação a partir de medições realizadas durante o ensaio.

$$Ds = \frac{d-a}{(b-a)-(e-d)} \quad (3.2)$$

Onde:

Ds é a densidade do ligante asfáltico;

a é a massa do picnômetro vazio, com tampa;

b é a massa do picnômetro cheio de água destilada, com tampa;

d é a massa do picnômetro parcialmente preenchido com ligante asfáltico, com tampa;

e é a massa do picnômetro parcialmente preenchido com ligante mais água, com tampa.

A Figura 3.9 mostra os picnômetros utilizados neste ensaio, parcialmente preenchidos com ligante.

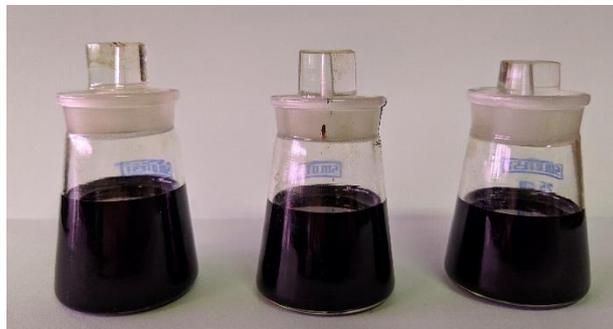


Figura 3.9 - Ensaio de densidade do ligante em três repetições

### 3.2.4 DOSAGEM MARSHALL (DEFINIÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE LIGANTE)

A dosagem constitui em um método de escolher o teor de ligante ótimo para uma mistura com faixa granulométrica predeterminada. Os métodos de compactação mais conhecidos são: Marshall e *Superpave*. O método Marshall compacta a mistura por impacto, enquanto o método *Superpave* compacta por amassamento. Conceitualmente, o método *Superpave* produz corpos de prova que representam melhor o comportamento da mistura em campo (Bernucci *et al.*, 2010).

O método de dosagem Marshall (DNER ME 043/95) ainda é a metodologia mais utilizada no Brasil. A quantidade de golpes é determinada dependendo da pressão do pneu a qual o pavimento será submetido, 50 golpes para pressão de 7 kfg/cm<sup>2</sup> e de 75 golpes para pressão de 7 a 14 kgf/cm<sup>2</sup>.

Neste trabalho, optou-se por realizar a dosagem Marshall pois o laboratório utilizado para moldar os corpos de prova possui o molde de 150 mm de diâmetro para a moldagem *Superpave* e isso demandaria uma quantidade muito grande de material por corpo de prova. Assim, a moldagem aconteceu com 50 golpes, visto que esse tipo de mistura é indicado para vias de baixo a médio tráfego.

Segundo Bernucci *et al.* (2010), a dosagem Marshall pode ser dividida em oito passos:

1. Determinação das massas específicas reais do ligante e dos agregados: encontradas na bateria de ensaios de caracterização;
2. Escolha da faixa granulométrica a ser utilizada: Faixa C especificada na DERT ES 14/00;
3. Escolha da composição granulométrica dos agregados: foram propostas três misturas, cuja composição está descrita no item 4.1.
4. Determinação das temperaturas de mistura e compactação, que dependem apenas das propriedades de viscosidade do ligante;
5. Adoção de teores de ligantes, levando em conta a granulometria escolhida. Serão realizados 5 grupos com 3 CP's cada, variando de  $\pm 0,5\%$  e  $\pm 1,0\%$  de ligante: foram escolhidos, a partir do traço de referência do DER/DF, valores de 8 a 10% para as misturas M1 E M2 e de 7 a 9% para a mistura M3.
6. Medição dos diâmetros, alturas e massas (seca e submersa) dos CP's;

7. Calcula-se o valor da massa específica máxima teórica (DMT) ou realiza o ensaio de rice test para determinar a massa específica máxima medida (DMM): o cálculo do DMT é dado pela equação:

$$DMT = \frac{100}{\left(\frac{\% LIGANTE}{DENSIDADE DO LIGANTE}\right) + \left(\frac{\% AGREGADOS}{DENSIDADE DO AGREGADO}\right) + \left(\frac{\% FILER}{DENSIDADE DO FILER}\right)} \quad (3.3)$$

Foi realizado o *Rice Test* em alguns CP's moldados para determinação do teor ótimo de ligante de cada mistura e notou-se uma diferença mínima entre o DMT e o DMM, que não provoca alteração nos resultados seguintes. Portanto, foi utilizado os valores encontrados no cálculo DMT.

8. Calcula-se os parâmetros volumétricos: massa específica aparente da mistura ( $G_{mb}$ ), volume de vazios ( $V_v$ ), vazios cheios com betume ( $V_{CB}$ ), vazios do agregado mineral ( $V_{AM}$ ) e relação betume/vazios ( $RBV$ ), através das equações abaixo, respectivamente:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{(M_{SSS} - M_{sub})} * \rho_{\text{água}} \quad (3.4)$$

Onde  $M_s$  é a massa do corpo de prova seca,  $M_{sub}$  é a massa do corpo de prova saturado por cerca de 5 minutos e  $M_{SSS}$  é a massa do corpo de prova saturado e superficialmente seco, ou seja, seguindo a metodologia ASTM D 2726/00.

$$V_v = 100 * \left(\frac{DMT - G_{mb}}{DMT}\right) \quad (3.5)$$

$$V_{CB} = \frac{G_{mb} * \% LIGANTE}{DENSIDADE DO LIGANTE} \quad (3.6)$$

$$V_{AM} = V_v + V_{CB} \quad (3.7)$$

$$RBV = \frac{V_{CB}}{V_{AM}} * 100 \quad (3.8)$$

Como foi mostrado no item **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a norma do DNIT ES 032/05 traz limites de  $V_v$  que deve estar entre 3 e 8% e de  $RBV$  que deve estar entre 65 e 82.

A partir de então, pode-se escolher entre vários métodos para encontrar o teor ótimo de ligante. Uma das formas consiste em traçar um gráfico  $V_v$  e  $RBV$  x Teor de Asfalto. No gráfico são plotados os pontos correspondentes aos valores obtidos de  $V_v$  e  $RBV$  dos 5 grupos de teores de ligante. Após isso, são adicionadas linhas de tendência para esses valores. O gráfico também

deve conter linhas limites que diferem de acordo com as recomendações da norma de Vv e RBV. No encontro entre a linha de tendência e as linhas limites são determinados quatro teores de ligante (X1, X2, X3 e X4). O teor ótimo de ligante é uma média entre os teores do meio. Veja na Figura 3.10 um exemplo desse gráfico.

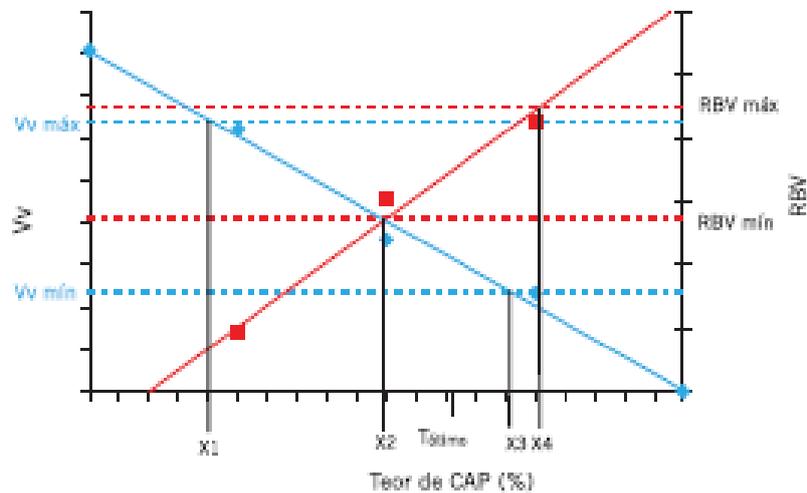


Figura 3.10 - Gráfico Vv x Teor de CAP x RBV para determinação do teor ótimo de ligante pela metodologia Marshall (Bernucci *et al.*, 2010)

A Figura 3.11 mostra imagens ilustrativas do processo de moldagem dos corpos de provas.



Figura 3.11 - Processo de moldagem dos CP's

### 3.2.5 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos na pavimentação são a forma de se obter parâmetros para dimensioná-los. Por isso, é importante acurácia na execução do ensaio e no tratamento dos resultados para que os parâmetros indicativos do desempenho da mistura asfáltica reproduzam o que ocorre na realidade. Os ensaios mecânicos realizados e suas respectivas normativas estão indicadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Lista de ensaios mecânicos realizados e suas respectivas normas

Ensaio mecânico	Método de ensaio
Estabilidade e fluência Marshall	DNER ME 043/95
Resistência à tração por compressão diametral (RT)	DNIT ME 136/18
Módulo de resiliência (MR)	DNIT ME 135/18
Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	DNITME 183/18
Perda de massa por abrasão cântabro	ABNT NBR 15140/14

#### 3.2.5.1 ENSAIO MARSHALL – ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL

É o ensaio realizado para determinação da estabilidade e da fluência de misturas asfálticas usinadas a quente utilizando o equipamento Marshall. A estabilidade Marshall é a resistência máxima à compressão (expressão em N (kgf)) e a fluência Marshall é a deformação total sofrida pelo corpo de prova até a aplicação da carga máxima (expressa décimo de mm). Este ensaio foi realizado no Laboratório do DER. O equipamento é apresentado na Figura 3.12.

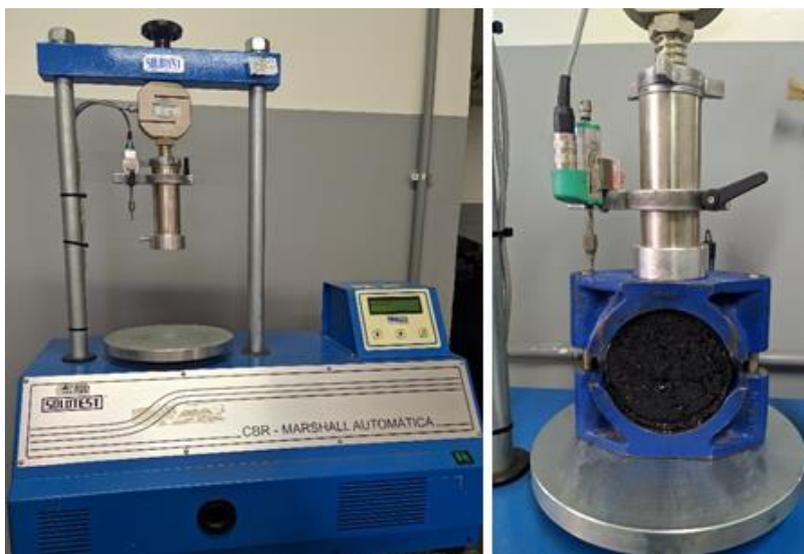


Figura 3.12 - Ensaio de estabilidade e fluência Marhsall

Os corpos de prova foram imersos em banho maria a 60°C por 30 minutos e em seguida levados até a prensa para ser ensaiados. O prato da prensa sobe a uma velocidade de 5 cm por minuto até o rompimento do CP (detectada por um defletômetro).

O resultado lido no equipamento para estabilidade é uma carga em kgf que deve ser corrigida multiplicando por um fator que leva em conta a altura do corpo de prova, este fator está indicado na equação:

$$f = 927,23 * h^{-1,64} \quad (3.9)$$

Onde:

f é o fator;

h é a média de quatro medidas de altura do corpo de prova, em mm.

Foram ensaiados 3 corpos de prova depois que eles passaram pela volumetria. Os resultados, de estabilidade e de fluência, são médias aritméticas dos CP ensaiados nas mesmas condições.

### **3.2.5.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

O ensaio consiste em aplicar um carregamento estático crescente até a ruptura do corpo de prova cilíndrico para determinar a sua resistência à tração indireta a partir de um ensaio de compressão diametral. Esse procedimento foi realizado no Laboratório do DER.

Como o ensaio é realizado a 25°C, os corpos de prova foram colocados em banho maria nessa temperatura por 4 horas (o mesmo utilizado no ensaio Marshall, embora neste a temperatura seja de 60°C). Em seguida, o CP foi levado para a prensa rapidamente e submetido ao ensaio (Figura 3.13). O prato da prensa se eleva a uma velocidade de 0,8 mm/s até que haja ruptura completa. O resultado lido no equipamento é a carga de ruptura (F). O resultado é a média aritmética de três medidas de resistência à tração, que é calculada utilizando a equação:

$$\sigma_R = \frac{2*F}{\pi*D*h} \quad (3.10)$$

Onde:

$\sigma_r$  é a resistência a tração, em MPa;

F é a carga de ruptura, em N;

D é a média de quatro medidas de diâmetro do corpo de prova, em mm;

h é a média de quatro medidas de altura do corpo de prova, em mm.



Figura 3.13 - Ensaio de resistência a tração por compressão diametral

### 3.2.5.3 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O módulo de resiliência (MR) é uma relação entre a tensão horizontal provocada por uma carga vertical cíclica aplicada e a deformação horizontal gerada pelo deslocamento horizontal resiliente (ou seja, recuperável). Para determinar o módulo de resiliência é realizado um ensaio em equipamento de compressão diametral com carga repetida.

O ensaio foi realizado na prensa cíclica triaxial dinâmica ELE International. Como especificado na norma, ele é executado com ciclo de carregamento composto por 0,1 segundos de pulso de carga e 0,9 segundos de período de repouso (totalizando 1 segundo), a uma temperatura de 25°C.

A carga do ensaio deve ser escolhida entre 5 e 25% do RT obtido. Portanto foi adotado o valor referente a pior situação, ou seja, 25% do RT.

Foram aplicados 50 ciclos de carga para condicionamento do corpo de prova e 15 ciclos registrando os deslocamentos, onde os 5 últimos foram utilizados para cálculo do MR. O MR é calculado a partir da equação:

$$MR (MPa) = \frac{P}{|\Delta H| * h} * (0,2692 + 0,9976 * \nu) \quad (3.11)$$

Onde:

P é a carga cíclica, em N;

$\Delta H$  é o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente), em mm;

h é a média de quatro medidas da altura do corpo de prova, em mm;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson, adotado como 0,3 (ensaio da 25°C).

No software do equipamento utilizado, é selecionado que o ensaio siga padrões da norma ASTM D 4123/95. Portanto, o valor de MR que o ensaio traz não condiz àquele que seria encontrado caso siga os padrões da norma brasileira. Dessa forma, retirou-se do ensaio apenas o deslocamento horizontal, em mm, obtido pelo LVDT e calculado separadamente o valor de MR de acordo com a Equação 3.11.

A norma pede que o ensaio seja realizado em pelo menos 3 corpos de prova, mas optou-se por realizar este ensaio em 12 corpos de prova de cada mistura, os mesmos que foram utilizados no ensaio de fadiga. Assim, o valor de MR apontado é referente a média de 12 ensaios.

#### **3.2.5.4 ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA**

Este ensaio busca determinar como a mistura asfáltica se comporta frente a um carregamento vertical diametral pulsante. Esse carregamento gera uma tensão de tração horizontal que provoca a ruptura do corpo de prova (DNIT ME 183/18). Deste ensaio, retira-se o valor da vida de fadiga (N) que é definida pelo volume de tráfego, em termos de equivalente do eixo padrão, que o revestimento resiste até apresentar trincas. O critério de parada do ensaio é quando o corpo de prova atinge sua ruptura completa.

O ensaio foi realizado na mesma prensa exposta acima para o ensaio de módulo de resiliência (Figura 3.14), ele também é realizado com ciclo de carregamento composto por 0,1 segundos de pulso de carga e 0,9 segundos de período de repouso (totalizando 1 segundo), a uma temperatura de 25°C e com frequência de 1 Hz (60 ciclos por minuto).



Figura 3.14 - Ensaio de vida a fadiga

Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada um dos 4 níveis de tensão determinados: 300, 250, 200 e 150 kPa para as misturas M1 e M2 e 400, 350, 300 e 250 kPa para mistura M3, que se mostrou mais resistente. Estes valores atendem, para as três misturas propostas, a exigência da norma de que os níveis de tensão devem ser escolhidos entre 5 e 40%.

A carga aplicada ( $F'$ ) para gerar essas tensões é dada pela Equação 11:

$$F' (kN) = \frac{\pi * D * h}{2} * \sigma_t \quad (3.12)$$

Onde:

$D$  é a média de quatro medidas de diâmetro do corpo de prova, em metros;

$h$  é a média de quatro medidas de altura do corpo de prova, em metros;

$\sigma_t$  é a tensão aplicada no ensaio, em kPa.

O resultado será expresso em gráficos logarítmicos do tipo:  $N \times \Delta\sigma$  e  $N \times \varepsilon_r$ , sendo  $\Delta\sigma$  a diferença entre a tensão horizontal e a tensão vertical, calculada pela Equação 12 e  $\varepsilon_r$  a deformação específica resiliente, calculada pela Equação 13.

$$\Delta\sigma (kPa) = \frac{2 * F (kN)}{\pi * D (m) * h (m)} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_t (kPa)}{MR (kPa)} \quad (3.14)$$

Onde:

$MR$  é o módulo de resiliência, em kPa.

As condições da prensa não permitem que seja realizado a etapa de cálculo do módulo de resiliência no início desse ensaio, portanto, foi utilizado o valor de  $MR$  encontrado no ensaio próprio para determinação do módulo de resiliência.

### 3.2.5.5 DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA POR ABRASÃO CÂNTABRO

O ensaio determina a porcentagem de perda de massa por abrasão cântabro de corpo de prova cilíndricos. Foi realizado o procedimento sem condicionamento a 25°C, na máquina de abrasão Los Angeles, que foi programada para realizar 300 revoluções a uma velocidade de 30 rpm. O corpo de prova é pesado antes de ser ensaio e após ser ensaiado, a porcentagem de perda é calculada através da equação:

$$A = \frac{m - m'}{m} * 100 \quad (3.15)$$

Onde:

$A$  é a porcentagem de perda de massa, sem condicionamento;

$m$  é a massa do corpo de prova antes de ser ensaiado, sem condicionamento, em g;

$m'$  é a massa do corpo de prova após ser ensaiado, em g.

O resultado é expresso como a média aritmética dos 3 corpos de prova ensaiados. O equipamento utilizado e os corpos de prova ensaiados são apresentados na Figura 3.15.



Figura 3.15 - Ensaio de desgaste cântabro

### 3.3 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

A proposta de dimensionamento do pavimento desta pesquisa seguirá as diretrizes do novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, MeDiNa. Este novo método, dimensiona as estruturas considerando um critério mecanístico-empírico, em que se obtém as tensões, deformações e deslocamentos da estrutura baseado em resultados de ensaios laboratoriais. A partir dessa análise, pode-se prever o comportamento da estrutura durante a vida útil de projeto quanto a duas patologias: trincamento por fadiga e deformação permanente. Esses dois defeitos, muito comuns nos pavimentos brasileiros, são os fatores que determinam a aceitação do dimensionamento.

Para avaliar o comportamento de inserção de PET nas misturas asfálticas do tipo AAUQ, foram realizadas três simulações no software MeDiNa. De forma que, variou-se apenas os dados da camada de revestimento, sendo para uma camada sem PET (caracterizando a mistura convencional), uma camada com adição de 10% de PET e outra com adição de 18% de PET. Os dados utilizados foram aqueles encontrados nos ensaios laboratoriais para cada mistura.

A estrutura do pavimento adotada é composta por 3 camadas: revestimento, base e subleito. Os dados de entrada do subleito e da base são os mesmos nas três simulações, varia-se a espessura de acordo com a avaliação da estrutura. A Figura 3.16 esquematiza os valores adotados nestas simulações.



<b>REVESTIMENTO</b>	Convencional $\nu = 0,30$ Módulo resiliente linear MR = 1319 MPa Fadiga: $k1 = 1,0 \times 10^{-8}$ ; $k2 = -3,142$	10% de PET $\nu = 0,30$ Módulo resiliente linear MR = 1041 MPa Fadiga: $k1 = 7,0 \times 10^{-10}$ $k2 = -3,666$	18% de PET $\nu = 0,30$ Módulo resiliente linear MR = 1854 MPa Fadiga: $k1 = 3,0 \times 10^{-35}$ $k2 = -10,5$
<b>BASE</b>	$\nu = 0,35$ Módulo resiliente não linear MR, $k1 = 385,44$ ; $k2 = 0,228$ ; $k3 = 0,031$ Deformação permanente não linear $k1 = 0,088$ ; $k2 = -0,146$ ; $k3 = 1,618$ ; $k4 = 0,062$		
<b>SUBLEITO</b>	$\nu = 0,45$ Módulo resiliente linear MR = 189 MPa Deformação permanente não linear $k1 = 0,244$ ; $k2 = 0,419$ ; $k3 = 1,309$ ; $k4 = 0,069$		

Figura 3.16 – Dados de entrada para o dimensionamento do pavimento

Os dados de entrada da base foram retirados de Carvalho (2019) que adicionou PET em um solo argiloso a fim de estudar sua resiliência para avaliar a utilização deste na camada de base de um pavimento. Dentre os vários teores estudados nessa pesquisa, escolheu-se aquela em que foi utilizado 10% de PET micronizado e obteve o melhor resultado de resiliência. A mistura de solo argiloso do Distrito Federal com a adição de 10% de PET micronizado foi submetida ao ensaio de resiliência, resultando nos dados indicados na Figura 3.16. Foram utilizadas constantes recomendadas pelo software, para um solo semelhante a esse.

Para o subleito, foram utilizados os dados de entrada proposto pelo software para um solo siltoso NS', nenhuma modificação foi feita nesses dados.

Também é dado de entrada para o dimensionamento do pavimento, dados sobre o tráfego. Não se alterou o eixo padrão dado pelo programa e considerou-se uma via do sistema arterial primário, com vida útil do projeto de 10 anos. Dessa forma, considerou-se um N de  $5 \times 10^6$ , que corresponde a um baixo tráfego.

O nível de confiabilidade em todas as análises se manteve em 85%.

**4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante a pesquisa. Primeiramente foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais, posteriormente a dosagem e então os corpos de prova moldados foram submetidos aos ensaios mecânicos. As três misturas propostas, sem PET e com 10 e 18% de PET foram submetidas aos ensaios mecânicos. Dessa forma, poder-se-á comparar o que muda de uma mistura com PET para uma mistura sem PET e o que provoca o aumento da quantidade de PET na mistura.

**4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS**

Como já foi exposto, o agregado principal que constitui a mistura do tipo areia asfalto a quente (AAUQ) é a areia. A areia utilizada é uma areia de rio, cuja classificação comercial é areia média. Toda a areia utilizada na confecção das misturas foi passada inicialmente pela peneira nº 4 (# 4,8mm). Também entra como agregado nesta pesquisa, o PET micronizado e a cal. Dessa forma, apresenta-se na Tabela 4.1 a granulometria da areia e do PET e na Figura 4.1 a curva granulométrica desses materiais.

Tabela 4.1 - Granulometria dos agregados

Peneiras		Porcentagem passando (%)	
ASTM	(mm)	Areia	PET
<b>nº 4</b>	4,8	100	100
<b>nº 8</b>	2,36	94	100
<b>nº 16</b>	1,18	92	99
<b>nº 30</b>	0,6	81	97
<b>nº 50</b>	0,3	63	95
<b>nº 100</b>	0,15	24	91
<b>nº 200</b>	0,075	1	11

Ressalta-se que a quantidade de filer da areia é muito pequena, o que influenciou no volume de vazios da mistura sem cal, visto que não teria material suficiente para preenchê-los. Com o intuito de preencher esses vazios e adequar os parâmetros volumétricos dessa mistura, foi necessário a utilização de 10% de cal na mistura AAUQ convencional.

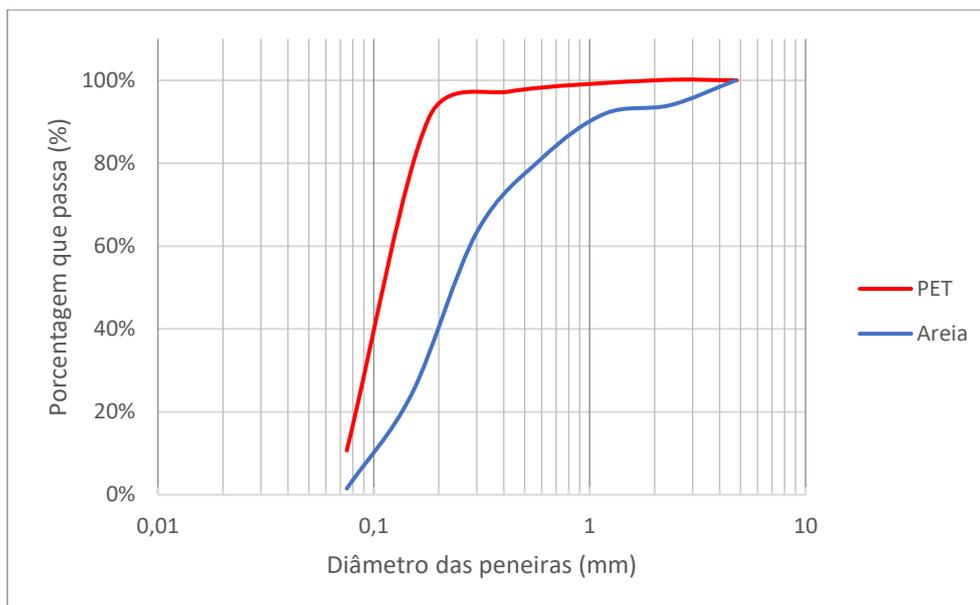


Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia e do PET

Além desse ensaio de caracterização, foram realizados ensaios de equivalente de areia e densidade real da areia, cujos resultados estão indicados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Ensaio de caracterização da areia

<b>Ensaio de caracterização</b>	<b>Resultados</b>	<b>Limites</b>
Equivalente de areia	99%	> 55%
Densidade real da AREIA	2,646	-
Densidade real do PET MICRONIZADO	1,410	-
Densidade real da CAL	2,426	-
Adesividade	Satisfatória	

As misturas estudadas se encaixam na Faixa C cujos limites estão especificados na DERT ES 14/00. Nesta especificação de serviço, assim como em DNIT ES 032/05, as faixas são limitadas pelas peneiras nº 4, 10, 40, 80 e 200, diferentemente das peneiras nas quais foram realizados os ensaios de granulometria do material. Portanto, para verificar se a composição da mistura estava dentro dos limites indicados, segue o gráfico (Figura 4.2). A composição da mistura admite os agregados (areia e PET) sem modificação em sua granulometria.

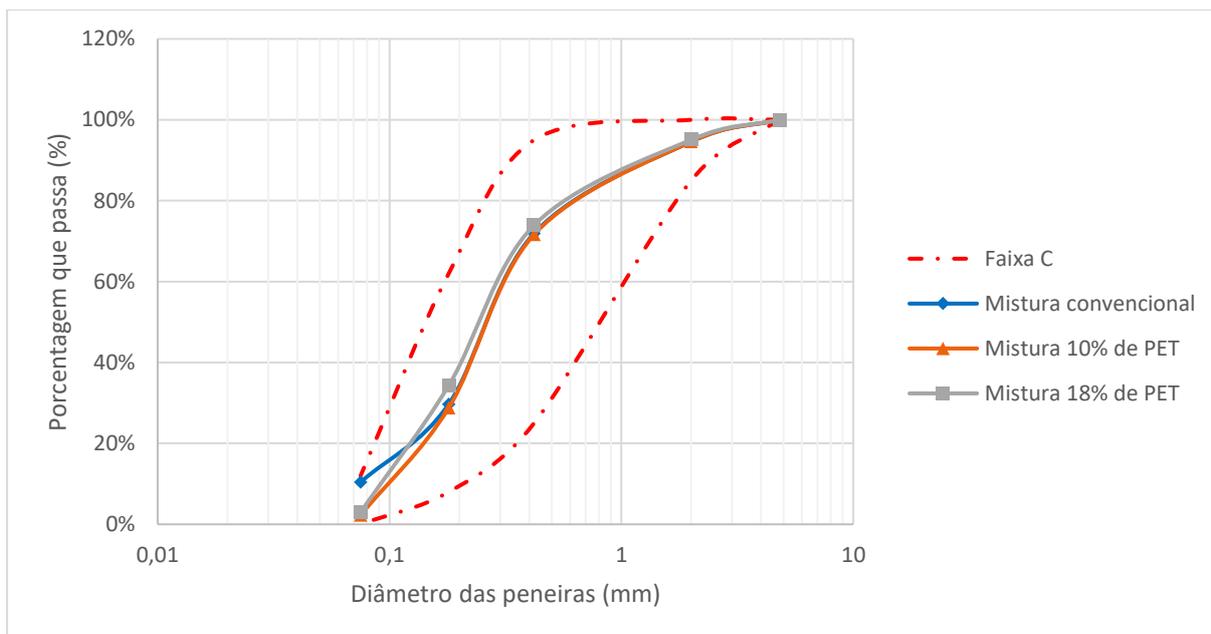


Figura 4.2 - Composição da mistura sem a inserção de PET

Percebe-se que todas as misturas propostas se encaixaram na Faixa C escolhida. A mistura convencional ficou bem próxima ao limite superior no que diz respeito a quantidade de fíler, já que a quantidade de cal necessária foi grande (10%). Mas de forma geral, todas elas estão bem distribuídas aproximadamente na região intermediária dos limites.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados no ligante.

Tabela 4.3 - Resultado dos ensaios realizados para caracterização do ligante

Ensaio de caracterização	Resultados		Limites (ANP, 2005)
Penetração	51		50 a 70
Ponto de amolecimento	47,5 °C		mín 46 °C
Ponto de fulgor	323 °C		mín 235 °C
Densidade	1,000		-
Viscosidade Brookfield	135°C, SP 21, 20 rpm	354 cP	274 cP
	150°C, SP 21, 30 rpm	186 cP	112 cP
	177°C, SP 21, 50 rpm	73 cP	57 a 285 cP

Os resultados encontrados foram semelhantes aos que estavam presentes no relatório da Centro-Oeste Asfaltos e estão coerentes com os limites impostos pela Agência Nacional do Pétroleo (ANP, 2005). Dessa forma, o ligante está apto a ser utilizado nesta pesquisa.

Como foi explicado no item 3.2.3.3 (sobre viscosidade nos procedimentos experimentais), a partir do ensaio de viscosidade Brookfield é possível traçar uma curva viscosidade-temperatura e dela extrair as temperaturas de mistura e de compactação (Figura 4.3).

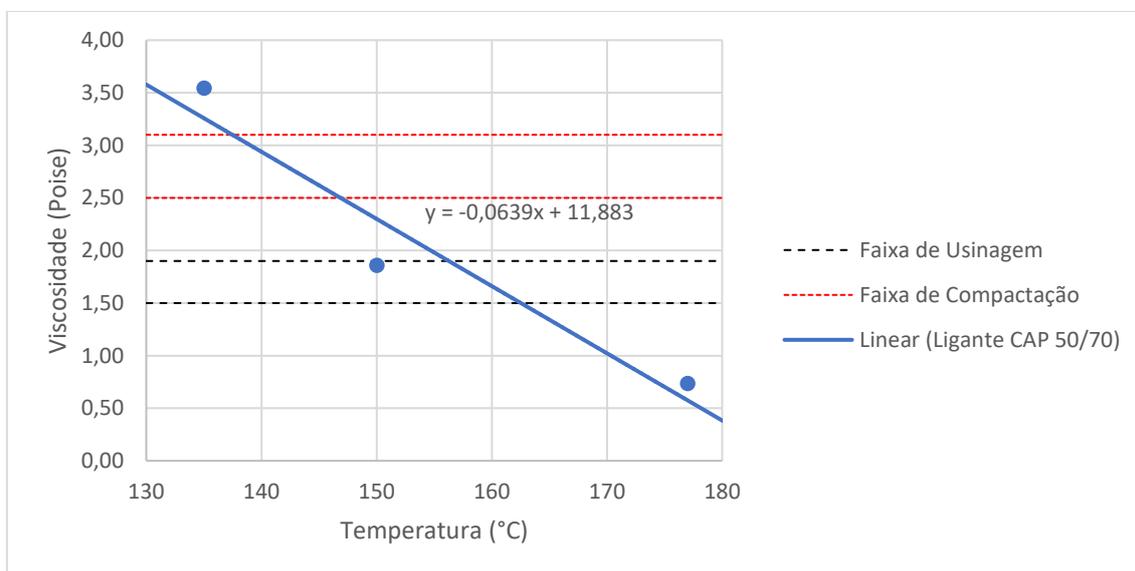


Figura 4.3 - Curva viscosidade-temperatura do ensaio de viscosidade Brookfield

A partir da equação da linha de tendência traçada a partir dos resultados obtidos no ensaio, obteve-se as temperaturas inferiores e superiores de mistura e compactação. (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Leituras do ensaio de viscosidade Brookfield

	<b>Limite inferior</b>	<b>Limite superior</b>	<b>Média</b>
<b>Temperatura de mistura (ligante)</b>	156 °C	162 °C	159 °C
<b>Temperatura de mistura (agregado)</b>	-	-	169 °C
<b>Temperatura de compactação</b>	137 °C	147 °C	141 °C

A temperatura de mistura retirada do gráfico, é a temperatura que o ligante deve atingir para se obter o melhor desempenho de recobrimento dos agregados. A temperatura que o agregado deve ser aquecido para se realizar a usinagem é de 10 a 15°C a mais que a do ligante.

### 4.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE LIGANTE

Com base no traço cedido pelo DER/DF (8% de ligante) e na literatura, onde encontra-se teor ótimo de ligante de até 10% (Lédo & Moizinho, 2019), foi definido que os teores adotados inicialmente para posterior determinação do teor ótimo de ligante são: 8,0%, 8,5%, 9,0%, 9,5% e 10,0% para as misturas M1 e M2 e 7,0%, 7,5%, 8,0%, 8,5% e 9,0% para a mistura M3.

Dessa forma, foram moldados para cada teor três corpos de prova, que passaram pelo ensaio de volumetria e foram encontrados os seguintes parâmetros volumétricos médios: Gmb, DMT, Vv, VCB, VAM, RBV. Os valores encontrados para as três misturas estão apresentados na Tabela 4.5, Tabela 4.6 e Tabela 4.7

Tabela 4.5 - Parâmetros volumétricos da mistura convencional

<b>M1 – Mistura convencional (sem PET)</b>						
<b>Teor de CAP</b>	<b>Gmb</b>	<b>DMT</b>	<b>Vv</b>	<b>VCB</b>	<b>VAM</b>	<b>RBV</b>
<b>8,0%</b>	1,971	2,320	15,0	15,8	30,8	51,2
<b>8,5%</b>	1,987	2,303	13,7	16,9	30,6	55,1
<b>9,0%</b>	2,058	2,287	10,0	18,5	28,5	64,9
<b>9,5%</b>	2,061	2,270	9,2	19,6	28,8	67,9
<b>10,0%</b>	2,096	2,255	7,0	21,0	28,0	74,8

Tabela 4.6 - Parâmetros volumétricos da mistura com 10% de PET

<b>M2 – Mistura com 10% de PET</b>						
<b>Teor de CAP</b>	<b>Gmb</b>	<b>DMT</b>	<b>Vv</b>	<b>VCB</b>	<b>VAM</b>	<b>RBV</b>
<b>8,0%</b>	1,959	2,170	9,7	15,7	25,4	61,7
<b>8,5%</b>	19,73	2,156	8,5	16,8	25,3	66,4
<b>9,0%</b>	2,001	2,141	6,6	18,0	24,6	73,3
<b>9,5%</b>	2,006	2,127	5,7	19,1	24,8	77,0
<b>10,0%</b>	2,026	2,113	4,1	20,3	24,4	83,1

Tabela 4.7 - Parâmetros volumétricos da mistura com 18% de PET

<b>M3 – Mistura com 18% de PET</b>						
<b>Teor de CAP</b>	<b>Gmb</b>	<b>DMT</b>	<b>Vv</b>	<b>VCB</b>	<b>VAM</b>	<b>RBV</b>
<b>7,0%</b>	1,888	2,079	9,2	13,2	22,4	59,0
<b>7,5%</b>	1,911	2,065	7,5	14,3	21,8	65,8
<b>8,0%</b>	1,946	2,052	5,2	15,6	20,7	75,1
<b>8,5%</b>	1,909	2,039	6,4	16,2	22,6	71,8
<b>9,0%</b>	1,959	2,026	3,3	17,6	20,9	84,2

A partir desses resultados, foi possível traçar o gráfico Vv x Teor de CAP x RBV para determinar o teor ótimo de ligante. Os resultados são apresentados na Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6.

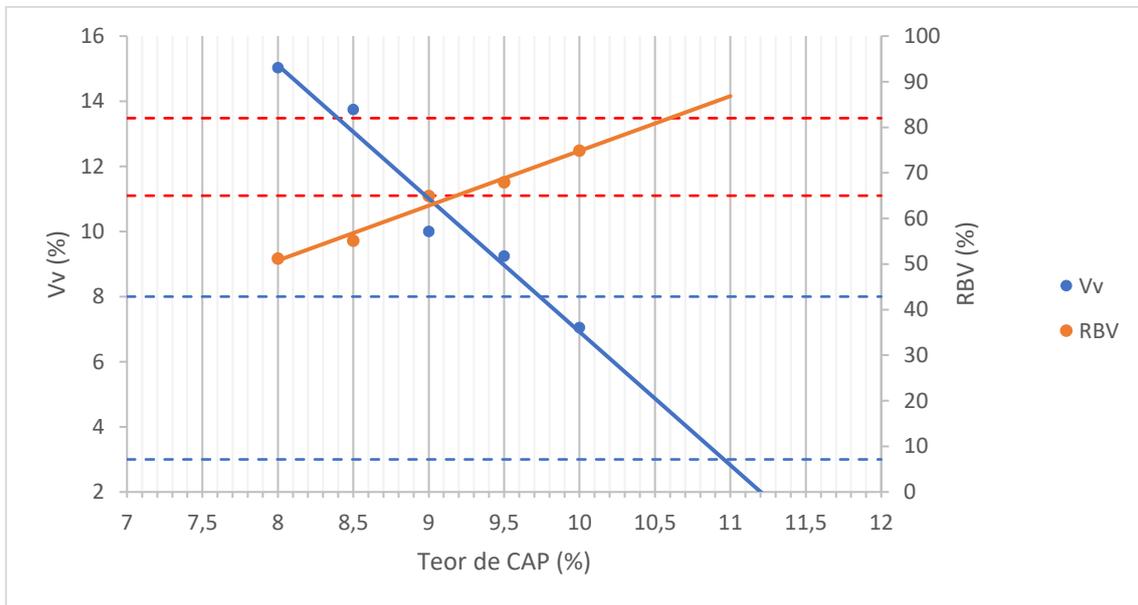


Figura 4.4 - Determinação do teor ótimo de ligante para a mistura convencional

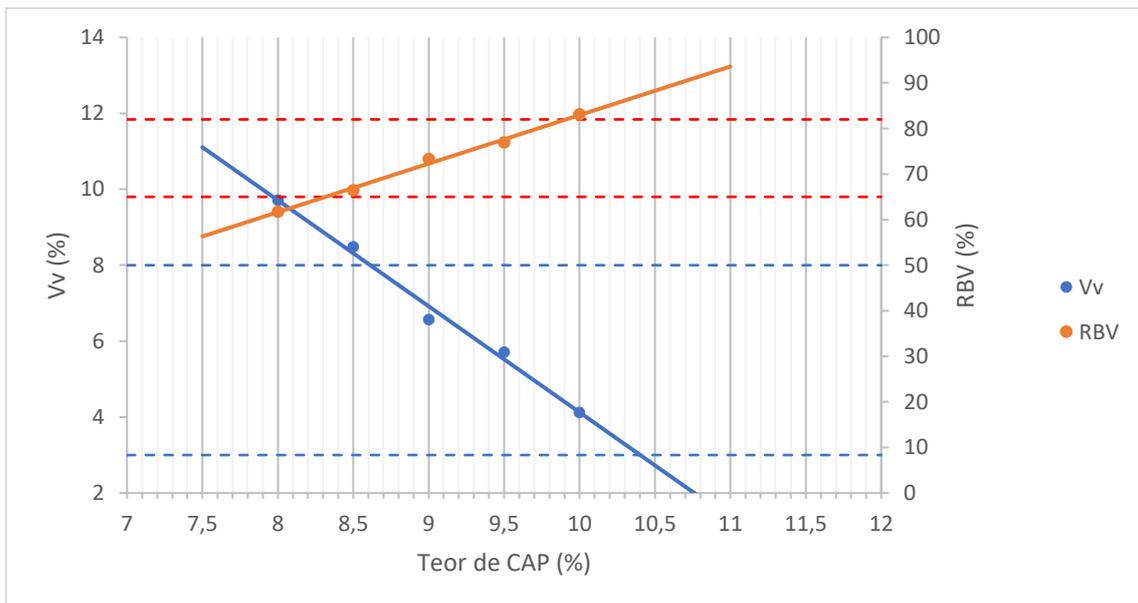


Figura 4.5 - Determinação do teor ótimo de ligante para a mistura com 10% de PET

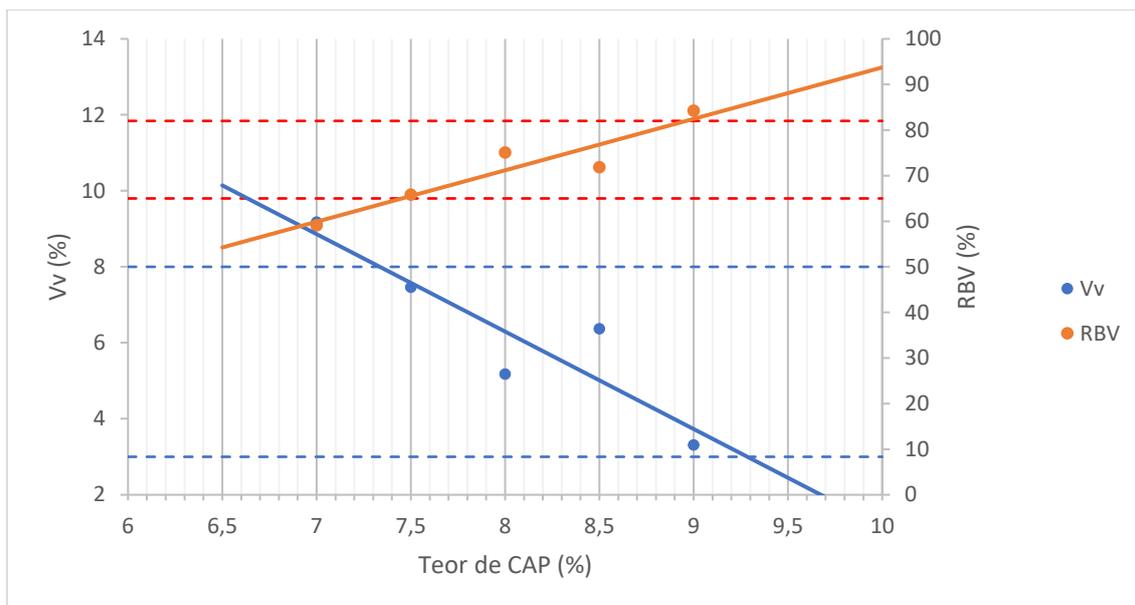


Figura 4.6 - Determinação do teor ótimo de ligante para a mistura com 18% de PET

A Tabela 4.8 mostra os valores X1, X2, X3 e X4 lidos de cada um dos gráficos e o teor ótimo de ligante encontrado.

Tabela 4.8 – Leitura e determinação do teor ótimo de ligante para cada mistura

	M1	M2	M3
<b>X1</b>	9,2	8,4	7,1
<b>X2</b>	9,7	8,6	7,5
<b>X3</b>	10,5	9,9	9,0
<b>X4</b>	10,7	10,4	9,3
<b>TO ligante</b>	10,1	9,3	8,3

Nota-se que as misturas com PET contribuíram na diminuição do teor ótimo de ligante quando comparadas com a mistura convencional. O PET é um material inerte, que apresenta baixíssima absorção, ao contrário do que é encontrado em outros materiais finos, como as cinzas. A possibilidade de se obter misturas asfálticas com menor necessidade de ligante asfáltico além de ser positiva economicamente, mostra resultados mecânicos mais adequados principalmente no que diz respeito à deformação permanente.

Também é possível afirmar que, nas proporções estudadas, quanto mais PET for adicionado a mistura menor será o teor ótimo de ligante. Acredita-se que tal situação ocorra pois o filme de ligante necessário para recobrir as partículas de PET deve ser menos espesso do que aquele necessário para envolver uma partícula de areia. Essa espessura depende de forças de adesão e que está relacionado com a eletroquímica dos materiais.

Os teores ótimos de ligante encontrados estão adequados ao que é recomendado por norma, DNIT ES 032/05, que indica que este estará entre 6 e 12%. E está bem próximo aos encontrados nos trabalhos de Onofre *et al.* (2012), Oliveira *et al.* (2017) e Léo & Moizinho (2019).

#### 4.4 PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS NO TEOR ÓTIMO

Todos os corpos de prova moldados no teor ótimo de ligante de cada mistura passaram por ensaio de volumetria a fim de determinar de forma mais precisa os parâmetros volumétricos.

Dessa forma, apresenta-se na Tabela 4.9 esses resultados.

Tabela 4.9 - Parâmetros volumétricos das misturas no teor ótimo de ligante

Mistura	Teor de CAP	Gmb	DMT	Vv (%)	VCB	VAM	RBV	Limites (DNIT ES 032/05)	
								Vv (%)	RBV
M1	10,1%	2,105	2,251	6,8	21,3	27,8	76,6	3 – 8	65 - 82
M2	9,3%	2,009	2,134	5,9	18,6	24,5	76,0		
M3	8,3%	1,936	2,045	5,4	16,0	21,3	74,8		

Todas as misturas apresentaram resultados de Vv e RBV dentro dos limites da norma. Percebe-se que esses dois parâmetros são menores nas misturas em que foi adicionado PET quando comparadas com a mistura convencional e estes ainda diminuem com o aumento da quantidade de PET. Sabendo que a cal é um material mais fino que o PET micronizado, a tendência é que o primeiro preencha de forma mais efetiva os vazios (já que estão na mesma quantidade), mas os resultados mostraram o contrário. Para justificar essa diferença entre as misturas M1 e M2, supõe-se que o formato das partículas de PET em comparação com as da cal proporciona um melhor preenchimento dos vazios da mistura. Uma análise microscópica poderia confirmar tal situação e estava prevista para ser realizada nesta pesquisa, porém o período de pandemia prejudicou a finalização dos ensaios para análise dos resultados.

A diminuição nos valores da densidade aparente compactada (Gmb) se dá pelo fato da densidade do PET micronizado ser menor que a densidade da areia e da cal, tornando a mistura mais leve.

#### 4.5 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL

Foram ensaiados três corpos de prova de cada mistura, os resultados mostrados na Tabela 4.10 é a média deles.

Tabela 4.10 – Resultados da estabilidade e fluência Marshall

Mistura	Teor de CAP	Estabilidade	Fluência	Limites (DNIT ES 032/05)	
				Estabilidade	Fluência
M1	10,1%	546 kgf	4,8 mm	mínima 300 kgf	2,0 – 4,5 mm
M2	9,3%	627 kgf	5,1 mm		
M3	8,3%	1474 kgf	5,4 mm		

Os resultados de estabilidade foram satisfatórios, ficando acima da mínima recomendada por norma em todas as misturas. A estabilidade também ficou acima do valor mínimo (500 kgf) recomendado para misturas de CA (DNIT ES 031/06) que é capaz de receber alto tráfego.

A Figura 4.7 mostra com os resultados obtidos de estabilidade Marshall.

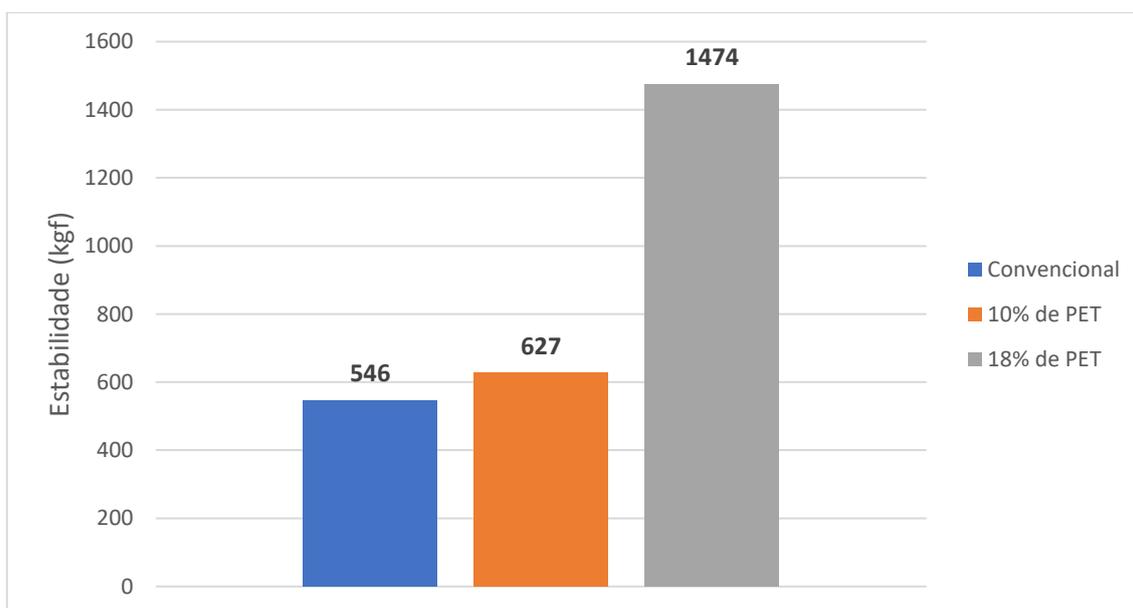


Figura 4.7 - Resultados de estabilidade Marshall

Percebe-se que, tanto a presença de PET quanto o seu aumento implicam em estabilidades melhores em misturas de areia asfalto a quente. Isso pode indicar uma melhora no entrosamento das partículas de PET e de areia, ou ainda que a temperatura atingida nas misturas faça com que as partículas de PET promovam um fenômeno parecido com a cimentação, funcionando como se fosse uma cola, de forma a unir-se mais fortemente entre elas, gerando um aumento da sua estabilidade. O fato de que a presença de PET melhora a estabilidade de diferentes tipos de

misturas em relação as misturas de referência (sem PET) também foi encontrado em Moghaddam *et al.* (2012), Serra *et al.* (2018), Räder (2018) e em Taherkhani & Arshadi (2019). No entanto, não é linear os resultados sobre um aumento da estabilidade com o aumento da quantidade de PET. Em todos estes trabalhos, encontrou-se uma porcentagem ótima de PET, onde, a partir daquela quantidade a estabilidade começa a ter uma leve queda. Portanto, acredita-se que, caso fosse testado quantidades maiores que 18% de PET, em algum momento o valor da estabilidade poderia começar a diminuir.

A Figura 4.8 apresenta os resultados obtidos de fluência Marshall.

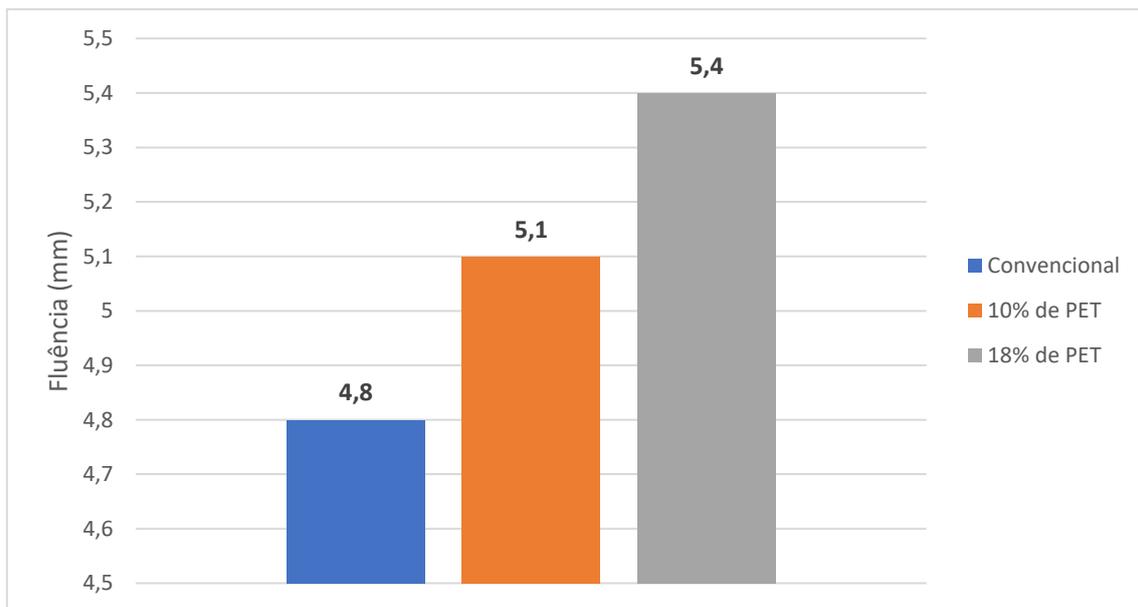


Figura 4.8 - Resultado de fluência Marshall

Os resultados de fluência foram maiores que o limite superior recomendado por norma em todas as misturas, sendo maiores nas misturas com PET. No entanto, ressalta-se que a mistura convencional possui 10% de cal, e este material pode reagir quimicamente na mistura, tornando ela menos suscetível ao efeito de fluência, justificando esse resultado. Resultado semelhante ocorreu em Arao (2016), Taherkhani & Arshadi (2019), Räder (2018) e Bastos *et al.* (2020). O aumento da fluência pode indicar que o pavimento pode sofrer patologias precoces, principalmente no que diz respeito à deformação, mas este não é o melhor parâmetro para medir tal situação, sendo mais confiável a análise do resultado dos demais ensaios mecânicos para tirar conclusões sobre a deformação, como fluência estática, dinâmica ou no simulador de tráfego laboratorial, ensaios que não puderam ser realizados devido ao período de pandemia e fechamento dos laboratórios.

Como indicativo de rigidez, pode-se fazer um cálculo simples sobre a relação da estabilidade e da fluência. Para as misturas convencional, com 10% de PET e com 18% de PET,

esses valores são, respectivamente, 114 kgf, 123 kgf, 273 kgf. Estes valores indicam que a mistura com 18% de PET, dentre as estudadas, será a mistura mais rígida.

#### 4.6 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT)

Foram ensaiados três corpos de prova de cada mistura, os resultados mostrados na Tabela 4.11 é a média deles.

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração

Mistura	Teor de CAP	RT (MPa)
M1	10,1%	0,763
M2	9,3%	0,769
M3	8,3%	0,961

Os coeficientes de variação do RT para as misturas M1, M2 e M3 são, respectivamente, 3,8%, 3,8% e 2,3%. Demonstrando que os resultados foram homogêneos.

Como a norma não traz valores mínimos de resistência a tração, buscou-se referências de pesquisas com areia asfalto a quente para comparação dos resultados. De forma geral, encontrou-se compatibilidade dos valores encontrados na areia com fíler de Léo & Moizinho (2019) e em Onofre *et al.* (2012) e são superiores àqueles encontrados em Dias (2004).

Comparando com a mistura de CA, os valores encontrados também são superiores aos requeridos em DNIT ES 031/06 (mínimo de 0,65 MPa). Tal situação sugere que o pavimento de areia asfalto possa ser usado em rodovias de alto tráfego.

A adição da cal em misturas, comumente aumenta sua resistência. Observa-se que para uma mesma proporção de cal e PET (M1 e M2), a resistência da mistura com PET ainda foi sensivelmente maior. E em maiores quantidades (M3) esse aumento foi significativo.

#### 4.7 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado em 12 corpos de prova de cada mistura. Como foi exposto no item 3.2.5.3, optou-se por seguir as recomendações da norma brasileira, DNIT ME 135/18. Portanto, a carga aplicada foi de 25% do RT encontrado, ou seja, muda em cada mistura, e o resultado adquirido no ensaio foi o valor de deslocamento horizontal, com o

qual, posteriormente, foi calculado o MR. Os resultados são apresentados na Tabela 4.12, Tabela 4.13 e Tabela 4.14.

Tabela 4.12 - Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a mistura M1

<b>M1 – Mistura convencional (sem PET)</b>					
<b>P (N)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>μ</b>	<b>ΔH (mm)</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>MR médio (MPa)</b>
1963	64,42	0,3	17,32	1485	1319
	62,70		17,80	1480	
	63,65		17,53	1476	
	65,16		17,13	1180	
	65,04		17,16	1621	
	65,23		17,11	1428	
	63,70		17,52	1180	
	62,90		17,74	1323	
	63,27		17,64	1278	
	60,25		18,52	1164	
	64,34		17,34	1089	
	62,47		17,86	1129	
Coeficiente de variação				13,2%	

A mistura convencional indica um MR de 1319 MPa. Este valor é menor do que aqueles encontrados em outras pesquisas com areia asfalto. Aldigueri & Bernucci (2002), Dias (2004), Onofre *et al.* (2012) e Oliveira *et al.* (2017) apresentaram resultados acima de 1400 MPa, chegando até a 3000 MPa.

Tabela 4.13 - Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a mistura M2

<b>M2 – Mistura com 10% de PET</b>					
<b>P (N)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>μ</b>	<b>ΔH (mm)</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>MR médio (MPa)</b>
1872	67,60	0,3	15,74	1002	1041
	61,65		17,26	998	
	64,67		16,46	1009	
	66,55		15,99	1007	
	59,20		17,98	1017	
	62,31		17,08	1157	
	65,05		16,36	883	
	63,39		16,79	1135	
	64,18		16,58	994	
	68,60		15,52	1024	
	65,25		16,31	1171	
	67,31		15,81	1097	
Coeficiente de variação				8,0%	

Tabela 4.14 - Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a mistura M3

<b>M3 - Mistura com 18% de PET</b>					
<b>P (N)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>μ</b>	<b>ΔH (mm)</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>MR médio (MPa)</b>
2337	65,60	0,3	20,25	1844	1854
	66,02		20,13	1982	
	65,92		20,16	1920	
	65,85		20,18	2015	
	64,51		20,60	1985	
	65,22		20,37	2003	
	66,37		20,02	1999	
	66,48		19,99	1666	
	66,59		19,95	1833	
	67,54		19,67	1759	
	66,88		19,87	1589	
	67,67		19,63	1647	
Coeficiente de variação				8,4%	

## 4.8 RELAÇÃO MR/RT

Com o valor da resistência a tração (RT) e do módulo de resiliência (MR), Figura 4.9, é possível calcular a relação MR/RT, mostrada na Tabela 4.15.

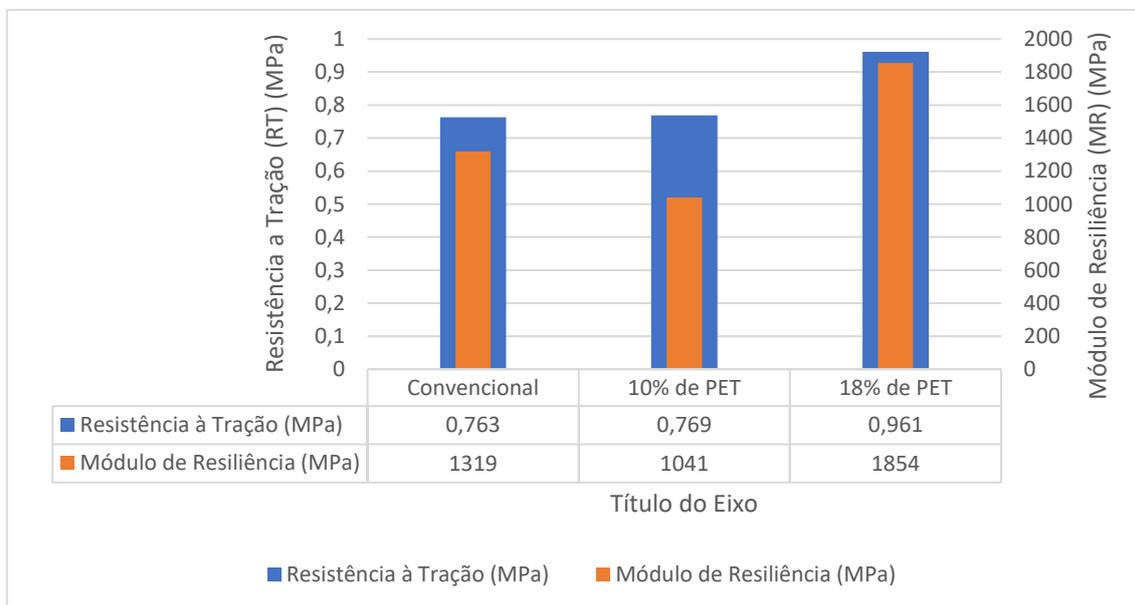


Figura 4.9 – Resultados de RT e MR plotados

Tabela 4.15 – Relação MR/RT

Mistura	MR/RT
<b>M1</b>	1730
<b>M2</b>	1354
<b>M3</b>	1929

Essa relação é um indicativo de como a mistura irá se comportar quanto à vida de fadiga, porque reúne informações sobre a resiliência e a resistência deste material. É desejável uma menor magnitude dessa razão, pois estruturalmente, é necessário que o revestimento tenha baixa rigidez para que não ocorra elevada absorção de tensões levando ao trincamento prematuro desta camada. No entanto, Vasconcelos (2004) salienta que a relação MR/RT não deve eliminar a necessidade do estudo da vida de fadiga, uma vez que o ensaio de fadiga considera diferentes níveis de tensões.

Os resultados desta pesquisa mostram que entre as misturas com PET, o valor mais alto (de M3) se aproxima do valor encontrado para mistura convencional (M1). E todos eles são baixos, já que em Dias (2004) esses valores se aproximam de 3000.

#### 4.9 FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA

Com o cuidado de escolher níveis de tensões que estivessem entre os limites da norma (entre 5 e 40% do RT), foram escolhidas as tensões as quais as misturas seriam submetidas a fim de traçar os gráficos do ensaio ( $N \times \Delta\sigma$  e  $N \times \epsilon_r$ ).

Para cada conjunto de ensaios, foi traçado uma linha de tendência potencial cujas equações estão mostradas nos gráficos. O  $R^2$  é o coeficiente de determinação que corresponde a qualidade do ajuste em relação aos pontos. Quanto mais próximo de 1, menor é a dispersão dos pontos. A norma do ensaio pede que este valor seja superior a 0,8 para garantir a confiabilidade do ensaio.

Para fins de comparação, a Figura 4.10 mostra as curvas de vida de fadiga de todas as misturas no gráfico Número de aplicações vs Diferença de tensões.

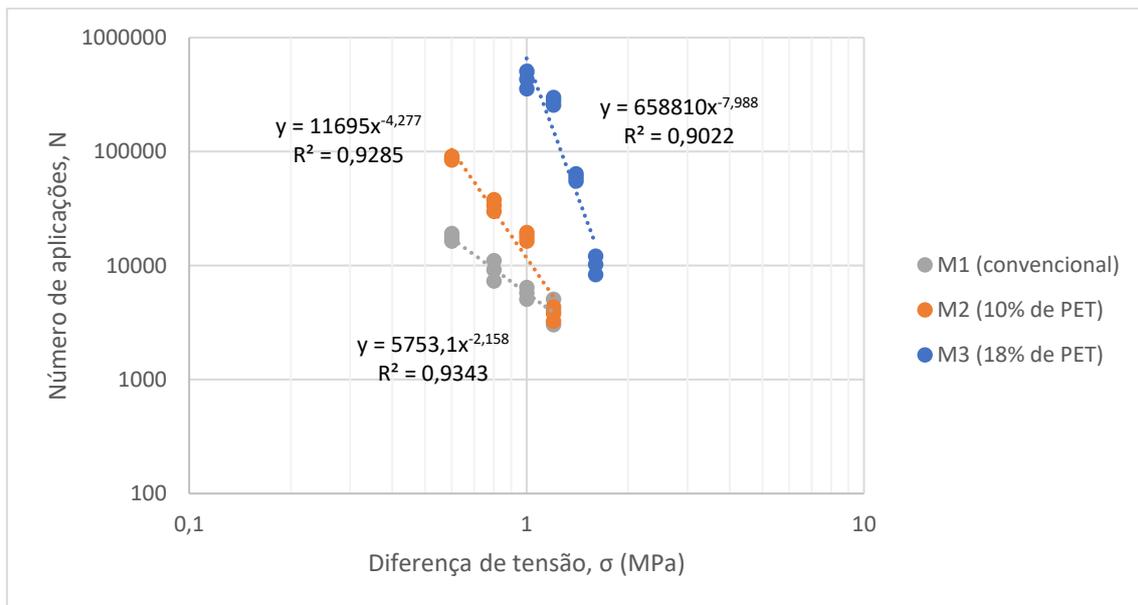


Figura 4.10 - Gráfico com as curvas de vida de fadiga ( $N$  vs  $\Delta\sigma$ ) de todas as misturas

A partir deste gráfico, observa-se uma melhor resposta da mistura com 18% de PET visto que ela está colocada numa posição superior às outras misturas (convencional e com 10% de PET), indicando que para uma mesma tensão, ela suporta um maior número de aplicações. Pode-se também, a partir dos resultados desse ensaio e do ensaio de módulo de resiliência calcular a deformação específica resiliente. A Figura 4.11 apresenta o gráfico Número de Aplicações vs Deformação Específica Resiliente.

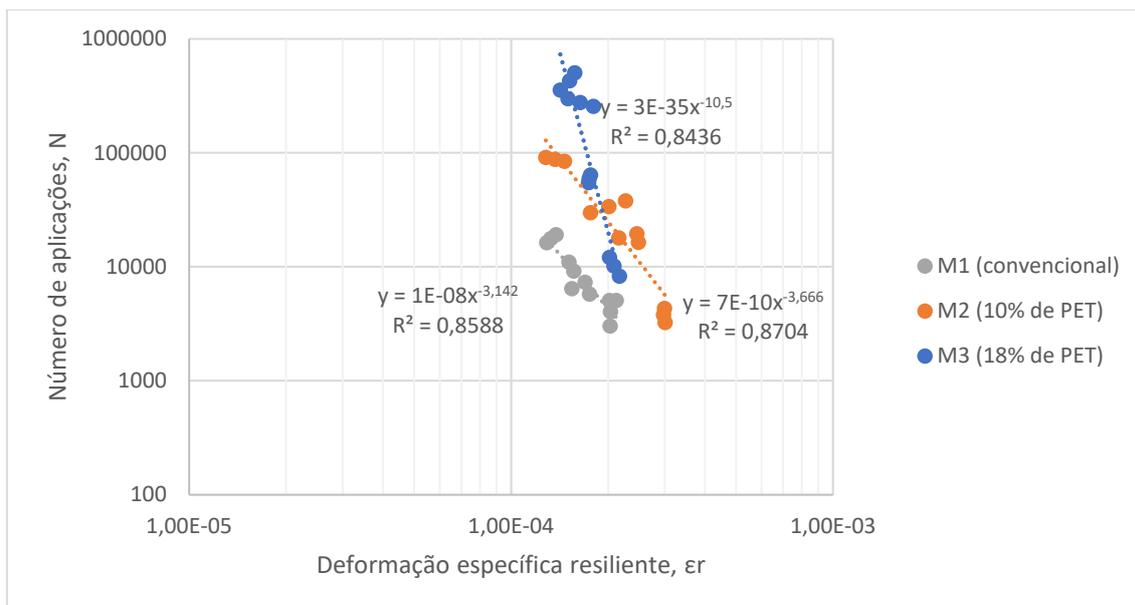


Figura 4.11 - Gráfico com as curvas de vida de fadiga (N vs  $\epsilon_r$ ) de todas as misturas

Um bom desempenho por fadiga pode garantir que as camadas subsequentes tenham uma menor espessura, tornando o revestimento asfáltico econômico. Dessa forma, há ganhos múltiplos quando se pensa em um bom pavimento com adição de garrafas PET micronizadas, visto que a retirada desse resíduo do meio ambiente promove, também, um ganho ambiental.

Os gráficos de vida a fadiga mostram que as misturas com PET retardam o início da fadiga quando comparados à mistura convencional. De forma que, quanto mais PET, maior o número de aplicações necessárias para iniciar o processo de trincamentos. A mistura convencional e a mistura M1 apresentam basicamente a mesma taxa de evolução em relação aos danos materiais, já que possuem curvas praticamente paralelas, (Figura 4.11), com a mistura com PET tendo melhor comportamento.

No entanto, a Figura 4.11 mostra que a mistura M3, com 18% de PET, teve uma resposta negativa à vida de fadiga, pois apresenta uma queda brusca dessa propriedade observada pela deformação específica resiliente. Isso pode ser explicado devido ao elevado valor de MR encontrado para essa mistura. De forma que, como o MR e o RT não crescem na mesma proporção, isto é, comparado a mistura convencional, o RT teve um crescimento de 25,9% e o MR teve um crescimento de 40,6%, a mistura asfáltica com 18% de PET tende a ser uma mistura mais susceptível em termos de resistência à fadiga.

#### 4.10 ABRASÃO CÂNTABRO

Para cada mistura foram ensaiados três corpos de prova, sendo o desgaste a média dos três valores. Os resultados são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Resultados do ensaio de desgaste por abrasão cântabro

Mistura	Perda de massa por abrasão cântabro
M1	1,3%
M2	2,0%
M3	2,3%

Em todas as misturas os desgastes foram mínimos, como já eram mostrados nas referências de mistura de areia asfalto, em Aldigueri & Bernucci (2002) e Léo & Moizinho (2019) o desgaste não passou de 6%.

Comparativamente, os resultados mostram que o aumento do PET faz aumentar discretamente o desgaste. Tal resultado indica que a presença do PET produz misturas asfálticas um pouco mais susceptível à degradação. Isso se deve ao fato de que misturas com maiores quantidades de finos ficam mais dispostas a perder esses finos durante o desgaste devido à maior superfície de contato da mistura.

#### 4.11 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

Seguindo os dados de entrada apresentadas no item 3.3, avaliou-se e dimensionou-se as camadas do pavimento com os dados da Figura 4.12.



<b>REVESTIMENTO</b>	Convencional $\nu = 0,30$ Módulo resiliente linear MR = 1319 MPa Fadiga: $k_1 = 1,0 \times 10^{-8}$ ; $k_2 = -3,142$	10% de PET $\nu = 0,30$ Módulo resiliente linear MR = 1041 MPa Fadiga: $k_1 = 7,0 \times 10^{-10}$ $k_2 = -3,666$	18% de PET $\nu = 0,30$ Módulo resiliente linear MR = 1854 MPa Fadiga: $k_1 = 3,0 \times 10^{-35}$ $k_2 = -10,5$
<b>BASE</b>	$\nu = 0,35$ Módulo resiliente não linear MR, $k_1 = 385,44$ ; $k_2 = 0,228$ ; $k_3 = 0,031$ Deformação permanente não linear $k_1 = 0,088$ ; $k_2 = -0,146$ ; $k_3 = 1,618$ ; $k_4 = 0,062$		
<b>SUBLEITO</b>	$\nu = 0,45$ Módulo resiliente linear MR = 189 MPa Deformação permanente não linear $k_1 = 0,244$ ; $k_2 = 0,419$ ; $k_3 = 1,309$ ; $k_4 = 0,069$		

Figura 4.12 - Dados de entrada para o dimensionamento do pavimento

Nesta etapa, algumas considerações são feitas pelo próprio software, como: a espessura da camada de revestimento tem entre 5,0 e 15,0 cm, a espessura da camada de base tem entre 15,0 e 40,0 cm, a área trincada no final do período deve ser de no máximo 30% e o afundamento da trilha de roda não pode ultrapassar 13 mm, para vias arteriais primárias.

Seguindo esses requisitos, tem-se os resultados indicados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Resultado do dimensionamento para 10 anos de vida útil de projeto

<b>Tipo de revestimento</b>	<b>Espessura do revestimento</b>	<b>Espessura da base</b>	<b>Área trincada no fim da vida útil</b>	<b>Afundamento da trilha de roda</b>
<b>Convencional</b>	5,0 cm	15,0 cm	22,5%	5,3 mm
<b>10% de PET</b>	5,0 cm	15,0 cm	15,2 %	5,3 mm
<b>18% de PET</b>	14,5 cm	40,0 cm	29,6 %	2,4 mm

De acordo com os resultados apresentados, as misturas: convencional e com 10% de PET puderam admitir as espessuras mínimas para o revestimento e para a base sem atingir os limites máximos de área trincada e afundamento de trilha de roda. Sendo que a mistura com 10% de PET apresenta, nas mesmas espessuras que a mistura convencional e admitindo uma vida útil de 10 anos, uma porcentagem de área trincada de 15,2% contra 22,5% da convencional. A mistura com 18% de PET apresenta espessuras maiores, próxima aos limites superiores, mas ainda indica uma área trincada menor que 30% e afundamento menor do que nas outras misturas.

Caso seja fixado nos limites inferiores as espessuras das camadas, pode-se prever a vida útil de projeto usando como critério os 30% de área trincada que é admissível neste dimensionamento. Assim, teríamos as vidas úteis para cada mistura como apresentado na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Resultado do dimensionamento para as camadas com as espessuras mínimas

<b>Tipo de revestimento</b>	<b>Espessura do revestimento</b>	<b>Espessura da base</b>	<b>Vida útil</b>
<b>Convencional</b>	5,0 cm	15,0 cm	12 anos
<b>10% de PET</b>			16 anos
<b>18% de PET</b>			> 1 ano

Ou seja, fixando o revestimento em 5,0 cm e a base em 15,0 cm, o pavimento com a menor porcentagem de PET micronizado teria vida útil de 16 anos, enquanto a mistura que não possui PET seria de 12 anos. Ou seja, um aumento de 33,3% na vida útil.

Vale lembrar que o software MeDiNa não utilizou nenhuma pista experimental de AAUQ para desenvolver seu dimensionamento, não sendo, portanto, validado sua utilização para esse tipo de mistura e nem para misturas de AAUQ-PET micronizado. Portanto, não se deve, a partir desses resultados, definir uma melhor mistura dentre as estudadas, visto que na prática, o comportamento pode ser diferente do que é indicado pelo programa.

### 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 5.1 CONCLUSÕES

A fim de avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo areia asfalto usinada a quente (AAUQ) quando nelas é inserido um polímero plástico conhecido como PET em sua forma micronizada, esta pesquisa foi realizada.

A proposta foi estudar a influência do PET quando colocada em substituição ao agregado da mistura convencional e como seria o comportamento da mistura com maior quantidade de PET. Para isso, foram feitas três misturas: M1, mistura convencional, com 10% de cal; M2, mistura com 10% de PET; e M3, mistura com 18% de PET.

As três misturas passaram por todos os ensaios mecânicos propostos: estabilidade e fluência Marshall, resistência a tração por compressão diametral, módulo de resiliência, ensaio de vida à fadiga, desgaste cântabro. Além do dimensionamento de um pavimento com os resultados encontrados no laboratório através do software MeDiNa.

Assim, baseado nos resultados já apresentados e analisados, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- De forma geral, a utilização de PET na mistura asfáltica do AAUQ foi satisfatória, melhorando o seu comportamento mecânico. Porém, isso não aconteceu de forma uniforme e para todos os parâmetros analisados;
- As mudanças devido à inserção de PET são observadas inicialmente nos teores ótimos de ligante encontrados para cada mistura. A presença de PET diminui a quantidade de ligante necessária para se conseguir o recobrimento ideal das partículas. Isso porque, provavelmente, a absorção do PET é menor que a da areia;
- Observa-se mudanças nos parâmetros volumétricos, o volume de vazios ( $V_v$ ) diminui com a inserção de PET, bem como a massa específica aparente da mistura ( $G_{mb}$ ) e a relação betume-vazios (RBV). Tais resultados podem indicar que o formato das partículas de PET promove um melhor encaixe das partículas, diminuindo o  $V_v$  e o RBV. E pelo fato do PET ser mais leve do que a areia ou a cal, ou seja, sua densidade é menor e uma maior quantidade de PET utilizada proporciona um menor  $G_{mb}$ ;
- Quanto à estabilidade e fluência Marshall, a presença de PET na mistura indica uma melhora na estabilidade e uma piora na fluência. O que significa que as partículas de areia com

PET possuem um bom entrosamento e pode ser que ao atingir temperaturas mais altas, as partículas de PET se cristalizem, tornando as ligações entre os grãos mais fortes;

- A presença de PET também aumentou a resistência à tração (RT) e o módulo de resiliência (MR) das misturas, no entanto, não foi na mesma proporção. A relação MR/RT, considerado um indicador de vida a fadiga, indica que a mistura M2 terá o melhor desempenho quanto ao trincamento prematuro, pois é o valor mais baixo. Quanto menor é o valor dessa relação maiores são as chances de a mistura ter um bom desempenho de fadiga.;
- O ensaio de fadiga apontou resultados semelhantes para mistura M1 e M2 no que diz respeito à taxa de deterioração do pavimento no tempo. Mas a mistura M2 tem um resultado melhor, pois aceita um número de repetições de carga maior que a M1 para uma mesma deformação. A mistura M3, estando superior as outras duas, apresenta o melhor resultado quanto a esse parâmetro.
- O ensaio de desgaste cântabro mostrou que a presença de PET altera de forma quase insignificante o desgaste da mistura. Isso ocorre devido a maior presença de finos na mistura, o que a deixa vulnerável ao desgaste.
- O dimensionamento pelo software MeDiNa, apesar de não ser validado para a mistura de AAUQ mostra, em valores projetados, como seria o comportamento estrutural de um pavimento quando utilizadas nas camadas do pavimento as misturas estudadas. Com o objetivo de variar as espessuras das camadas a fim de obter pelo menos 10 anos de vida útil, as misturas M1 e M2 puderam ser dimensionadas com as dimensões mínimas admitidas, enquanto a M3 teve que se aproximar dos tamanhos máximos, o que tornaria a obra onerosa. Pensando em variar a vida útil do pavimento e fixando as espessuras das camadas, nota-se que os pavimentos com as misturas M1 e M2 seriam adequadas por um período de mais de 10 anos, 12 e 16 anos, respectivamente.

Em vista de todos os resultados obtidos e analisados, compreende-se que a utilização de PET em misturas asfálticas do tipo AAUQ promove, além de ganhos ambientais, econômicos e sociais, ganhos no seu desempenho mecânico. Deve-se salientar que a quantidade de PET a ser adicionada não deve ser indiscriminada, pois quantidades muito altas podem prejudicar o pavimento em relação aos trincamentos prematuros.

Nesta pesquisa, onde foram testados dois teores de PET, 10 e 18%, pode-se afirmar que quanto mais PET, melhores são os resultados sobre o comportamento mecânico dessa mistura.

Caso sejam executadas pistas com essas porcentagens de utilização de PET, observa-se que a cada quilômetro de rodovia com duas faixas de rolamento de 6 metros cada, com

revestimento de 5,0 cm e considerando que cada garrafa de PET tem 57 gramas, seriam retirados da natureza mais de 2 milhões de garrafas PET para um revestimento com 10% de PET e quase 4 milhões de garrafas PET para um revestimento com 18% de PET.

Com relação à aplicabilidade do PET, um material alternativo e um resíduo abundante, entende-se que é viável e recomendada a sua utilização em obras de pavimentação para baixo volume de tráfego, de forma inovadora, a fim de atender a uma preocupação global e ambiental, que é a disposição de materiais plásticos pós consumo, dando a ele uma destinação nobre e reduzindo o consumo de recursos naturais.

## **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Alguns pontos podem ainda ser estudados nesta mesma linha de pesquisa:

- Estudar as diferenças nos parâmetros volumétricos que a compactação *Superpave* pode ocasionar em misturas do tipo AAUQ e conseqüentemente nos resultados mecânicos da mistura;
- Analisar o comportamento de AAUQ com outras areias;
- Analisar o comportamento de AAUQ com outros teores de PET e utilizando outros formatos de PET, por exemplo flakes e fibras;
- Realizar ensaios para medir a real deformação permanente dessa mistura, bem como ensaios em simulador de tráfego laboratorial;
- Estudar o comportamento dessa mistura considerando a Matriz de Agregados Finos (MAF's);
- Executar o dimensionamento em outros softwares;
- Construção de trecho experimental para avaliação das misturas em campo.
- Análise microscópica da mistura para avaliar a microestrutura gerada com a adição de PET e conseqüente preenchimento de vazios da mistura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPET (2012). Resina PET – Fabricação. Associação Brasileira da Indústria do PET, São Paulo, SP. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/i>>. Acesso em: 06 de set de 2019.
- ABIPET (2016). 10º Censo de Reciclagem do PET no Brasil. Associação Brasileira da Indústria do PET, São Paulo, SP. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/indexAjax.html?method=baixarArquivo&id=548>>. Acesso em: 09 de set de 2019.
- ABIPLAST (2019). Perfil 2019 - Indústria Brasileira de Transformação e Reciclagem de Material Plástico. Associação Brasileira da Indústria do Plástico, São Paulo, SP. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2019/>>. Acesso em: 28 fev. 2020.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) NBR 9935: Agregados: terminologia.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) NBR 15140: Misturas asfálticas – Determinação da perda de massa por abrasão cântabro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015) NBR 11341: Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.
- ALDIGUERI, D. R., & BERNUCCI, L. B. (2002). Desempenho de Misturas de Areia Asfalto Usinadas a Quente com o Uso de Ligantes Mais Consistentes. *Revista Transportes*, 10(2).
- ANP (2005). Resolução ANP nº 19/2005 - Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP), comercializados pelos diversos agentes econômicos em todo o território nacional.
- ARAO, M. (2016). Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a Inserção de Polietileno Tereftalato (PET) Triturado. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 114 p.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (1995) D 4123 – *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2000) D 2726 – *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures*.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2002) D 4402 – *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*.
- BASTOS, C. R. S., CALLEJAS, I. J. A., CORDEIRO, C. C. M., & DURANTE, L. C. (2020). Desempenho Mecânico e Térmico de Misturas Asfálticas do Tipo CBUQ com Substituição Parcial do Agregado Miúdo por Resíduos de Polietileno Tereftalato (PET). *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, 8(58).

- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. & SOARES, J. B. (2010). Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Petrobras: ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, 509 p. 3ª Reimpressão.
- CARVALHO, B. V. (2019). Avaliação do Comportamento Resiliente de solo Argiloso com Inserção de Politereftalato de Etileno (PET) para Aplicação em Base de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 144 p.
- CASAGRANDE, M. D. T. (2005) Comportamento de Solos Reforçados com Fibras Submetidas a Grandes Deformações. Tese de Doutorado, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre, RS, 219 p.
- CHAVES, F. J. (2010). Estudo de Misturas de Areia Asfalto a Frio em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego no Estado do Ceará – Contribuição ao Método de Dosagem. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 378 p.
- CHRUSCIAK, M. R. (2013) Análise da Melhoria de Solos Utilizando Fragmentos de Borracha. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, DF, 91 p.
- CNT – Confederação Nacional de Transportes. (2019) Principais dados. Disponível em: <[https://cms\\_pesquisarodovias.cnt.org.br//PDFs/Resumo\\_Principais\\_Dados\\_Pesquisa\\_CN\\_T\\_2019\\_FINAL.pdf](https://cms_pesquisarodovias.cnt.org.br//PDFs/Resumo_Principais_Dados_Pesquisa_CN_T_2019_FINAL.pdf)>. Acesso em: 16 de nov. de 2019.
- COUTINHO, J. C. P. (2011). Dimensionamento de Pavimento Asfáltico: Comparação do Método do DNER com um Método Mecânico - Empírico Aplicada a um Trecho. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 184 p.
- DALHAT, M. A., AL-ABDUL WAHHAB, H. I., & AL-ADHAM, K. (2019). Recycled Plastic Waste Asphalt Concrete via Mineral Aggregate Substitution and Binder Modification. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(8), 04019134.
- DERT - Departamento de Edificações Rodovias e Transportes do Estado do Ceará (2000) 14-ES – Areia Asfalto a Quente.
- DIAS, C. R. C. (2004). Estudo de Misturas de Areia-Asfalto e Cinza-Cal para Emprego em Pavimentos Urbanos. Dissertação de Mestrado, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre, RS, 127 p.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995) 043-ME: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996) 193-ME: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997) 054-ME – Equivalente de areia.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2005) 032-ES – Pavimentos flexíveis – Areia-Asfalto a quente.

- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2019) 412-ME – Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010) 155-ME – Material asfáltico – Determinação da penetração.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010) 131-ME – Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) 178-PRO – Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) 136-ME – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) 135-ME – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) 183-ME – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006) 031-ES – Concreto asfáltico.
- DNIT (2018). Relatório de Gestão do DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasil. 246 p.
- FERREIRA, F. D. A. (2013). Análise do Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos Utilizando o Programa SisPavBR. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 110 p.
- FRANCO, F. A. C. P. (2007) Método de Dimensionamento Mecânico - Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 294 p.
- GIRALDI, A. L. (2008). Compósitos Híbridos de Poli (Tereftalato de Etileno) (PET) / Fibra de Vidro (FV) / Modificador de Impacto (E-MA-GMA). Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, SP, 109 p.
- GUERRA, A. S., ROCHA, E. R. D., & OKABAYASHI, J. Y. (2017). Estudo de Viabilidade Técnica para a Reutilização de Polietileno Tereftalato (PET) Residual em Substituição ao Agregado Miúdo no Concreto. Revista MIX Sustentável, 3(3): 35-40.
- JIMÉNEZ, F. E. P. (2014). Manual de Pavimentação. CEPESA, Barcelona, ES, 179 p. 3ª Edição.
- KNABBEN, R. M. & CARPIO, J. A. V. (2019). Como usar o software Medina. Método Medina, E-book, 42 p.

- LÉDO, B. C.; MOIZINHO, J. C. (2019). Mistura Asfáltica Tipo AAUQ com Uso de Pó de Pedra Basáltica Como Fíler. Simpósio de Engenharia, Gestão e Inovação, Águas de Lindóia, SP. 15 p.
- LOUZADA, N. S. L. (2015) Experimental Study of Soils Reinforcement with Crushed Polyethylene Terephthalate (PET) Residue. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ.
- MELO, J. W. (2004). Produção e Caracterização de Pó De PET – Poli (Tereftalato de Etileno) obtido a partir de Garrafas Pós-Consumo. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 110 p.
- MOGHADDAM, T. B., KARIM, M. R., & SYAMMAUN, T. (2012). Dynamic Properties of Stone Mastic Asphalt Mixtures Containing Waste Plastic Bottles. *Construction and Building Materials*, 34: 236-242.
- OGUNDIPE, O. M. (2019). The Use of Polyethylene Terephthalate Waste for Modifying Asphalt Concrete Using the Marshall Test. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 27(2): 9-15.
- OLIVEIRA, L. S., SOARES, J. B. & SANT'ANA, W. C. (2017). Análise de Misturas de AAUQ com o Equivalente de Areia Fora dos Requisitos de Norma. 20ª RPU – Reunião de Pavimentação Urbana, Florianópolis, SC, 13 p.
- OLIVEIRA, M.; GOMES, F. (2013). Polímeros: O que são, Suas Aplicações e as Áreas de Formações Técnicas e Acadêmicas. VII Semana de Polímeros, UFRJ, RJ, 42 slides. Disponível em: <<http://ima.ufrj.br/images/documents/documentos/semana-de-polimeros/30-10.15-Pol%C3%ADmeros-o-que-s%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2020.
- ONOFRE, F. C., LOPES, M. M., ARAUJO JUNIOR, P. C., VALE, A. C., OLIVEIRA FILHO, C. M. S., & SOARES, J. B. (2008). Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas do tipo SMA, Concreto Asfáltico e Areia-Asfalto. Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), vol. 22, Fortaleza, CE, 12 p.
- PELISSER, F. (2002). Avaliação do Desempenho de Concreto Reforçado com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET). Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, 112 p.
- RÄDER, A. R. D. S. (2018). Estudo da Adição de Resíduos de Garrafas PET Pós Consumo em Misturas Asfálticas à Quente. Trabalho de Conclusão de Curso, UNIJÚI, Ijuí, RS, 99 p.
- SANTOS, J. R. D. & SILVA, T. J. L. D. (2015). Análise da Viabilidade de Utilização de Solo Tropical com a Adição de Fibras PET em Sistemas de Cobertura de Aterros Sanitários. Trabalho de Conclusão de Curso, UnB, Brasília, DF, 76 p.
- SENÇO, W. (2007). Manual de Técnicas de Pavimentação. Pini, São Paulo, SP, 1 vol., 761 p. 2ª Edição.
- SENEZ, P. C. (2016). Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET). Dissertação de Mestrado. PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 124 p.

- SERRA, G. A., GUIMARÃES, A. C. R., SILVEIRA, V. L., DOS SANTOS BARROS, A. M., & DA CRUZ REIS, A. C. (2018) Estudo Da Adição De Resíduos De Polietileno Tereftalato (PET) Como Agregado Alternativo Para Misturas Asfálticas. 32º Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Gramado, RS: 1668 – 1678.
- SILVA, J. D. A. A., RODRIGUES, J. K. G., LUCENA, L. C., LUCENA, A. E., & PATRICIO, J. D. (2013). 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.
- SULYMAN, M.; HAPONIUK, J.; FORMELA, K. (2016) Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(2): 100-108.
- TAHERKHANI, H., & ARSHADI, M. R. (2019). Investigating the Mechanical Properties of Asphalt Concrete Containing Waste Polyethylene Terephthalate. *Road Materials and Pavement Design*, 20(2): 381-398.
- VASCONCELOS, K. L. (2004). Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado), UFC, Fortaleza, CE, 132 p.
- WIT, W., HAMILTON, A., SCHEER, R., STAKES, T., & ALLAN, S. (2019). Solucionar a Poluição Plástica: Transparência E Responsabilização. Suíssa: WWF–Fundo Mundial para a Natureza.
- RIBEIRO, P. M. (2019). Comportamento Mecânico de uma Bentonita Reforçada com Borracha de Pneu e PET Triturado. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 109 p.