

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

**SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADO MINERAL FINO POR  
POLIETILENO TEREFALATO (PET) RECICLADO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURA  
ASFÁLTICA DENSA**

**JOSÉ WILSON DOS SANTOS FERREIRA**

**ORIENTADORA: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**BRASÍLIA / DF: ABRIL / 2022**

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

**SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADO MINERAL FINO POR  
POLIETILENO TEREFTALATO (PET) RECICLADO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURA ASFÁLTICA  
DENSA**

**JOSÉ WILSON DOS SANTOS FERREIRA**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

**APROVADA POR:**

---

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc.**  
**(Universidade de Brasília)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD**  
**(Universidade de Brasília)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**KAMILLA VASCONCELOS SAVASINI, PhD**  
**(Universidade de São Paulo)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

---

**SANDRA ODA, DSc.**  
**(Universidade Federal do Rio de Janeiro)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, 07 de ABRIL de 2022**

## FICHA CATALOGRÁFICA

FERREIRA, JOSÉ WILSON DOS SANTOS

Substituição de Agregado Mineral Fino por Polietileno Tereftalato (PET) Reciclado no Comportamento Mecânico de Mistura Asfáltica Densa (Distrito Federal) 2022.

xviii, - 89 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2022)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                                |                            |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1. Novos Materiais Geotécnicos | 2. Plástico reciclado      |
| 3. Misturas asfálticas         | 4. Polietileno tereftalato |
| I. ENC/FT/UnB                  | II. Título (série)         |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA, J. W. S. (2022). Substituição de Agregado Mineral Fino por Polietileno Tereftalato (PET) Reciclado no Comportamento Mecânico de Mistura Asfáltica Densa. Tese de Doutorado, Publicação G.DM – 346/2022. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: José Wilson dos Santos Ferreira

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Substituição de Agregado Mineral Fino por Polietileno Tereftalato (PET) Reciclado no Comportamento Mecânico de Mistura Asfáltica Densa.

GRAU / ANO: Doutor /2022.

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

---

José Wilson dos Santos Ferreira

Universidade de Brasília, Secretaria de Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia  
Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Prédio SG-12,  
Universidade de Brasília. CEP: 70910-900 – Brasília, DF – Brasil  
wilson\_s.ferreira@hotmail.com

***O que tem que ser tem muita força, tem uma força enorme!***

(João Guimarães Rosa)

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço aos meus pais*, Silvana e Wilson José, por acreditarem nos meus sonhos, mesmo quando eles pareciam intangíveis!

*A “dona” orientadora*, Professora Michéle, pelo voto de confiança no meu potencial e por ter me guiado com maestria ao longo dessa árdua jornada. Sua conduta, profissionalismo, excelência, associados a leveza no trato me fazem tê-la como modelo. Sou e serei profundamente grato por todas as portas que me foram abertas como pesquisador graças a você!

*Às empresas* que acreditaram na ideia e cederam materiais para o trabalho: Centro Oeste Asfaltos, CIPLAN, Contagem, BRACAL e MICROPET.

*Ao DER-DF* pela solicitude e prestatividade na condução de ensaios em suas instalações, em nome do Engenheiros Paulo e Gissandra.

*Aos Professores da Geotecnia* pelo embasamento teórico transmitido ao longo das disciplinas, me sinto honrado de ter tido essa oportunidade!

*Aos amigos* Nara, Márcio e Laura, vocês fizeram com que meus dias cinzentos em Brasília se tornassem dias de sol!

*Aos laboratórios internos da UnB* pela solicitude ajuda, meu muito obrigado ao Instituto de Geociências (IG), Instituto de Química (IQ) e Instituto de Física (IF). Em especial, aos Professores Jorlandio e Adriana.

*Ao Professor Márcio* por ter aberto as portas do INFRALAB para que pudesse realizar minha pesquisa experimental. Neste sentido, agradeço à Letícia, Amanda, Sanderson, Luís, Everton pelas trocas de experiência, ajuda, risos (e socorros kkkk)!

*Ao Professor Carlos Recarrey* pela bondade e pelos ensinamentos que transcendem o ambiente acadêmico.

*Aos amigos* Matheus e Gabs por me ajudarem a dar os primeiros passos na área de misturas asfálticas em laboratório. Vocês estão nas minhas melhores lembranças!

*Ao Casagrande Research Group* pelo constante suporte e parcerias. Em especial, à Andressa, pelos nossos momentos sérios de descontração, e à Giovanna, pelo suporte e ombro amigo nessa reta final!

*À “Tchurma de Londrina”*, mesmo na distância vocês se fizeram presentes, tornaram meus dias mais leves e a minha caminhada mais sólida. Thanks Renan, Alana, Flávia, Camila, Profa. Raquel!

*Ao José Augusto “Naja”*, por me aguentar desde os tempos de graduação, sempre prestativo, solícito & debochado! kk Obrigado pelo suporte e pelas horas a fio que me ouviu todas as vezes que o fardo se tornou mais pesado!

*Aos Membros da Banca* por todos os comentários e contribuições feitos desde a qualificação, os quais enobreceram este trabalho!

*Às amigas* construídas em Brasília e as amigas “antigas”, não mencionarei nomes para não correr o risco de me esquecer de alguém, mas saibam que moram em meu coração!

*Às Políticas de Demanda Social* pelo fomento de bolsas de Pós-graduação, em especial, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq!

*Finalmente*, deixo meu agradecimento a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para viabilizar essa conquista!

## RESUMO

Mais de 396 milhões de toneladas de resíduos plásticos são produzidos anualmente, causando uma das principais preocupações ambientais globais. Esse cenário é agravado pela contaminação da cadeia alimentar humana por microplásticos, como o polietileno tereftalato (PET). Ao mesmo tempo, a areia natural está ultrapassando sua capacidade de formação pela exploração excessiva da construção civil, apontando para a necessidade de reciclagem e incorporação de materiais alternativos para alcançar o desenvolvimento sustentável. Em reconhecimento a essas necessidades, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o efeito da substituição de areia natural por PET reciclado no comportamento mecânico de mistura asfáltica densa (CBUQ). Para caracterizar os materiais e avaliar suas interações foram realizados ensaios XDR, XRF, TGA/DTG, SEM, FTIR e AFM. O estudo volumétrico foi conduzido a partir de ensaios de dosagem e compactação Superpave e microtomografia de raios-X ( $\mu$ -CT). O comportamento mecânico das misturas foi investigado por meio de ensaios de resistência à tração indireta (RT), módulo de resiliência (MR), dano por umidade induzida (DUI), módulo dinâmico, resistência à fadiga por tração direta e resistência à deformação permanente. A substituição de areia por PET até 8% em volume não apresentou alteração significativa no teor de ligante de projeto, devido à equivalência de absorção de ligante entre os materiais. Mantendo fixo o teor de ligante, o incremento da quantidade de PET aumentou o volume de vazios e diminuiu a espessura do filme de ligante, conforme observado visualmente na  $\mu$ -CT. Todas as misturas apresentaram resultados de RT e MR consistentes com a literatura. A inserção de PET aumentou a força de adesão entre ligante-agregado sob exposição à umidade, produzindo misturas mais resistentes ao dano por umidade induzida. A mistura com 2% de PET (HMA-2P) demonstrou comportamento superior em termos de módulo dinâmico, ângulo de fase e resistência à fadiga entre as misturas investigadas, assim como compatibilidade em relação a resistência à deformação permanente da mistura convencional (HMA-C). Pelo exposto, a incorporação de PET reciclado via seca em pavimentação asfáltica se mostra uma solução promissora sob as óticas técnica e socioambiental.

## ABSTRACT

More than 396 million tons of plastic waste is produced annually, causing one of the top global environmental concerns. This scenario is aggravated by the human food chain contamination by microplastics, such as polyethylene terephthalate (PET). At the same time, natural sand is exceeding its formation capacity due to the excessive exploitation of civil construction, pointing to the necessity of recycling and incorporating alternative materials to achieve sustainable development. In recognition of these needs, this research aims to evaluate the effect of replacing natural sand with recycled PET on the mechanical behavior of hot-mix asphalt (HMA). XDR, XRF, TGA/DTG, SEM, FTIR, and AFM tests were performed to characterize the materials and evaluate their interactions. The volumetric study was conducted using Superpave dosing and compaction, and X-ray microtomography ( $\mu$ -CT) tests. The mechanical behavior of the mixtures was investigated through tests of indirect tensile strength (ITS), modulus of resilience (RM), induced moisture damage, dynamic modulus, direct tension cyclic fatigue, and permanent deformation by flow number. The replacement of sand by PET up to 8% by volume did not present a significant change in the optimum asphalt content due to the equivalence of binder absorption between the materials. For the same binder content, increasing the amount of PET increased the void volume and decreased the binder film thickness, as observed in  $\mu$ -CT. All mixtures showed ITS and RM results consistent with the literature. PET insertion increased the adhesive bond between binder-aggregate under exposure to moisture, producing mixtures more resistant to induced moisture damage. The mix with 2% PET (HMA-2P) showed superior behavior in terms of dynamic modulus, phase angle, and fatigue resistance among the investigated mixtures, and compatibility about the resistance to permanent deformation of the conventional mixture (HMA-C). Based on the above, incorporating recycled PET by dry process in asphalt paving proves to be a promising solution from a technical and socio-environmental point of view.

## ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO .....	16
1.1 CONTEXTO GERAL .....	16
1.2 MOTIVAÇÃO .....	17
1.3 OBJETIVOS .....	18
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 APLICAÇÃO DO PET EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	20
2.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	24
2.2.1 VISCOELASTICIDADE LINEAR .....	24
2.2.2 DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA.....	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	33
3.1 MATERIAIS .....	33
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	34
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO CONVENCIONAL DOS AGREGADOS .....	34
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA, TÉRMICA, E ESTRUTURAL .....	35
3.2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E REOLÓGICA DO LIGANTE .....	36
3.2.4 INTERAÇÃO ENTRE LIGANTE E AGREGADO.....	37
3.3 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS .....	40
3.4 MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X .....	42
3.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	43
3.6 CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA LINEAR.....	44
3.7 FADIGA.....	45
3.8 DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....	47
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	48
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	48
4.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	48
4.1.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	49
4.1.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	50
4.1.4 CARACTERIZAÇÃO TERMOGRAVIMÉTRICA .....	50
4.1.5 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL .....	52
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO .....	53
4.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	53
4.2.2 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA .....	54
4.3 INTERAÇÃO AGREGADO-LIGANTE.....	55
4.4 ANÁLISE VOLUMÉTRICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	58
4.5 MICROTOMOGRAFIA .....	60

4.6 SUSCEPTIBILIDADE AO DANO POR UMIDADE INDUZIDA .....	65
4.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	66
4.8 CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA DAS MISTURAS .....	67
4.9 FADIGA.....	71
4.10 DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	74
5. CONCLUSÕES.....	76
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	77
REFERÊNCIAS .....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Unidade de repetição do polietileno tereftalato .....	20
Figura 2.2 – Representação das várias parcelas de deformação.....	24
Figura 2.3 – Solicitação harmônica em material viscoelástico .....	25
Figura 2.4 – Plano complexo.....	25
Figura 2.5 – Exemplo de determinação da curva mestra de ligante na $T_R$ de 28°C .....	27
Figura 2.6 – Exemplo de curva de deformação permanente .....	29
Figura 2.7 – Ensaio de fadiga por tração direta.....	31
Figura 2.8 – Curva característica de dano .....	32
Figura 3.1 – Etapas do Planejamento Experimental.....	33
Figura 3.2 – Processo de beneficiamento do PET reciclado .....	34
Figura 3.3 – Ensaio de RTFOT .....	36
Figura 3.4 – Componentes para execução dos ensaios de caracterização reológica .....	37
Figura 3.5 – Princípio do ensaio.....	38
Figura 3.6 – Ensaio AFM: a) Detalhe da amostra; b) Equipamento .....	39
Figura 3.7 – Ensaio FTIR: a) Equipamento utilizado; b) Sistema de aquisição.....	39
Figura 3.8 – Dosagem SUPERPAVE.....	41
Figura 3.9 – Processo de extração de amostra de mistura asfáltica para $\mu$ CT .....	43
Figura 3.10 – Equipamentos utilizados para os ensaios de: (a) RT; (b) MR.....	43
Figura 3.11 – Sequência para ensaio de MD.....	44
Figura 3.12 – Ensaio de tração direta .....	46
Figura 3.13 – Deformação permanente: a) Esquema de ensaio; b) Corpo de prova .....	47
Figura 4.1 – Curva granulométrica: (a) agregados; (b) mistura .....	49
Figura 4.2 - Difractogramas dos agregados minerais e reciclado empregados .....	49
Figura 4.3 - Curvas termogravimétricas: (a) Brita; (b) Pó; (c) Areia; (d) PET .....	51
Figura 4.4 - MEV dos agregados: (a) Brita; (b) Pó; (c) Areia; (d) PET .....	52
Figura 4.5 – Determinação das temperaturas de mistura e compactação .....	53
Figura 4.6 - Curva mestra e ângulo de fase do ligante na $T_R$ de 28°C.....	54
Figura 4.7 – FTIR/ATR dos mástiques compostos por areia e PET .....	56
Figura 4.8 – Curvas força-distância para mástique e trabalho de adesão.....	57
Figura 4.9 – Efeito da incorporação de PET na volumetria das misturas .....	59
Figura 4.10 – Resultados de $\mu$ -CT em relação ao volume das misturas.....	61
Figura 4.11 – Teor de ligante em função da granulometria.....	62
Figura 4.12 – Distribuição de vazios em percentual de volume.....	64
Figura 4.13 – Dano por umidade induzida para as misturas .....	65

Figura 4.14 – Resistência à tração e Módulo de resiliência das misturas .....	67
Figura 4.15 – Módulo dinâmico das misturas asfálticas .....	68
Figura 4.16 – Fatores de translação da curva mestra das misturas e sua comparação ...	69
Figura 4.17 – Curva mestra e ângulo de fase das misturas asfálticas na $T_R$ de 20°C .....	70
Figura 4.18 – Curva característica de dano das misturas para $T_{ref}$ de 20°C .....	71
Figura 4.19 – Envoltórias de ruptura baseadas no: a) $D^R$ ; b) $G^R$ .....	72
Figura 4.20 – Curvas de fluência dinâmica .....	74
Figura 4.21 – <i>Flow number</i> das misturas asfálticas .....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais contribuições da incorporação de PET em misturas asfálticas.	23
Tabela 3.1 – Condições experimentais e abreviações adotadas .....	42
Tabela 4.1 – Caracterização Física dos Agregados. ....	48
Tabela 4.2 – Composição Química dos Agregados.....	50
Tabela 4.3 - Caracterização física do ligante.....	53
Tabela 4.4 - Variáveis do modelo sigmoidal e coeficientes do fator de translação .....	55
Tabela 4.5 – Parâmetros volumétricos da dosagem das misturas.....	58
Tabela 4.6 – Volumetria das amostras ensaiadas .....	60
Tabela 4.7 – Interação e distribuição dos componentes na matriz .....	63
Tabela 4.8 – Variáveis do modelo sigmoidal e coeficientes do fator de translação.....	71
Tabela 4.9 – Parâmetros de ajuste para as misturas asfálticas.....	73

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

$|E^*|$  - módulo dinâmico  
 $|G^*|$  - módulo de cisalhamento dinâmico  
a, b, c - coeficientes do fator de translação  
AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials  
AAUQ - Areia Asfalto Usinada a Quente  
ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AFM - Atomic Force Microscopy  
ANOVA - Análise de Variância  
ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
C - Integridade  
CAIQ - Central Analítica do Instituto de Química  
CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo  
CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente  
CNT - Confederação Nacional do Transporte  
DER - Departamento de Estradas de Rodagem  
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
DRX - Difração de Raios-X  
DSR - Dynamic Shear Rheometer  
 $E^*$  - módulo complexo  
 $E_1$  - módulo de armazenamento  
 $E_2$  - módulo de perda  
ESAL - Equivalent Standard Axle Load  
FN - Flow Number  
FTIR/ATR - Fourier transformed infrared with attenuated total reflectance  
Gmb - massa específica aparente  
Gmm - massa específica máxima medida  
HMA - Hot Mix Asphalt  
IG - Instituto de Geociências  
INFRALAB - Laboratório de Infraestrutura  
LVDT - Linear Variable Differential Transformer  
MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura  
MR - Módulo de Resiliência  
MSCR - Multiple Stress Creep Recovery  
PDI - Processamento Digital de Imagens  
PET - Polietileno Tereftalato  
RAP - Reclaimed Asphalt Pavement  
RBV - relação betume/vazios  
RCD - Resíduo de Construção e Demolição  
RRT - Razão de Resistência à Tração Retida  
RT - Resistência à Tração Indireta  
RTFOT - Rolling Thin Film Oven Test

S - dano acumulado  
S<sub>app</sub> - indicativo de capacidade de dano  
SMA - Stone Matrix Asphalt  
SUPERPAVE - Superior Performing Asphalt Pavements  
S-VECD - Dano Contínuo Viscoelástico Simplificado  
t - tempo de carregamento  
TGA/DTG - Análise termogravimétrica e termodiferencial  
TMN - Tamanho Máximo Nominal  
t<sub>r</sub> - tempo de carregamento reduzido  
UnB - Universidade de Brasília  
UNEP - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente  
VAM - vazios do agregado mineral  
VCB - vazios com betume  
V<sub>v</sub> - Volume de vazios  
WWF - World Wide Fund  
XRF/EDX - Espectrometria de Fluorescência de Raios-X  
δMS, θ, β, γMS - variáveis do modelo sigmoidal  
ε<sub>0</sub> - deformação elástica  
ε<sub>p</sub> - deformação plástica  
ε<sub>ve</sub> - deformação viscoelástica  
ε<sub>vp</sub> - deformação viscoplástica  
μCT - microtomografia de raios-X  
με - Microdeformação  
σ - tensão  
φ - ângulo de fase  
ω - frequência  
ω<sub>r</sub> - frequência reduzida

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO GERAL

O setor de transporte é um dos principais propulsores de crescimento econômico para o país, encarregado da movimentação de pessoas e mercadorias, sua dinâmica complexa promove a expansão da atividade econômica, da competitividade dos bens produzidos e da renda disponível internamente. Nesse cenário, o modal rodoviário é o principal responsável pelo escoamento da produção e deslocamento de pessoas no Brasil, embora relatório da Confederação Nacional do Transporte (CNT) publicado em 2021, avaliando mais de 107 mil quilômetros em todo o país, demonstre índices deficitários quanto a qualidade das rodovias segundo diferentes aspectos, os quais contribuem para ocorrência de acidentes, redução da eficiência energética dos veículos, e aumento da emissão de poluentes, acarretando em custos sociais, econômicos e ambientais.

Soma-se a essa problemática a exploração excessiva de areia natural, matéria-prima empregada para compor a fase de agregados miúdos do revestimento asfáltico da estrutura de pavimento, pertencente ao grupo de materiais mais extraído do mundo, excedendo os combustíveis fósseis e biomassa (Torres et al., 2017). De acordo com o relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - UNEP (2019), há a necessidade de extração de 50 bilhões de toneladas de areia por ano para suprir as demandas geradas pelo crescimento populacional, aumento da urbanização e desenvolvimento de infraestrutura, embora tal volume exceda a capacidade natural de formação do material.

Esse complexo cenário abre caminho para a investigação e utilização de novos materiais, os quais possibilitem a redução da demanda de matéria-prima e contribuam para a adoção de práticas mais sustentáveis na engenharia. Estudos voltados à área de pavimentação têm empregado borracha, Resíduo da Construção e Demolição (RCD), fibras naturais, asfalto fresado (RAP) e resíduo de plástico reciclado, o qual tem demonstrado resultados promissores (Arabani et al., 2016; Dalhat et al., 2019; Gibreil and Feng, 2017; Gómez-Meijide et al., 2018; Leng et al., 2018; López et al., 2018; Moghaddam et al., 2012; Pérez and Pasandín, 2017; Shanbara et al., 2018).

Dentre os tipos mais comuns de resíduos plástico, o polietileno tereftalato (PET), devido às suas propriedades mecânicas, químicas, térmicas e custo de produção, é um dos plásticos mais produzidos nas últimas duas décadas na forma de embalagens de bebidas e de alimentos, o que tem despertando sua investigação em diversas frentes de pesquisa

(Ferreira et al., 2021; Ghabchi et al., 2021; Louzada et al., 2019; Navarro et al., 2008; Shukla and Harad, 2006; Torres et al., 2000).

Diante do exposto, fica evidente a relevância da realização de estudos que forneçam subsídios técnicos e científicos acerca da substituição de areia natural por materiais alternativos, em que se ressalta o potencial do Polietileno Tereftalato (PET) reciclado, visando investigar de modo aprofundado suas potencialidades e limitações em misturas asfálticas, primando pela prevenção e/ou retardamento das trincas por fadiga e afundamento da trilha de rodas, principais defeitos apresentados pelas rodovias brasileiras.

## **1.2 MOTIVAÇÃO**

A tendência de escassez da disponibilidade de areia para utilização em projetos de construção civil, precisamente como agregado miúdo na composição dos materiais da camada de revestimento de pavimentos flexíveis, associada a geração global de resíduos plásticos, acima de 396 milhões de toneladas anualmente e taxa de crescimento de 4 % ao ano, têm despertado atenção para a necessidade da reciclagem e incorporação desse material nas cadeias produtivas, principalmente no setor rodoviário (Torres et al., 2017; UNEP, 2019). Nesse contexto, é importante destacar que apenas 1,2 % dos 11,3 milhões de toneladas de resíduos plásticos geradas no Brasil são reciclados (Dalhat et al., 2019; WWF, 2019).

A poluição por microplástico, definido por partículas inferiores a 5 mm (Stock et al., 2019), é um dos 10 principais problemas ambientais globais emergentes (UNEP, 2014, 2016). Considerando os impactos negativos do plástico nos ecossistemas aquáticos globais, além dos efeitos da ecotoxicidade da interação entre microplásticos e microrganismos marinhos, há a formação de bioincrustação por meio do acúmulo de biomassa nas superfícies plásticas (Rai et al., 2021; Zhang et al., 2020). Este mecanismo não só desempenha um papel importante no tempo de sedimentação das partículas de plástico devido ao aumento da densidade polimérica, como também provoca a ingestão de microplásticos pela fauna marinha, disfarçados como uma fonte alimentar nutritiva e, conseqüentemente, sua transferência para a cadeia alimentar (Arias-Andres et al., 2019; Kasavan et al., 2021; Kurniawan et al., 2021; Vethaak & Legler, 2021).

Impulsionado por esses fatores e pela escassez de estudos sobre a incorporação via seca de micro polietileno tereftalato (PET) em mistura asfáltica densa do tipo CBUQ, o

presente trabalho propõe o avanço da técnica a partir da reflexão quanto ao modo de substituição, teor de substituição e seus efeitos na interação com o ligante, arranjo microestrutural, comportamento volumétrico e mecânico, de maneira a apresentar uma alternativa técnica e socioambiental em alinhamento com adoção de práticas sustentáveis em obras de engenharia rodoviária.

### 1.3 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar o efeito da substituição de areia natural por PET reciclado no comportamento mecânico de mistura asfáltica densa (CBUQ). Para atingir esse fim, se estabelecem como objetivos específicos:

- Compreender o efeito da substituição de agregado mineral por PET reciclado mediante a caracterização dos distintos agregados que compõe a mistura asfáltica densa, com base em análises de Difração de Raios-X (DRX), Fluorescência de Raios-X (XRF), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Termogravimetria (TGA/DTG), e suas interações (AFM e FTIR);
- Identificar o efeito volumétrico e estrutural do PET substituindo a areia natural por massa e volume para distintos teores de substituição (2%, 4%, 8%), a partir da compactação Superpave e ensaios de microtomografia de raios-x;
- Verificar o comportamento mecânico das misturas asfálticas convencional e com PET incorporado, segundo ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, dano por umidade induzida, módulo dinâmico, fadiga por tração direta e deformação permanente.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese está estruturada em cinco capítulos, sendo apresentado no *Capítulo 1* a introdução ao tema e objetivos do trabalho. No *Capítulo 2* apresenta-se de forma analítica e crítica a bibliografia relacionada a pesquisa desenvolvida. O programa experimental, materiais e métodos utilizados são enfoque do *Capítulo 3*, ao passo que as análises e discussão dos resultados são feitas no *Capítulo 4*. Por fim, o *Capítulo 5* sumariza as principais conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento do trabalho, bem como aponta sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo como matéria-prima o petróleo, os plásticos são formados por cadeias de polímeros (*polys* – muitas, *meros* – partes) e aditivos melhoradores de propriedades, em que o número de repetições da molécula central (monômero) é designado por grau de polimerização. Entre os dois grandes grupos em que os polímeros são classificados, são denominados termoplásticos os polímeros que suportam repetidos estágios de aquecimento e resfriamento sem perder suas características básicas, em que se enquadram o polietileno, polipropileno e o poliéster.

A produção comercial de plásticos remonta à década de 1950, fruto dos avanços científicos oriundos da Segunda Guerra Mundial. Desde então, sua produção anual cresceu de 1,7 em 1950 para 288 milhões de toneladas em 2012, evidenciando sua inserção nas cadeias produtivas, dado o baixo custo de produção, durabilidade, resistência à degradação, comportamento hidrofóbico e bioinerte (Ferreira et al., 2021; Geyer et al., 2017; UNEP, 2014).

Utilizado principalmente como embalagens de bebidas e alimentos, finalidade que representa 42% da produção dos polímeros (Geyer et al., 2017), a natureza não biodegradável e curto-prazo de uso dos plásticos têm gerado elevados montantes de resíduos plásticos ao redor do mundo, estimado em 396 milhões de toneladas em 2016, com projeção de atingir 550 milhões de toneladas em 2030 (Dalhat et al., 2019; WWF, 2019). Desse montante, aproximadamente 11,3 milhões de toneladas foram geradas no Brasil, dos quais apenas 1,2% foram reciclados, de acordo com o World Wide Fund (WWF). Embora haja divergência entre as metodologias empregadas pelo WWF e a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), a qual afirma que 6,1 milhões de toneladas foram geradas em 2016 e 9% tenha sido reciclado, fica claro a deficitária gestão dada a esses resíduos, bem como sua alarmante projeção para os próximos anos (Lebreton and Andrady, 2019; Vasconcelos, 2019).

Diversas consequências socioambientais e de saúde pública são geradas a partir desse cenário, em que menciona-se a poluição ambiental do solo, corpos hídricos, vida aquática, e alteração do trabalho dos ecossistemas (Beaumont et al., 2019; Gürü et al., 2014; Shukla & Harad, 2006). Particularmente, a poluição por resíduos plásticos com partículas inferiores a 5 mm, denominada microplástico (Stock et al., 2019), se situa entre os principais problemas ambientais globais emergentes (UNEP, 2014, 2016), e tem seu

efeito potencializado nos ecossistemas aquáticos globais, tanto por efeito ecotóxico gerado pela interação dos microplásticos e microrganismos marinhos, quanto acumulação de biomassa na superfície dos resíduos plásticos que, em última instância, são ingeridos pela fauna marinha e transferidos para a cadeia alimentar (Arias-Andres et al., 2019; Kasavan et al., 2021; Kurniawan et al., 2021; Rai et al., 2021; Zhang et al., 2020).

Das diversas ações de gestão dos resíduos plásticos, a reciclagem e reintrodução na cadeia produtiva é a via mais investigada pela construção civil, em virtude da elevada demanda por materiais de construção e versatilidade de incorporação no setor.

Desta forma, o presente referencial teórico tem como intuito contextualizar a problemática envolvendo a geração de resíduos plásticos no mundo, direcionando para potenciais e limitações do polietileno tereftalato reciclado em misturas asfálticas. Na sequência é abordado o reflexo da inserção de plástico reciclado no comportamento mecânico das misturas, enfocando na resposta viscoelástica, resistência à deformação permanente e fadiga, em decorrência de serem os principais defeitos que afetam a estrutura rodoviária brasileira.

## 2.1 APLICAÇÃO DO PET EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Dentre os distintos tipos de plástico, o polietileno tereftalato (Figura 2.1), um polímero termoplástico semicristalino, devido às propriedades mecânicas, químicas, térmicas e custo de produção, é um dos plásticos mais produzidos nas últimas duas décadas, resultando em grandes quantidades de resíduos de PET como embalagens de bebidas e de alimento, principalmente (Awaja & Pavel, 2005; Louzada et al., 2019; Navarro et al., 2008; Shukla & Harad, 2006; Torres et al., 2000). Conforme apontado por Ferreira et al. (2021), o PET apresenta valores típicos de resistência à tração de 81 MPa, módulo de elasticidade de 2800 MPa e alongamento até ruptura de 70 %.

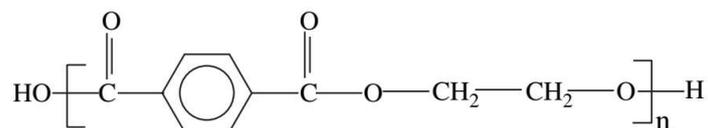


Figura 2.1 – Unidade de repetição do polietileno tereftalato – PET

Entendida como uma das principais soluções, a reciclagem de resíduos plásticos pode ser realizada por procedimentos químicos, mecânicos e de recuperação energética, sendo o plástico utilizado como combustível em usinas de incineração (Ragaert et al.,

2017). Pelas reações de despolimerização mais comuns, envolvendo quimólise ou pirólise, a estrutura do polímero é convertida em monômeros ou oligômeros na reciclagem química, possibilitando sua reutilização como combustível ou produção de materiais poliméricos (Kazemi et al., 2021). Na reciclagem mecânica, o processo típico envolve coleta, triagem, lavagem e trituração dos materiais, dependendo da origem e composição dos resíduos, e apresenta vantagens sobre a reciclagem química, como a utilização de equipamentos semelhantes aos empregados na transformação, e não requer investimentos em instalações complexas (Dalhat et al., 2019; Navarro et al., 2008). Conforme alertado por Kazemi et al. (2021), o plástico processado quimicamente necessita de diversos produtos químicos e solventes, subprodutos tóxicos e demanda energia para as reações químicas, aumentando o custo da solução e gerando preocupações ambientais.

Com base em sua vida útil curta, diversos estudos têm sido conduzidos para avaliar a incorporação de resíduos de PET em misturas asfálticas, tanto no processo seco, por substituição de agregados, quanto no processo úmido, por modificação do ligante asfáltico (Dalhat et al., 2019; Ghabchi et al., 2021; Kazemi et al., 2021; Leng et al., 2018; Moghaddam et al., 2014; Silva et al., 2015; Silva et al., 2017). Hassani et al. (2005) substituíram parcialmente os agregados minerais por PET na fração de 2,36-4,75 mm, indicando que 5% de PET mantém a estabilidade da mistura e diminui a fluência Marshall por melhorias na adesão dos chips de PET e do ligante asfáltico. Embora a quantidade máxima de incorporação de PET estudada por Moghaddam et al. (2012) em mistura do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) foi de 1% em peso de agregado, todas as porcentagens melhoraram a vida de fadiga das misturas. Resultados semelhantes foram relatados por Ahmadinia et al. (2012) adicionando 2-10% de PET reciclado em relação a massa de ligante, novamente considerando mistura do tipo SMA.

O aumento da resistência à tração indireta e do módulo de resiliência foram obtidos por Modarres and Hamed (2014a; 2014b) até 2% de adição de PET em relação a massa de ligante. No entanto, os autores relataram efeitos benéficos na vida de fadiga das misturas com ligante modificado com até 10% de PET. Adicionalmente, Taherkhani & Arshadi (2017) indicaram que a adição de 2% de PET em massa de ligante asfáltico com partículas mais finas apresentou melhor desempenho do que partículas maiores de PET.

Mesmo com os ganhos descritos por Gürü et al. (2014) e Leng et al. (2018) na resistência às trincas térmicas por aditivos derivados de PET modificando o ligante

asfáltico, nenhuma observação foi feita em relação aos resíduos gerados na reciclagem química de garrafas PET pelos processos de glicólise e aminólise empregados nos respectivos estudos. Além de ganhos mecânicos, a modificação do ligante por PET micronizado na mistura asfáltica demonstrou resistência superior ao envelhecimento e ao dano por umidade sobre o ligante virgem (Ghabchi et al., 2021; Silva et al., 2015, 2017).

Não obstante as melhorias nas propriedades viscoelásticas de resíduos plásticos reciclados combinados em substituição ao agregado mineral em mistura asfáltica densa do tipo HMA (*Hot Mix Asphalt*) por Dalhat et al. (2019), não foram apresentados os efeitos dessa solução nas propriedades volumétricas das misturas, embora seja um parâmetro fundamental a ser considerado. Com efeito, a utilização de misturas aleatórias de plástico reciclado, devido à inerente variabilidade, dificulta o estabelecimento de tendências de comportamento e, conseqüentemente, a sua aplicação prática na pavimentação.

Apesar da redução nos valores de resistência à tração, a substituição de agregado mineral fino por PET aumentou a resistência ao dano por umidade induzida em estudo desenvolvido por Esfandabad et al. (2020). Uma visão geral das principais contribuições dos trabalhos mencionados e detalhes experimentais da incorporação de PET é mostrada na Tabela 2.1. Vale observar que além da substituição do agregado e modificação do ligante, há estudos que se propõe a utilizar o PET como aditivo, em que a massa de PET a ser adicionada é calculada em relação a massa de ligante e o mesmo é adicionado após a mistura do agregado com ligante (Ahmadinia et al., 2012; Taherkhani & Arshadi, 2017).

Apesar do esforço e da contribuição de diversas regiões do mundo para o avanço da técnica de inserção de PET em misturas asfálticas, ainda não há uma definição clara do tamanho mais satisfatório nem sobre o processo mais vantajoso de incorporação. Na verdade, a maioria das pesquisas se concentrou na modificação do ligante asfáltico e os poucos estudos disponíveis são concernentes a substituição de agregados em misturas de SMA.

Acrescenta-se a esses questionamentos a aplicabilidade dos recentes procedimentos experimentais para análise das misturas asfálticas com inserção de PET. Nesse sentido, merece destaque o entendimento do comportamento viscoelástico e resistência aos danos de deformação permanente e fadiga de misturas asfálticas frente a inserção de novos materiais geotécnicos, a ser contextualizado a seguir.

Tabela 2.1 – Principais contribuições da incorporação de PET em misturas asfálticas

Autores	País	Conceito da incorporação de PET	Forma/Tamanho	Quantidade de PET	Principais descobertas
Hassani et al. (2005)	Irã	Substituição do agregado	Chips de 3 mm	0; 5; 7,5; 10; 12,5; e 15% (por massa do agregado)	Em geral, a inserção de quantidades distintas de PET reduziu a estabilidade e aumentou o fluxo. 5% de PET melhorou a relação entre estabilidade e fluxo
Ahamadinia et al. (2012)	Malásia	Aditivo	Partículas < 1.18 mm	0; 2; 4; 6; 8; e 10% (por massa do ligante)	Melhorias no módulo de resiliência e na resistência à deformação permanente
Moghddam et al. (2012)	Malásia	Substituição do agregado	Chips de 2.36 mm	0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; e 1% (por massa do agregado)	A inserção de PET no SMA mudou a rigidez das misturas e melhorou suas propriedades de fadiga
Moghddam et al. (2014)	Malásia	Modificação do ligante	Chips < 2.36 mm	0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; e 1% (por massa do agregado)	O aditivo melhorou a resistência à deformação permanente sob condição de carregamento dinâmico
Modarres and Hamedí (2014a)	Irã	Modificação do ligante	Partículas < 1.18 mm	0; 2; 4; 6; 8; e 10% (por massa do ligante)	A mistura modificada por PET apresentou maior vida de fadiga do que as amostras não modificadas
Modarres and Hamedí (2014b)	Irã	Modificação do ligante	Chips 0.425-1.18 mm	0; 2; 4; 6; 8; e 10% (por massa do ligante)	A adição de PET em até 2% aumentou tanto a RT quanto o MR.
Gürü et al. (2014)	Turquia	Modificação do ligante	Aditivo derivado líquido	0; 1; 2; 3; 5; e 10% (por massa do ligante)	Melhorias na resistência às trincas térmicas
Silva et al. (2015)	Brasil	Modificação do ligante	Micronizado	0; 4; 5; e 6% (por massa do ligante)	A adição de PET micronizado melhorou a resistência ao envelhecimento do ligante
Silva et al. (2017)	Brasil	Modificação do ligante	Micronizado	0; 4; 5; e 6% (por massa do ligante)	Aumento da resistência ao dano por umidade induzida com incorporação de PET micronizado
Taherkhani e Arshadi (2017)	Irã	Aditivo	Partículas finas e graúdas	0;2;4;6;8 e 10% (por massa do ligante)	Partículas finas apresentam melhor comportamento mecânico na mistura
Leng et al. (2018)	Hong Kong	Modificação do ligante	Aditivo derivado sólido	0 e 2% (por massa do ligante)	Melhorias no desempenho à baixas temperaturas
Dalhat et al. (2019)	Arábia Saudita	Substituição do agregado e modificação do ligante	chips < 2.38 mm	0; 5; 10; e 20% (por massa do agregado)	Resíduos de plásticos reciclados combinados geraram resultados superiores do que PET apenas em HMA
Esfandabad et al. (2020)	Irã	Substituição do agregado	Partículas 4,75-2,36 mm	0;30;50;70; e 100% em porções específicas (por volume do agregado)	Aumento da resistência ao dano por umidade pela inserção de PET
Ghabchi et al. (2021)	Estados Unidos	Modificação do ligante	Micronizado < 0.075 mm	0; 5; 10; 15 e 20% (por massa do ligante)	PET micronizado melhorou a viscosidade e a adesão ligante-agregado

## 2.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

### 2.2.1 VISCOELASTICIDADE LINEAR

O entendimento das misturas asfálticas, devido as características elásticas dos agregados e a dependência do ligante quanto a temperatura, magnitude, tempo e taxa de carregamento, requer um modelo constitutivo que contemple a complexidade da matriz asfáltica. Por meio da representação de ensaio de fluência (Figura 2.2), é possível identificar as diversas parcelas de deformação desenvolvidas a partir de um ciclo composto por um período de solicitação externa (TL) e repouso (TR).

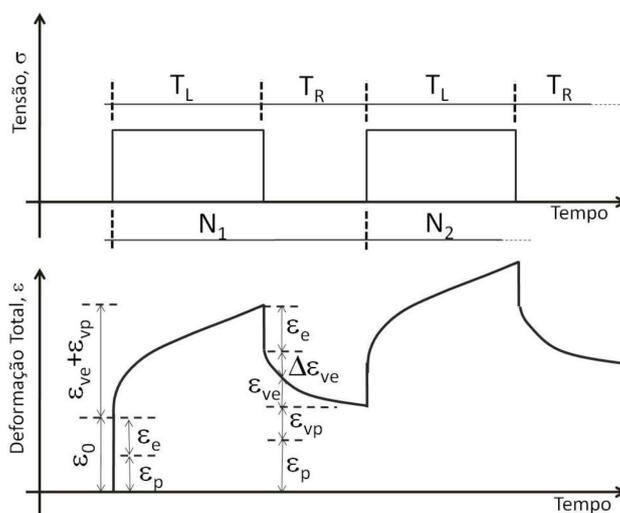


Figura 2.2 – Representação das várias parcelas de deformação (Sides et al., 1985)

Além das deformações de natureza elástica ( $\epsilon_0$ ) e plástica ( $\epsilon_p$ ) desenvolvidas no momento de solicitação e independentes do tempo, deformações viscoelásticas ( $\epsilon_{ve}$ ) e viscoplásticas ( $\epsilon_{vp}$ ) são geradas ao longo do tempo. Na fase de repouso, coincidente com o descarregamento para o exemplo ilustrado, além da recuperação instantânea da parcela elástica, é observado recuperação parcial da parcela viscoelástica em função do tempo. Por meio de simplificações quanto a parcela plástica, diversos estudos têm empregado de maneira satisfatória a classificação das misturas asfálticas como um material viscoelástico, principalmente quando se avalia o dano de trincas por fadiga, conforme observado por Mello (2008).

Desta forma, considerando solicitações harmônicas ou oscilatórias em materiais viscoelásticos, a partir da imposição de deformação sob função senoidal (Equação 2.1), é gerada uma resposta mecânica na forma senoidal (Equação 2.2), em que a sobreposição das curvas é afetada por uma defasagem, denominada ângulo de fase ( $\phi$ ).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.2)$$

Esses conceitos estão ilustrados na Figura 2.3. Vale ressaltar que materiais perfeitamente elásticos apresentam  $\varphi = 0^\circ$ , ao passo que materiais totalmente viscosos resultam em  $\varphi = 90^\circ$ .

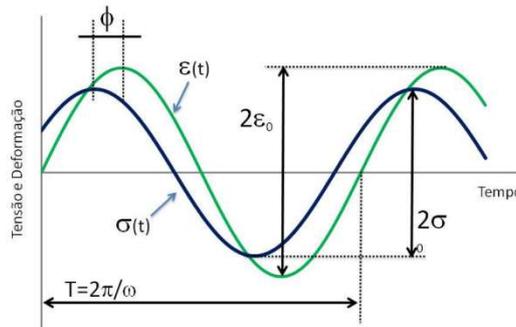


Figura 2.3 – Solicitação harmônica em material viscoelástico (Mello, 2008)

Além do ângulo de fase, a caracterização dos materiais asfálticos é feita por meio do módulo complexo ( $E^*$ ), sendo composto por duas parcelas, denominadas real e imaginária (Figura 2.4).

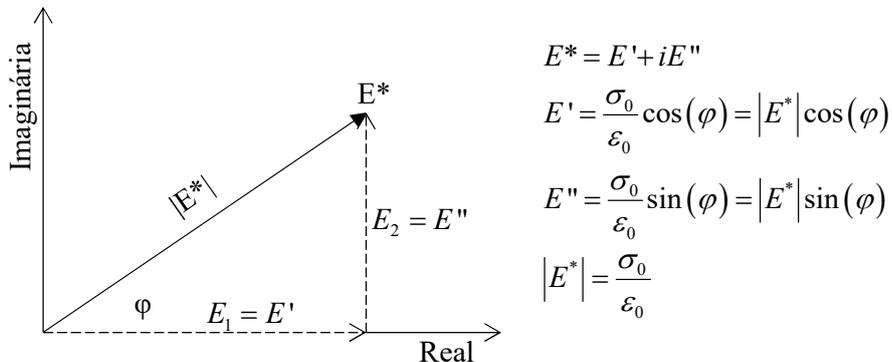


Figura 2.4 – Plano complexo (Modificado de Kim, 2009)

A parcela real do módulo ( $E_1$ ) é designada de módulo de armazenamento, enquanto que a parcela imaginária ( $E_2$ ) representa o módulo de perda, e cada uma dessas parâmetros são proporcionais a energia armazenada e dissipada durante um ciclo. A razão entre as amplitudes de tensão e deformação resulta no módulo dinâmico ( $|E^*|$ ).

Considerando a influência da frequência e temperatura na resposta de materiais viscoelásticos, a caracterização do comportamento mecânico ( $|E^*|$ ) de materiais asfálticas

por meio da determinação da curva mestra tem sido bastante empregada pela literatura. Definida como uma combinação de várias curvas isotérmicas que ao serem deslocadas horizontalmente resulte em uma única curva à uma dada temperatura de referência, há diversos métodos de ajuste para obtenção da curva mestra, com base no princípio da superposição tempo-temperatura.

Conforme investigado por Pellinen et al. (2003), a determinação dos fatores de translação por meio do ajuste de uma função sigmoideal (Equação 2.3) resulta em arranjos satisfatórios dos dados, e tem sido amplamente utilizada nos estudos sobre o tema (Gómez-Meijide et al., 2018; Lastra-González et al., 2016; Mello et al., 2018; Osmari et al., 2020).

$$\log|E^*| = \delta_{MS} + \frac{\mathcal{G}}{1 + \exp\left(\beta + \gamma_{MS} \log \frac{1}{\omega_r}\right)}, \quad (2.3)$$

em que  $\delta$  é o valor mínimo do módulo dinâmico  $|E^*|$ ,  $\delta + \mathcal{G}$  é o valor máximo de  $|E^*|$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são parâmetros que descrevem a forma do modelo sigmoideal e  $\omega_r$  representa a frequência reduzida.

Nesse sentido, o deslocamento necessário à uma determinada temperatura é obtido por meio do fator de translação  $\alpha_T$  (Equação 2.4), em que  $a$ ,  $b$ , e  $c$  são os coeficientes de ajuste, determinados durante a construção da curva mestra.

$$\log \alpha_T (T_i) = aT_i^2 + aT_i + c \quad (2.4)$$

Sendo o fator de translação  $\alpha_T$  função da temperatura, aplica-se o conceito de superposição tempo-temperatura (Equação 2.5), sendo  $t$  o tempo de carregamento na temperatura de interesse, e  $t_r$  e o tempo de carregamento na temperatura de referência, e obtém-se  $\omega_r$ .

$$\alpha_T = \frac{t}{t_r} = \frac{\omega}{\omega_r} \quad (2.5)$$

O processo de construção da curva mestra está exemplificado na Figura 2.5, considerando ligante asfáltico CAP 50/70 na  $T_R$  de 28°C, a partir de 6 temperaturas e 10 frequências distintas.

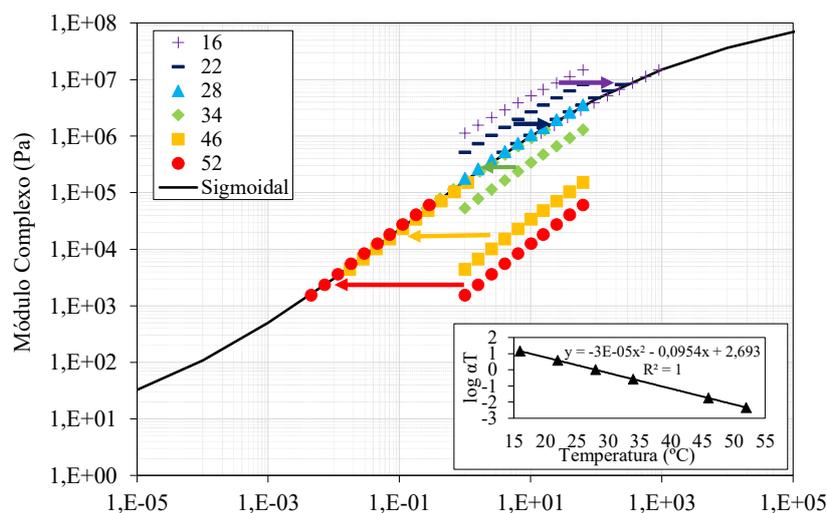


Figura 2.5 – Exemplo de determinação da curva mestra de ligante na  $T_R$  de 28°C

Estudo conduzido por Dalhat et al. (2019) demonstrou que a substituição de 5% e 10% de agregado mineral por PET reduziu o módulo dinâmico da mistura, ao passo que ao utilizar composição de vários polímeros reciclados obteve-se incremento de rigidez. Os autores atribuem esse comportamento a interação química ocasionada pela fusão dos resíduos plásticos. No caso do PET, por essa propriedade ser acima das temperaturas de mistura e usinagem, não é esperado esse tipo de interação (Kalantar et al., 2012).

Quanto ao ângulo de fase, observou-se uma queda nesses valores frente a inserção de agregado mineral por composto de plástico, ocorrendo comportamento inverso quando apenas o PET foi inserido (Dalhat et al., 2019). É de se esperar que a inserção do plástico promova redução no ângulo de fase, dado que esses materiais contribuem para a parcela elástica (Lastra-González et al., 2016). Acredita-se que essa contradição esteja mais associada a heterogeneidade da matriz asfáltica resultante do que ao comportamento da mistura.

Há de se observar que a utilização do PET para modificação do ligante, não obstante a incrementos no comportamento mecânico reportados pela literatura (Modarres & Hamedi, 2014b; Moghaddam et al., 2012, 2014), não promove significativa interação química entre o resíduo e o ligante asfáltico, sendo os ganhos oriundos do aumento da espessura do filme de ligante, e interações físicas entre os materiais, a depender do tipo de mistura, composição dos agregados, dimensão do plástico e percentual de incorporação. Acrescenta-se ainda que parcela significativa dos estudos focam na

reologia do ligante, sem fornecer informações quanto ao comportamento da mistura completa (Leng et al., 2018; Silva et al., 2015).

Por meio de ensaios de energia livre de superfície, Ghabchi et al. (2021) constaram que a inserção de PET micronizado em ligante aumentou a força de adesão entre ligante-agregado, refletindo em maior resistência ao dano por umidade induzida. Esse tipo de correlação tem sido confirmado por diversos trabalhos empregando materiais alternativos em misturas asfálticas (Mistry & Kumar Roy, 2021; Moura et al., 2020).

Além dos fatores mencionados anteriormente, é importante destacar a complexidade de se avaliar o potencial da inserção de plástico reciclado no comportamento de misturas asfálticas em função do tipo de solicitação a que o material está sujeito. Ao utilizar partículas de PET obtidas do processamento de garrafas, Moghaddam et al. (2014) demonstraram distinto comportamento mecânico das misturas asfálticas quando avaliadas em ensaios estáticos e cíclicos. Em geral, a resposta mecânica foi reduzida em ensaios estáticos.

### **2.2.2 DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA**

Há diversos fatores que afetam o desempenho de pavimentos rodoviários, os quais podem ser agrupados quanto aos aspectos funcional, estrutural e relativos à segurança. O entendimento dos mecanismos que regem o processo de deterioração se faz essencial para identificação da causa e, na temática do presente trabalho, averiguar a susceptibilidade de novos materiais a eles.

Acerca dos principais defeitos oriundos de tensões e deformações causados pelo tráfego e fatores ambientais, têm-se as deformações permanentes e as trincas por fadiga (Bastos et al., 2017; Leandro et al., 2017; Zhang et al., 2013).

A deformação permanente nos revestimentos asfálticos pode ser definida como um desenvolvimento gradual de depressões longitudinais nas trilhas de roda promovidas pelo aumento das cargas repetidas impostas pelo tráfego, causadas pela combinação de densificação e deformações cisalhantes, podendo ocorrer em uma ou mais camadas do pavimento, assim como subleito, embora o revestimento demonstre uma proeminente magnitude (Moghaddam et al., 2014).

Bastos et al. (2017) investigaram relações entre parâmetros de resistência à deformação permanente de ligantes asfálticos obtidos por ensaio de MSCR (*Multiple*

*Stress Creep Recovery*) e de misturas asfálticas em laboratório e campo (*flow number* e *triaxial stress sweep*), obtendo baixas correlações entre as análises feitas. Ainda assim, foi possível evidenciar que tendências de baixa resistência a esse dano apresentadas pelos ligantes se confirmaram nos ensaios das misturas. Os autores argumentam que a caracterização do ligante por si só não é suficiente para estimar o dano, devido a importância que os agregados representam no comportamento das misturas.

Estudos desenvolvidos por Bessa et al. (2015) e Aragão et al. (2016) investigaram a influência da morfologia de diferentes agregados no comportamento de misturas asfálticas. Mesmo com a diferença na origem mineralógica dos agregados (granítico, gnáissico e fonolítico), Bessa et al. (2015) observaram que a forma similar entre eles resultou em respostas mecânicas semelhantes. Já Aragão et al. (2016) analisaram a morfologia de diferentes agregados por meio de ensaios convencionais da metodologia de dosagem Superpave e Processamento Digital de Imagens (PDI), obtendo elevados coeficientes de correlação ( $R^2 > 0,83$ ) entre a resistência à deformação permanente e as propriedades obtidas das imagens digitais. A mesma tendência não foi verificada quanto a resistência a fadiga, justificada pelos autores que esse dano está mais relacionado ao ligante asfáltico do que as propriedades dos agregados.

A Figura 2.6 ilustra exemplo típico de curva obtida em ensaio de deformação permanente, sendo possível observar três zonas características.

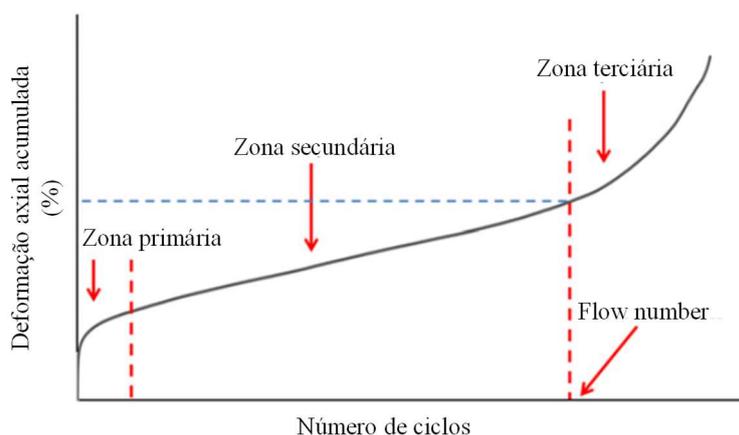


Figura 2.6 – Exemplo de curva de deformação permanente (Zhang et al., 2013)

A zona primária representa a região da curva em que a taxa de deformação diminui com o tempo de carregamento, ao passo que na zona secundária se observa uma constância na taxa de deformação. A interface entre a zona secundária e a zona terciária,

onde a taxa de deformação aumenta com o tempo, descreve o ponto denominado de *Flow number*, o qual tem sido adotado como parâmetro representativo no estudo de deformação permanente (Zhang et al., 2013).

De maneira geral, não há um consenso acerca de estudos envolvendo a presença de PET reciclado em misturas asfálticas. A adição de 0,2-1% de PET, em relação a massa de agregado, reduziu a deformação permanente acumulada em mistura do tipo SMA de acordo com Moghaddam et al. (2014). Da mesma forma, Esfandabad et al. (2020) substituindo parcialmente os agregados minerais por PET na faixa entre 4,75 mm e 2,36 em mistura densa, observaram incrementos na resistência a deformação permanente. Vale observar que todos esses estudos foram realizados em temperaturas próximas a 45 °C, não contemplando situações mais críticas.

Em contraponto, Taherkhani & Arshadi (2017) avaliaram o efeito do percentual e tamanho das partículas de polietileno tereftalato reciclado em ensaios de fluência dinâmica (*dynamic creep*) em misturas asfálticas densas, e obtiveram decréscimos de resistência em ambos os cenários, sendo mais acentuado para misturas com partículas maiores de PET. Os autores atribuem esse comportamento a forma das partículas e módulo de elasticidade do plástico.

Diferentemente das deformações permanentes em que o ligante apresenta menor influência no dano, a resistência ao trincamento por fadiga é fortemente influenciada pelas propriedades do ligante asfáltico. Devido ao comportamento viscoelástico dos ligantes e, conseqüentemente, da mistura asfáltica, as propriedades mecânicas desse material são dependentes do tempo, da taxa de aplicação do carregamento e da temperatura (Coutinho et al., 2013; Lopes et al., 2020; Vargas et al., 2018).

Como observado na deformação permanente, não há entendimento único nos estudos de fadiga em misturas asfálticas com PET, em que as variáveis tipo de mistura, processo de incorporação e percentual afetam o estabelecimento de uma tendência. Modarres & Hamed (2014a, 2014b) avaliaram a resistência a fadiga de mistura asfáltica com ligante modificado por PET à 5 °C e 20 °C em ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, reportando ganhos mecânicos com o aumento do percentual de PET. A partir da mesma metodologia de ensaio, Silva et al. (2017) demonstraram incremento de resistência a esse dano com 5% de PET modificando o ligante. Estudando a substituição de areia por PET em areia asfalto usinada a quente

(AAUQ), Brito (2020) reportou ganhos até 10% de substituição. Acima dessa quantidade, a autora identificou maior susceptibilidade ao dano por fadiga.

Além dos ensaios de fadiga por compressão diametral, uma recente metodologia de avaliação da resistência a fadiga tem sido conduzida a partir de ensaios de fadiga por tração direta, a qual apresenta como vantagens a utilização de menor número de corpos de prova, menor tempo para realização dos ensaios, estado uniforme e homogêneo de sollicitação e resultados independentes do tipo de sollicitação realizada no concreto asfáltico (Di Benedetto et al., 2004). Neste tipo de ensaio, o módulo dinâmico sofre reduções em função do número de ciclos, sendo geralmente utilizada a queda do ângulo de fase como critério de ruptura experimental (Figura 2.7).

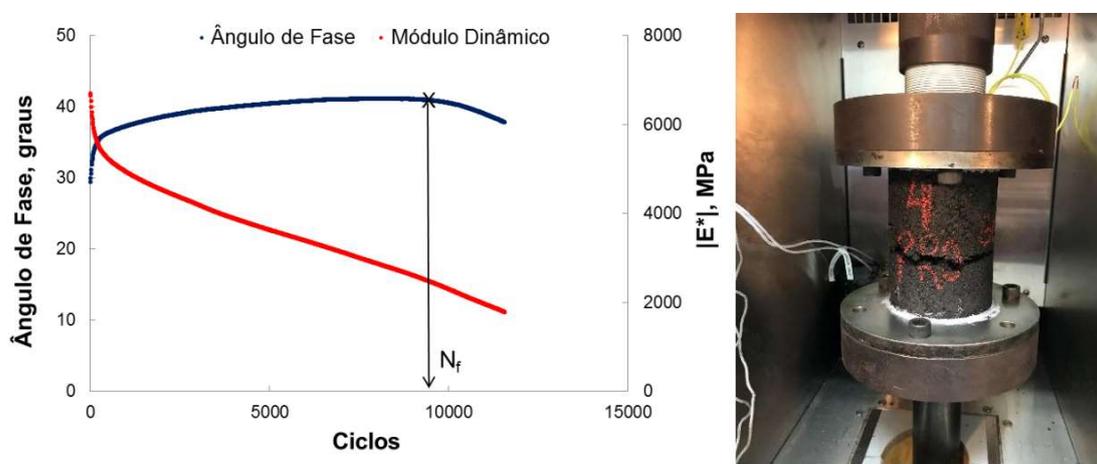


Figura 2.7 – Ensaio de fadiga por tração direta (Nascimento et al., 2014)

Com base na teoria do Dano Contínuo Viscoelástico e sua simplificação (S-VECD), avalia-se a relação entre uma variável de estado interna do material (C) e a evolução do dano causado (S), considerando a estrutura homogênea e contínua na análise do fenômeno de fadiga em microescala (Smith & Hesp, 2000). Obtém-se assim a curva característica de dano para o material, a qual é independente do tipo e taxa de carregamento (Figura 2.8).

Em materiais viscoelásticos, a relação entre tensão e deformação não pode ser estabelecida por um parâmetro elástico tal como o módulo de Young, sem realizar uma compatibilização que considere os efeitos de fluência e relaxação, assim, ao substituir a tensão e deformação por pseudo-deformação e pseudo-tensão, elimina-se o efeito de histerese, transformando as análises em relações lineares semelhantes a lei de Hooke (Freire et al., 2017).

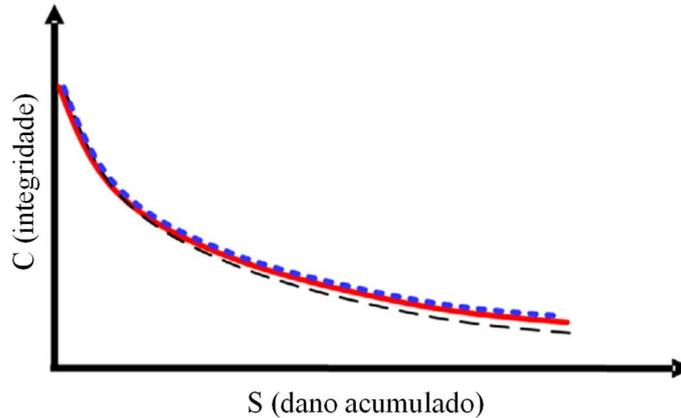


Figura 2.8 – Curva característica de dano (Adaptado de Kutay & Lanotte, 2018)

Diferentes critérios de ruptura foram propostos na literatura, de maneira a correlacioná-los com o número de ciclos até a ruptura e obter a vida de fadiga da mistura. Baseado na taxa de mudança média de pseudo-energia acumulada liberada, Sabouri & Kim (2014) propuseram a variável  $G^R$ , sendo necessária regressão linear dos resultados obtidos em pelo menos três amostras, em escala log-log.

Frente a variabilidade que os resultados podem apresentar com consequente efeito nos coeficientes de regressão devido a escala log-log, Wang & Kim (2017) propuseram um critério baseado na redução da pseudo-rigidez, denominado  $D^R$ , o qual descreve uma relação única entre o somatório de  $(1-C)$  com o número de ciclos até a ruptura. A escala aritmética dessa abordagem é sua principal vantagem, visto que reduz a sensibilidade à variabilidade. Além disso, nessa metodologia a envoltória passa pela origem, reduzindo a quantidade de coeficientes de regressão. Outro benefício ressaltado pelos autores é a possibilidade de utilização de apenas duas amostras para regressão linear com alto nível de confiabilidade.

Recentemente um novo parâmetro foi desenvolvido por Wang et al. (2020),  $S_{app}$ , o qual considera os efeitos de rigidez e tenacidade do material na resistência à fadiga. O  $S_{app}$  atua como um indicativo de capacidade de dano e leva em consideração o critério de ruptura do  $D^R$ , assim, quanto maior a resistência à fadiga, maior o valor obtido para esse parâmetro. Vale ressaltar que diversos autores têm empregado essas metodologias derivadas da teoria S-VECD para análise e classificação do concreto asfáltico quanto a susceptibilidade ao dano por fadiga (Freire et al., 2017; Kutay & Lanotte, 2018; Mello et al., 2018; Osmari et al., 2020), porém há uma lacuna acerca de misturas asfálticas com incorporação de PET.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente tópico descrevem-se os materiais que foram empregados no desenvolvimento da pesquisa, apresentando resumidamente o programa experimental delineado para cumprimento dos objetivos, com subsequente detalhamento das etapas metodológicas.

Para atingir os intentos previstos, o programa experimental foi organizado em três etapas, correspondentes a caracterização, volumetria, e ensaios mecânicos e microestruturais, conforme descrito na Figura 3.1. Vale pontuar que a maioria dos ensaios foram executados no Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB) da Universidade de Brasília – UnB, somente mencionando-se locais para execução de procedimentos experimentais externos.

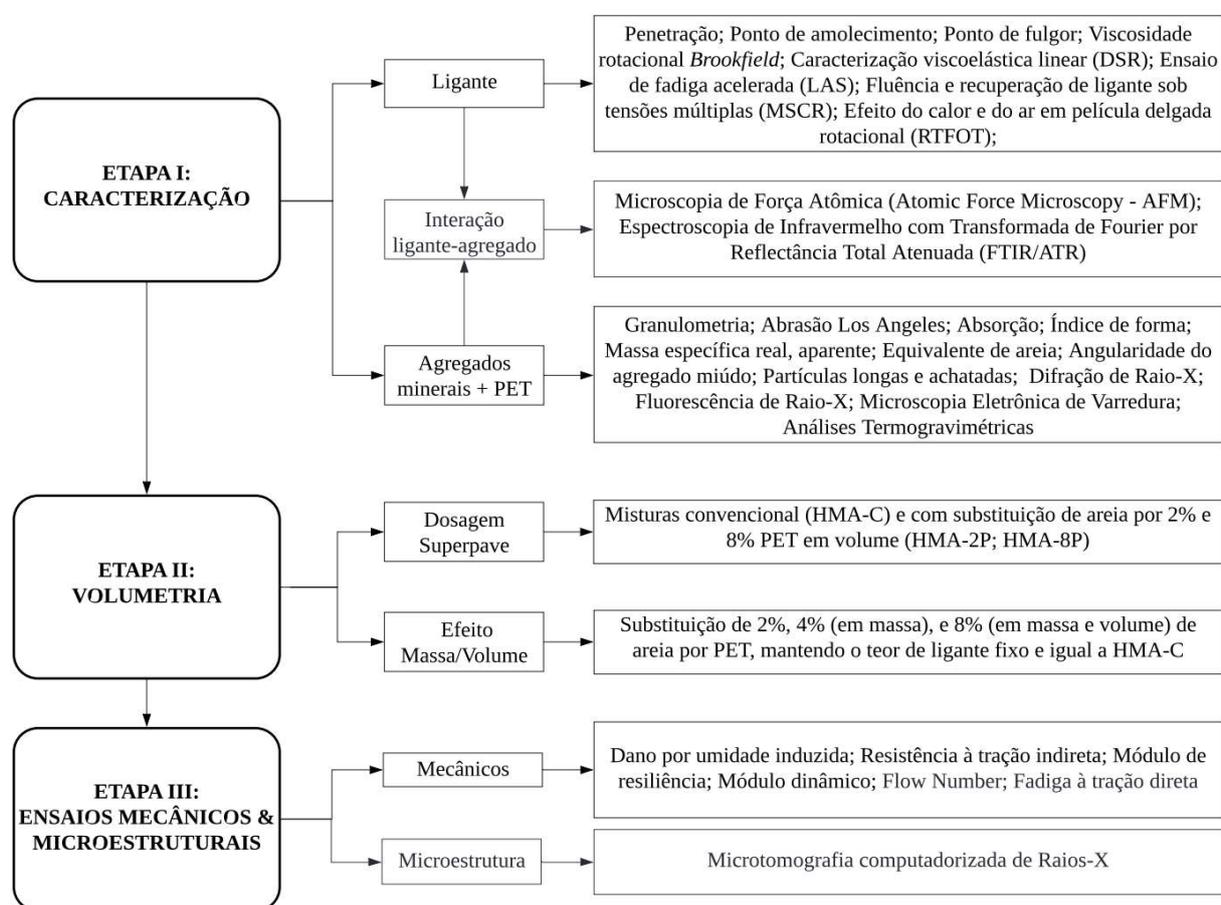


Figura 3.1 – Etapas do Planejamento Experimental

#### 3.1 MATERIAIS

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70, fornecido pela empresa Centro Oeste Asfaltos. Sua escolha se deu com base em projetos executados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) na região de estudo – Brasília/DF, assim como de pesquisas desenvolvidas no INFRALAB, tais como Lopes et al. (2020), Oliveira Junior e Farias

(2020), de modo a permitir análises comparativas e, para além dos trabalhos já mencionados, Coutinho et al. (2013), Freire et al. (2017), Osmari et al. (2020b), entre outros.

Assim como o ligante, foram utilizados agregados provenientes da localidade, originários de rocha calcária, cedidos pela Pedreira CIPLAN (Brita 1 e Brita 0), Pedreira Contagem (Pó de Pedra) e BRACAL (Areia natural), de maneira a se obter composição granulométrica concordante com a faixa C do DNIT 031 (2006) utilizada em projetos de pavimentação na região, e com a metodologia de dosagem SUPERPAVE para o Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,0 mm.

Para substituição parcial e total da areia natural foi utilizado o Polietileno Tereftalato (PET) micronizado, resultante do processo de reciclagem de garrafas PET, com partículas passantes na peneira 0,42 mm, fornecidos pela MICROPET Beneficiamento de Termoplásticos Ltda (Figura 3.2). Salienta-se que a micronização está relacionada ao tamanho da partícula resultante do processo físico de redução do plástico.

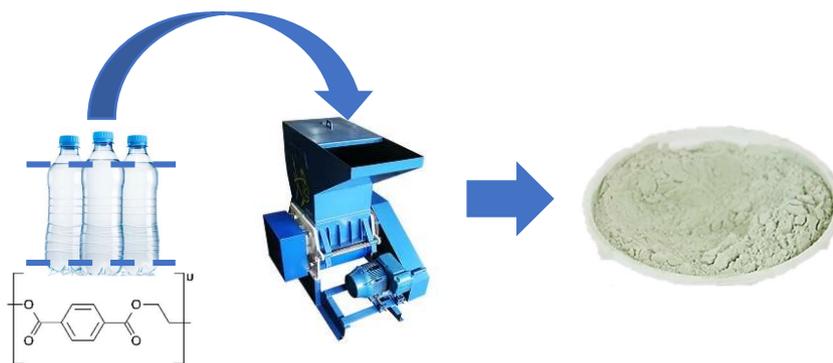


Figura 3.2 – Processo de beneficiamento do PET reciclado

De maneira geral, a obtenção do PET micronizado se dá inicialmente pela coleta e limpeza das garrafas PET, acompanhada pela remoção da etiqueta, topo e base. A seguir o material é triturado em diferentes lâminas, obtendo-se material na forma de *flakes*. No passo subsequente ocorre a aglomeração dos *flakes* acompanhado de processamento térmico com a finalidade de reduzir o volume e aumentar a densidade. Por fim, é feita a moagem do material (moinho de facas) e micronização (moinho de bolas).

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO CONVENCIONAL DOS AGREGADOS

Por efeito da importância das características dos materiais no desempenho mecânico apresentado por eles, optou-se por mesclar normativas preconizados pelo DNIT, ASTM

(*American Society for Testing and Materials*) e AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), de maneira a complementar o horizonte investigativo.

A caracterização dos agregados minerais graúdos e miúdos, bem como o PET, englobou os ensaios de granulometria (DNER ME 083, 1998), abrasão Los Angeles (DNER ME 035, 1998), absorção e massa específica do agregado graúdo (ASTM C 127, 2007), partículas longas e achatadas (ASTM D 4791, 2019), índice de forma (DNER ME 086, 1994), equivalente de areia (DNER ME 054, 1997), angularidade do agregado fino (ASTM C 1252, 2017), e densidade real dos agregados miúdos (DNER ME 084, 1995).

Vale ressaltar que a determinação da massa específica real do PET foi realizada por meio de analisador automático de densidade (pentapicnômetro), da marca Quantachrome Instruments e modelo PENTAPYC 5200e, devido ao comportamento hidrofóbico apresentado pelo material. Seguindo rotina de ensaio estabelecida pelo Laboratório de Geotecnia (UnB), a partir da pesagem de quantidade representativa de material (15 g), a amostra foi depositada em cápsula e levada ao aparelho. Por meio da injeção de gás hélio são preenchidos os vazios, sendo o volume ocupado pelo agregado reciclado calculado pela diferença do volume de gás injetado.

### **3.2.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA, TÉRMICA E ESTRUTURAL**

Além dos ensaios convencionalmente empregados, buscou-se identificar características mineralógicas, químicas e estruturais dos agregados Brita, Pó de Pedra, Areia Fina e PET, a fim de possibilitar uma compreensão mais aprofundada do efeito da substituição de agregado mineral por agregado plástico reciclado. Para este fim, foram utilizadas amostras secas em estufa à 110 °C e passantes na peneira de 75µm.

Os ensaios de Difração de Raios-X (DRX) foram conduzidos a fim de caracterizar os materiais por sua cristalinidade, empregando Difratorômetro Rigaku modelo Ultima IV do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), com amplitude angular  $2\theta$  e faixa de medição de 2-100°, sob tensão de 35kV e 15mA. A identificação mineral foi baseada em padrões de referência do banco de dados do software JADE 9.0.

A composição química dos agregados foi realizada por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (XRF/EDX) em Espectrômetro Shimadzu EDX 720HS na Central Analítica do Instituto de Química da UnB (CAIQ/UnB), utilizando tubos de raios X com ânodo de ródio (Rh).

A análise termogravimétrica (TGA/DTG) foi conduzida no modelo Shimadzu DTG-60H, na CAIQ. Os experimentos foram realizados em atmosfera inerte ( $N_2$ ), com taxa de aquecimento de  $10^\circ C/min$  e vazão de gás de  $30 ml/min$ , da temperatura ambiente até  $800^\circ C$  em cadinho de platina.

Por fim, a análise microestrutural dos agregados foi feita em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo Zeiss EVO MA10, no Laboratório Multiusuário da Universidade Federal de Uberlândia, operado sob uma tensão de aceleração de  $5kV$ . Para ensaiar as amostras em pó foi necessário realizar pré-revestimento com fina camada de ouro no equipamento Leica EM SCD050, a fim de melhorar a condutividade e permitir a análise.

### 3.2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E REOLÓGICA DO LIGANTE

A caracterização física do ligante foi compreendida pelos ensaios de densidade real (DNER ME 193, 1996), penetração (DNIT 155, 2010), ponto de amolecimento (DNIT 131, 2010), viscosidade rotacional com uso do equipamento *Brookfield* (ASTM D 4402, 2015), ponto de fulgor (ABNT NBR 11341, 2014), e envelhecimento por efeito do calor e do ar em película delgada rotacional (Figura 3.3), denominado também de *Rolling Thin Film Oven Test* – RTFOT, à temperatura de  $163^\circ C$  (AASHTO T 240, 2013).



Figura 3.3 – Ensaio de RTFOT: a) preparação das amostras; b) ensaio em execução

A caracterização reológica se deu com utilização do reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer – DSR*), da marca Anton Paar, modelo SmartPave MCR-102 (Figura 3.4a), considerando o ligante na condição virgem e envelhecida pelo RTFOT. Para ensaios com temperaturas entre  $-30^\circ C$  e  $40^\circ C$ , amostras com  $8 mm$  de diâmetro e  $2 mm$  de

espessura foram moldadas, ao passo que acima de 40°C foram utilizadas espécimes com 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura (Figura 3.4b).

O reômetro consiste de uma placa inferior fixa e uma placa superior que oscila, permitindo aplicar e medir o torque e o ângulo de deflexão (Figura 3.4c). Nesse sentido, foram obtidos valores de módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) e ângulo de fase ( $\phi$ ) à deformação controlada ( $\epsilon_0$ ) de 0,1% para frequências angulares de 1,0 à 100 rad/s (0,159 à 15,9 Hz), em cada uma das temperaturas ensaiadas (16, 22, 28, 34, 46 e 52°C), de maneira a possibilitar a construção da curva mestra com base no modelo sigmoidal, empregando três réplicas para cada condição experimental (ASTM 7175, 2015).

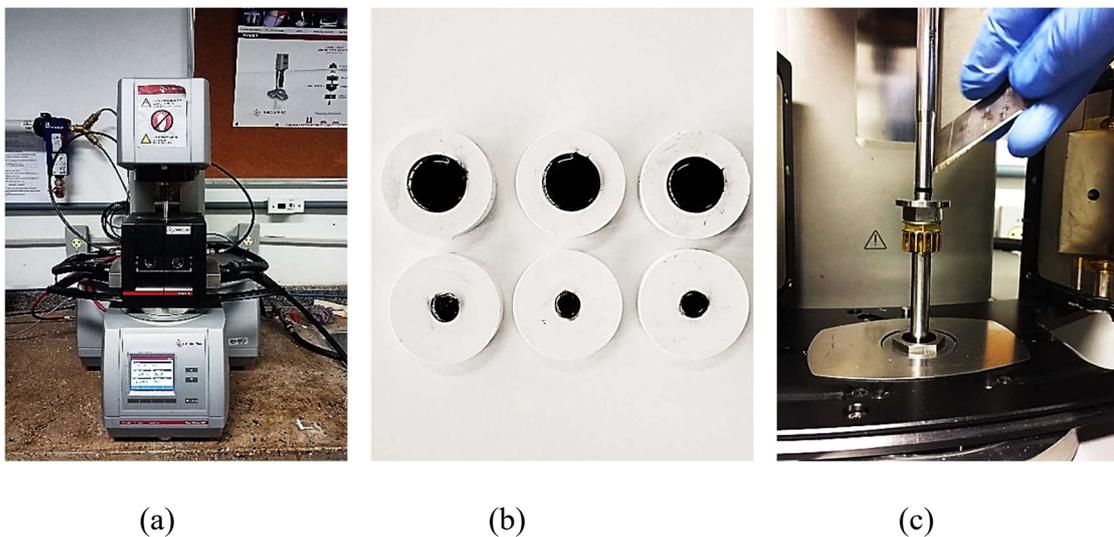


Figura 3.4 – Componentes para execução dos ensaios de caracterização reológica: a) reômetro; b) amostras com 8 e 25 mm de diâmetro; c) conjunto de placas inferior e superior do DSR

### 3.2.4 INTERAÇÃO ENTRE LIGANTE E AGREGADO

A interação entre os agregados de interesse (areia natural e PET) e o ligante foi realizada a fim de compreender o mecanismo de interação e avaliar o efeito da substituição de agregado mineral por agregado polimérico na adesividade. Para cumprir esse intento, ensaios de Microscopia de Força Atômica – *Atomic Force Microscopy (AFM)* e Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflectância Total Atenuada – *Fourier transformed infrared with attenuated total reflectance (FTIR/ATR)* foram conduzidos.

A AFM é uma ferramenta de imagem não destrutiva que fornece informações sobre a morfologia da superfície dos materiais, rigidez e viscosidade em nível micro (Wu et al., 2021). O uso do AFM na pavimentação foi iniciado com o estudo de ligantes asfálticos, promovendo avanços na compreensão de suas propriedades micro reológicas. Outra aplicação bastante inovadora que tem sido feita é a avaliação da adesividade dos materiais, com base nas forças

fundamentais de atração e retração desenvolvidas a partir da ponta do AFM e da superfície do material (Li et al., 2015; Mistry & Kumar Roy, 2021; Moura et al., 2020; M. Xu et al., 2016).

No presente estudo, a AFM foi utilizada para quantificar as forças de adesão dos mástiques de areia natural e PET por meio do trabalho de adesão. Conforme detalhado por Moura et al. (2020), o princípio de funcionamento do ensaio consiste na aproximação da ponta acoplada a uma haste – cantiléver (caminho A-B-C) e afastamento (C-D-E). No início do ensaio, a ponta permanece distante da amostra (A), sendo submetida a forças de atração a medida em que se aproxima da superfície do material (B). Durante a retração, a ponta permanece em contato com a amostra devido a forças adesivas (D), até que essa seja superada e a ponta retorne a sua posição inicial (E). Pela análise gráfica é possível obter a magnitude do trabalho da força de adesão, equivalente numericamente a área que o gráfico de retração forma com a distância entre ponta e amostra. O esquema de ensaio está retratado na Figura 3.5.

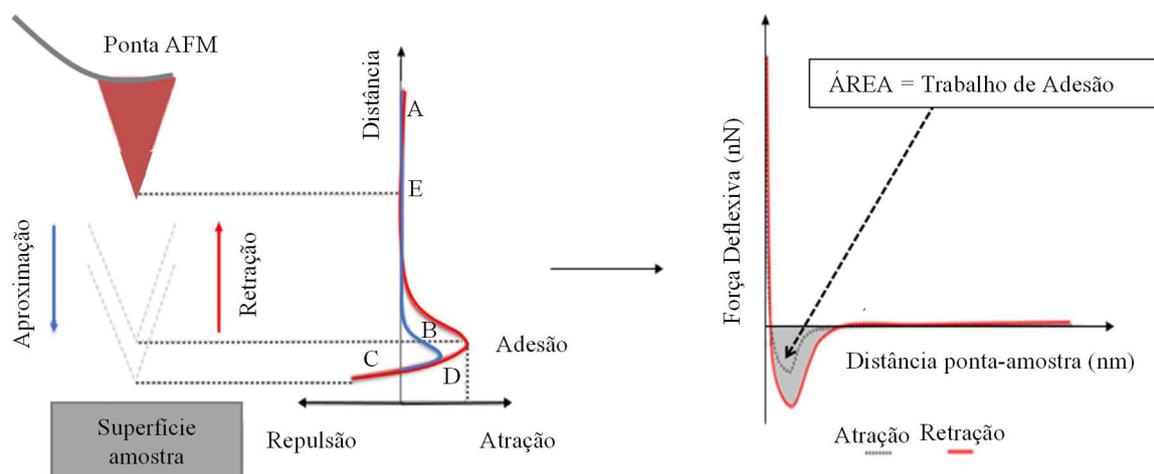


Figura 3.5 – Princípio do ensaio. Fonte: Adaptado de Moura et al. (2020)

Testes prévios foram realizados para determinar a quantidade satisfatória de ligante para recobrir o filer e possibilitar a moldagem de uma amostra cilíndrica de 20 mm de diâmetro e aproximadamente 10 mm de altura, resultando em uma relação filer/ligante (f/b) de 2,5. O procedimento experimental seguiu o aquecimento, mistura e compressão dos materiais em um molde de 20 mm de altura e diâmetro. A massa de filer foi fixada e o teor de ligante foi calculado em relação ao volume de agregado.

A superfície da amostra foi polida (Figura 3.6a) e o mástique foi analisado em Nanosurf FlexAFM (Figura 3.6b), submetido a uma carga aplicada pela ponta de silicone (TAP 190 AI-

G) de constante de força de 28–75 N/m, e frequência de ressonância de 160– 220kHz, no laboratório de Interface e Nanodispositivos Semicondutores do Instituto de Física da UnB.

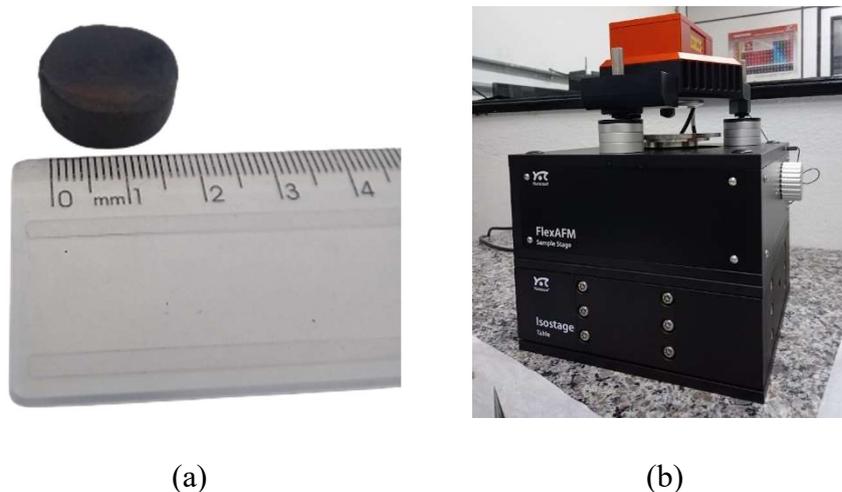


Figura 3.6 – Ensaio AFM: a) Detalhe da amostra; b) Equipamento

Para os ensaios de FTIR, os filers, ligante e mástiques foram caracterizados diretamente, pois a técnica não requer a preparação de *tablets* de brometo de potássio (KBr). Após o teste e resfriamento dos mástiques, conforme descrito anteriormente, as amostras foram quebradas e uma pequena porção foi utilizada no teste.

Os ensaios foram conduzidos em espectrômetro de infravermelho Frontier FTIR/ATR, modelo Spectrum II da PerkinElmer (Figura 3.7), o qual utiliza cristal de diamante com suporte de seleneto de zinco, no Laboratório de Tratamento de Águas e Resíduos (LABTAR) da Universidade Estadual de Londrina. Os espectros foram adquiridos com resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$  e foram realizadas 32 varreduras por amostra na faixa de espectro de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $500\text{ cm}^{-1}$ .

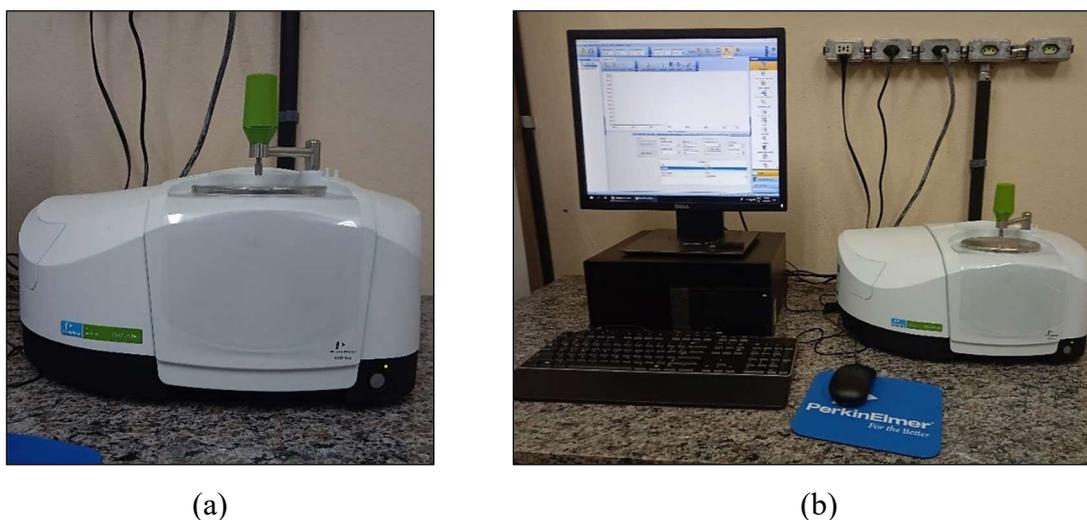


Figura 3.7 – Ensaio FTIR: a) Equipamento utilizado; b) Sistema de aquisição

### 3.3 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

A definição da curva granulométrica densa convencional foi realizada com traço fracionado, de maneira a satisfazer a faixa C do DNIT 031 (2006) e os pontos de controle da metodologia SUPERPAVE para o Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,0 mm, bem como apresentar distribuição semelhante as curvas empregadas em projetos locais, conforme relatórios técnicos cedidos pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF).

A presença de areia para compor a curva na faixa C se faz necessária devido ao pequeno percentual de finos presentes nos agregados oriundos da região do Distrito Federal, sendo prática vigente na localidade em que a pesquisa está inserida. Em geral, o percentual que a parcela de areia perfaz na composição de agregado é de aproximadamente 10%, motivando o foco do trabalho apenas na substituição de areia por PET. Além da problemática ambiental associada a extração de areia, exposta anteriormente, ao se delimitar a pesquisa com a substituição de apenas um material, tem-se apenas uma variável no delineamento experimental, facilitando o entendimento das matrizes e o estabelecimento de tendências.

Testes foram realizados a fim de verificar o máximo percentual de substituição da parcela de areia por PET reciclado no Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), possibilitando incorporar até 8% de PET sem afetar a curva de distribuição granulométrica convencional.

As misturas asfálticas densas foram dosadas segundo a metodologia SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*), em que a compactação foi realizada por amassamento, empregando compactador giratório Troxler modelo 5850 (Figura 3.8a), configurado para apresentar ângulo de giro de  $1,25 \pm 0,2^\circ$ , rotação de 30 giros por minuto e pressão vertical de 600 kPa. Baseado no nível I, em que são considerados apenas parâmetros volumétricos, foi realizada a dosagem para tráfego médio à alto, tendo como  $N_{inicial}$ ,  $N_{projeto}$  e  $N_{máximo}$  8, 100 e 160 giros, respectivamente, em molde de 150 mm de diâmetro, a fim de determinar o teor de ligante correspondente a uma densificação da mistura com 4% de volume de vazios (Vv). Complementarmente, foram determinados também os parâmetros de vazios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazios (RBV).

A partir da determinação das faixas de temperaturas de mistura e compactação com base na viscosidade rotacional do ligante asfáltico (ASTM D 4402, 2015; ASTM D 6925, 2015), assim como temperatura dos agregados 15 °C acima da faixa de mistura, os materiais foram

homogeneizados em misturador mecânico, a 40 rotações por minuto durante 2 minutos, tempo esse necessário para que visualmente o ligante recobrisse toda a superfície dos agregados.

Anteriormente a fase de compactação, as misturas soltas foram envelhecidas à curto prazo na temperatura de compactação pelo período de 2 horas. Finalmente, os corpos de prova foram compactados em duplicata para cada um dos quatro teores de ligante, tendo como teor estimado 4,5% e adotando variações de  $\pm 0,5\%$  e  $+1\%$  (Figura 3.8b).

Os corpos de prova com 150 mm de diâmetro foram cortados e extraiu-se do centro corpos de prova com 100 mm de diâmetro, de forma a representar a densificação das misturas de forma mais realística, calculada por meio da massa específica aparente ( $G_{mb}$ ), ao passo que a densidade máxima medida ( $G_{mm}$ ) foi determinada pelo método de *Rice* (ASTM D 2041, 2011).

Com a definição do teor de ligante para a mistura convencional (HMA-C), foram moldados corpos de prova com volume de vazios de  $7 \pm 1\%$ , para avaliação da sensibilidade da mistura quanto ao dano por umidade induzida, segundo a norma DNIT 180 (2018) (Figura 3.8c). Dos seis corpos de prova moldados, três foram submetidos a uma fase de condicionamento, envolvendo saturação parcial, congelamento a  $-18 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 16 h, banho-maria a  $60 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 h, seguido de banho-maria a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 2 h, antes do ensaio de Resistência à Tração Indireta (RT). O segundo conjunto de corpos-de-prova foi submetido ao ensaio de RT sem condicionamento após duas horas de estabilização a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Os ensaios foram realizados sob uma taxa de deslocamento de  $0,8 \text{ mm/s}$  em equipamento modular eletromecânico (AsphaltQube), e a razão de resistência à tração retida (RRT) foi obtida entre os resultados de RT do conjunto condicionado e controle, sendo um indicador de susceptibilidade à umidade.

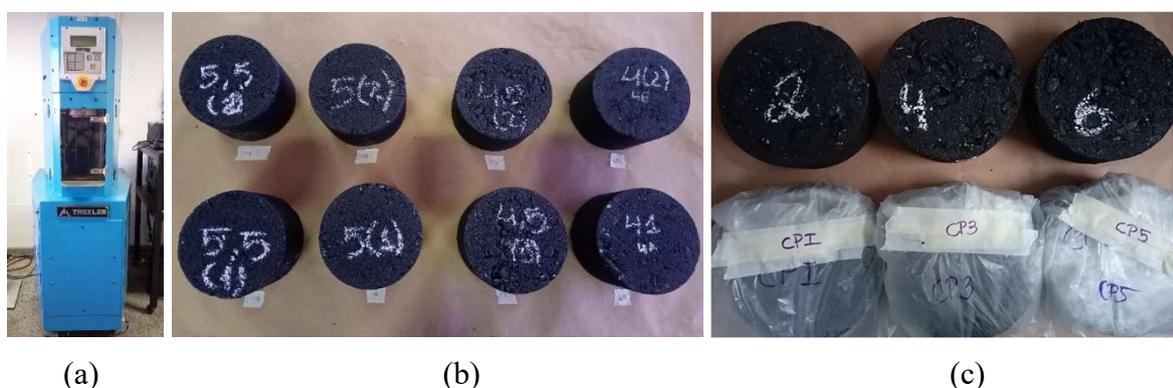


Figura 3.8 – Dosagem SUPERPAVE: a) compactador giratório; b) corpos de prova moldados pra dosagem; c) corpos de prova para ensaio de dano por umidade induzida

Se tratando das misturas asfálticas com substituição de areia por PET (HMA-P), devido à falta de estudos acerca da influência da substituição de agregado mineral por PET reciclado em massa e/ou volume nos parâmetros volumétricos e comportamento mecânico, primeiramente buscou-se compreender esse efeito frente à teores crescentes de polietileno tereftalato reciclado, adotando 2, 4 e 8% de incorporação, em massa e volume, empregando o mesmo teor de ligante definido para a mistura convencional. A partir dessa análise prévia, adotou-se 2 e 8% de substituição de PET em volume, e foram realizadas novas dosagens, seguindo todos os procedimentos mencionados anteriormente, em que o PET foi separado e aquecido junto aos agregados minerais, para posterior mistura com ligante e compactação.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as condições experimentais e denominações das misturas.

Tabela 3.1 – Condições experimentais e abreviações adotadas

Mistura	Descrição
HMA-C	Mistura convencional no teor de ligante de projeto
2M	PET substituindo 2% de areia em massa
4M	PET substituindo 4% de areia em massa
8M	PET substituindo 8% de areia em massa
8V	PET substituindo 8% de areia em volume
HMA-2P	PET substituindo 2% de areia (vol.) no teor de ligante de projeto
HMA-8P	PET substituindo 8% de areia (vol.) no teor de ligante de projeto

### 3.4 MICROTOMOGRRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X

A análise da microtomografia de raios-X ( $\mu$ CT) é uma poderosa técnica microestrutural, por ser não invasiva, não destrutiva, e gerar modelo tridimensional, permitindo análises e propriedades qualitativas-visuais, como a porosidade (Partl et al., 2007; Plessis & Boshoff, 2019; Xu et al., 2016; Zhao et al., 2021).

Para avaliar o efeito PET na microestrutura do concreto asfáltico, corpos de prova adicionais das misturas HMA-C, 8M, HMA-2P, HMA-8P foram moldadas, seguindo o mesmo processo de compactação e exigência de volume de vazios ( $4 \pm 1\%$ ). Os corpos de prova foram cortados ao meio, e três plugues de aproximadamente 1 polegada de altura e diâmetro (25,4 mm) foram extraídos de cada lado para selecionar aquele mais representativo da volumetria do todo (Figura 3.9).

As amostras foram analisadas em microtomógrafo SkyScan 1172 da Bruker, com a aquisição de 841 imagens. O tempo de exposição foi de 3150 ms, utilizando um filtro de

alumínio de 0,5 mm. A resolução de imagem foi de 6,79  $\mu\text{m}$ , com tensão e corrente elétrica de 80 kV e 124  $\mu\text{A}$  para todos os materiais investigados. A reconstrução do modelo tridimensional foi realizada no software NRecon.

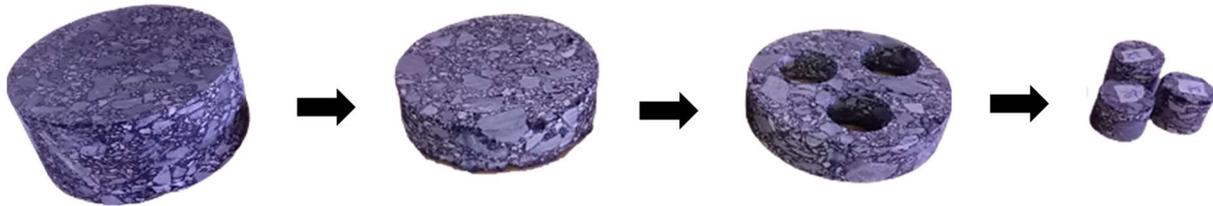


Figura 3.9 – Processo de extração de amostra de mistura asfáltica para  $\mu\text{CT}$

Vale ressaltar que o tamanho dos plugues foi estabelecido com base na máxima dimensão permitida pelo equipamento. Ainda assim, a consistência das variáveis investigadas, como a distribuição de poros e distribuição de PET na mistura, foi assegurada a partir de pré-testes. Como observado por Xu et al. (2016), a resolução da imagem diminui com o aumento do diâmetro da amostra.

### 3.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Com o intuito de avaliar o efeito da inserção de PET no comportamento mecânico da mistura asfáltica a partir de parâmetros fundamentais de projeto e refinar as condições experimentais a serem investigadas na sequência, foram executados ensaios de resistência à tração indireta – RT e módulo de resiliência – MR (Figura 3.10) para todas as condições apresentadas na Tabela 3.1, segundo as normas DNIT 135 (2018) e DNIT 136 (2018).

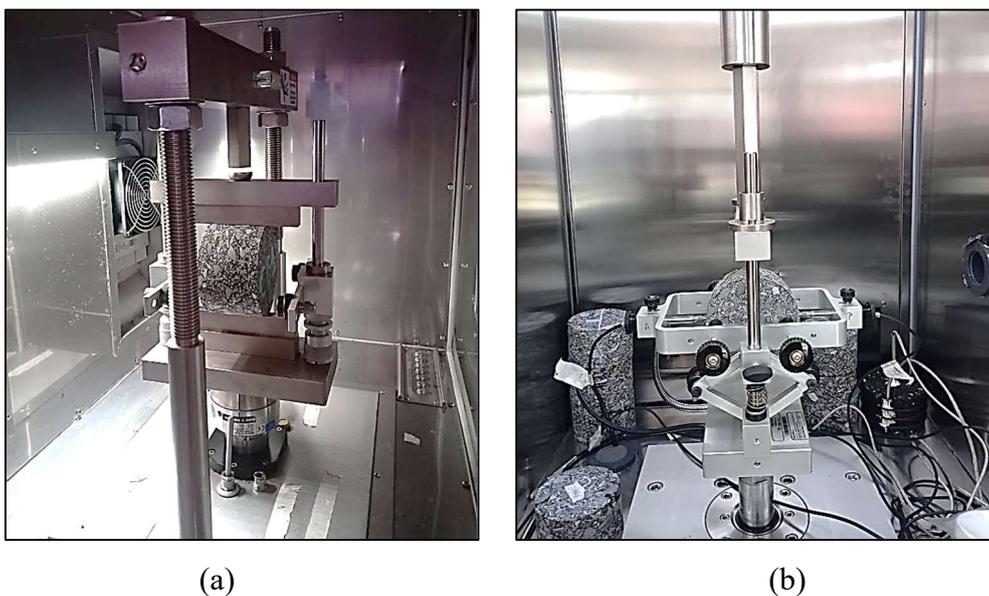


Figura 3.10 – Equipamentos utilizados para os ensaios de: (a) RT; (b) MR

Para ambos ensaios, corpos de prova em triplicata foram moldados com volume de vazios de  $4 \pm 1\%$  e ensaiados em equipamento servo-hidráulico *Dynamic Testing System DTS-30* no Laboratório de Pavimentação do DER/DF, após período de 2 h para equilíbrio de temperatura à  $25^\circ\text{C}$ . Considerando os ensaios de MR, o carregamento aplicado foi do tipo *haversine*, com aplicação de carga por 0,1 segundo e período de repouso de 0,9 segundos. Os primeiros 50 ciclos de pulso de carga foram realizados para condicionar a mistura, seguidos de 15 pulsos para análise dos dados, em que a carga repetida correspondeu a 10% da resistência à tração indireta das misturas.

### 3.6 CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA LINEAR

Foram conduzidos ensaios de módulo dinâmico nas misturas dosadas no teor de ligante de projeto (HMA-C, HMA-2P, HMA-8P), a fim de analisar a resposta viscoelástica linear ocasionada pela presença do plástico reciclado (Figura 3.11). A partir de amostras compactadas com 170 mm de altura e 150 mm de diâmetro, foram extraídos corpos de prova com 150 mm x 100 mm, com volume de vazios de  $5,5 \pm 0,5\%$  (AASHTO T 342, 2019). Os ensaios foram executados em triplicata para cada condição experimental, empregando equipamento modular eletromecânico (AsphaltQube), a partir de distintas temperaturas de ensaio (5; 10; 20; 25; 35  $^\circ\text{C}$ ) e frequências (25; 10; 5; 1; 0,5; 0,1 Hz), a fim de obter os parâmetros de módulo complexo dinâmico ( $|E^*|$ ) e ângulo de fase ( $\varphi$ ), possibilitando a construção das curvas mestras, aplicando o princípio da superposição tempo-temperatura com base no modelo sigmoidal.

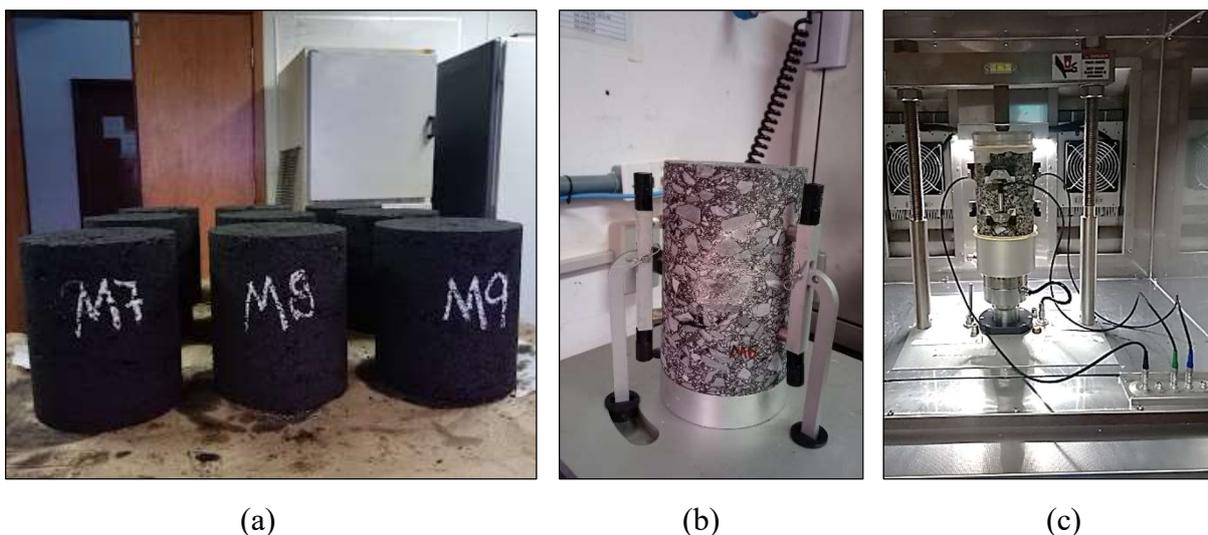


Figura 3.11 – Sequência para ensaio de MD: a) moldagem; b) colagem dos targets; c) ensaio

### 3.7 FADIGA

O estudo da fadiga das misturas convencional e com substituição parcial e total de areia por PET foi conduzido a partir de ensaio de fadiga à tração direta uniaxial cíclico, segundo a norma AASHTO TP-107 (2014) no equipamento AsphaltQube.

Inicialmente os corpos de prova foram compactados no compactador giratório Superpave, sendo obtidas amostras com 170 mm de altura e 150 mm de diâmetro, as quais foram broqueadas, resultando altura de 130 mm e diâmetro de 100 mm, com volume de vazios de  $5,5 \pm 0,5\%$ . Este procedimento teve como objetivo tornar mais homogêneo a distribuição do volume de vazios na amostra.

Por ser uma metodologia em implementação no Laboratório de Infraestrutura, diversos testes foram feitos até que se estabelecesse um procedimento padrão. Posteriormente a etapa de extração do corpo de prova foi necessário regularizar as superfícies de topo e base, a fim de garantir sua planicidade. Nas etapas seguintes sucedeu-se a colagem dos posicionadores (targets) dos LVDT's no corpo de prova com utilização de cola adesiva epóxi de secagem rápida (Araldite® 10 minutos) (Figura 3.12a), e colagem das bases metálicas de topo e base com cola estrutural de base epóxi de baixa fluidez (Vedacit® compound), os quais ficaram em repouso pelo período de 24h (Figura 3.12b).

Os corpos de prova resultantes dessa preparação foram condicionados à 20 °C pelo período de quatro horas com o intuito de assegurar o equilíbrio de temperatura no interior das amostras, sendo realizada a montagem do corpo de prova no equipamento, com a fixação das bases nos pratos da prensa e posicionamento dos três LVDT's a 120° na fase seguinte (Figura 3.12c). As informações de entrada inicial no *software* são agrupadas nas características da amostra, como medidas de altura e diâmetro, assim como as configurações de procedimento, em que se menciona a frequência (10Hz), temperatura de ensaio (20°C), modo de controle do ensaio (tensão-compressão) e microdeformação ( $\mu\epsilon$ ) aplicada.

Na primeira fase de ensaio foram conduzidos ensaios denominados *fingerprint*, cujo intuito é obter o módulo dinâmico em função das características individuais de cada corpo de prova, a partir de deformação controlada e entre 50  $\mu\epsilon$  e 75  $\mu\epsilon$ , para obter a resposta no regime linear viscoelástico sem induzir a mistura ao dano. Posteriormente a essa verificação e período de repouso de 25 minutos, iniciou-se o ensaio de fadiga por tração direta, em que foram adotados valores de deformação entre 100  $\mu\epsilon$  e 220  $\mu\epsilon$ , em função das características das misturas e ensaios previamente realizados.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.12 – Ensaio de tração direta: a) colagem dos targets; b) colagem das bases metálicas; c) Montagem; d) ruptura no terço médio; e) amostra rompida; f) ruptura no terço inferior;

A aplicação dessa metodologia prevê que ocorra a ruptura do corpo de prova em seu terço médio (Figura 3.12d e Figura 3.12e). Assim, corpos de prova em que a ruptura se deu nos terços superior ou inferior (Figura 3.12f) foram descartados.

Os resultados obtidos foram utilizados para gerar as curvas características de dano, a partir da teoria do dano contínuo viscoelástico e sua simplificação (S-VECD) por meio da planilha eletrônica FLEXMat automatizada desenvolvida por pesquisadores da *North Carolina State University* e disponível na página eletrônica da *Federal Highway Administration* do *U.S. Department of Transportation*.

### 3.8 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A avaliação da deformação permanente das misturas asfálticas foi realizada por meio de ensaio uniaxial de carga repetida em corpo de prova cilíndrico, a fim de obter o parâmetro denominado número de fluxo (*Flow Number* – FN).

A compactação, extração e volumetria das misturas seguiu o mesmo processo e parâmetros estabelecidos para as amostras ensaiadas para módulo dinâmico, a fim de permitir comparação direta entre os resultados. Assim, os ensaios de deformação permanente foram conduzidos em amostras com 150 mm de altura e 100 mm de diâmetro, apresentando volume de vazios de  $5,5 \pm 0,5\%$ .

O ensaio foi executado segundo a norma AASHTO T 378 (2017), empregando-se o equipamento modular eletromecânico (AsphaltQube) em teste não confinado. Inicialmente as misturas foram condicionadas à 60 °C pelo período de três horas. Pontua-se que a referida norma recomenda tempo de condicionamento mínimo de uma hora, sendo adotado no presente estudo maior período a fim de que futuramente possa-se comparar os resultados com a metodologia brasileira sem haver influência do tempo de condicionamento.

Na sequência foi aplicado carregamento *haversine*, com carga repetida de 600 kPa e carga de repouso de 30 kPa, com critério de parada de 20.000 ciclos ou deformação permanente acumulada de 5%. A curva de fluência e determinação do FN seguiu o modelo de Francken. O esquema de ensaio, adaptado de Zhang et al. (2013), bem como ilustração do corpo de prova ao término do ensaio estão retratados na Figura 3.13.

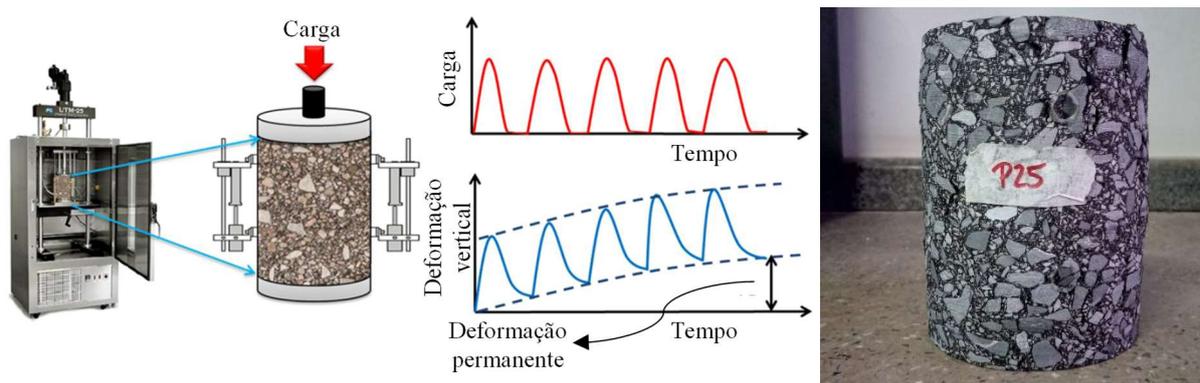


Figura 3.13 – Deformação permanente: a) Esquema de ensaio; b) Corpo de prova ao final

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este item é composto pelos resultados obtidos e sua discussão frente as possibilidades e limitações quanto a utilização de plástico reciclado via seca em mistura asfáltica densa (CBUQ). Como parte significativa do estudo de substituição de agregado mineral por agregado de PET reciclado, inicia-se com a caracterização dos agregados e ligante asfáltico, e sua interação. Na sequência, aborda-se o comportamento volumétrico das misturas e o reflexo na estrutura. O último tópico do capítulo é dedicado a discutir o comportamento mecânico, sob a ótica do dano por umidade induzida, resistência à tração, módulo de resiliência, módulo dinâmico, resistência à fadiga e resistência à deformação permanente.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

#### 4.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Na Tabela 4.1 é apresentada a caracterização dos agregados quanto à aplicação para a pavimentação. Além de observar que os materiais atendem as especificações de norma para todos os critérios, é importante ressaltar a diferença de densidade real entre a areia natural e o PET, de 2,662 g/cm<sup>3</sup> e 1,41 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Devido ao comportamento hidrofóbico do agregado reciclado, não foi possível realizar o ensaio de equivalente de areia.

Tabela 4.1 – Caracterização Física dos Agregados.

Ensaio	Norma	Valor			Especificação
		B1	B0		
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Real	2,757	2,745	-	
	Aparente	2,72	2,685	-	
	Aparente SSS	2,734	2,707	-	
Absorção (%)		0,491	0,814	-	
Abrasão Los Angeles (%)	DNER 035	15	15	Máx. 30	
Índice de Forma	DNER ME 086	0,9	-	Mín. 0.5	
Partículas Longas e Achatadas (5:1)	ASTM D 4791	2,7	4,5	Máx. 10	
		Pó	Areia	PET	
Densidade Real (g/cm <sup>3</sup> )	DNER ME 084	2,835	2,662	1,41	-
Angularidade	R40/P80	-	54,9	-	Mín. 45
	R80/P200	-	55,7	-	Mín. 45
Equivalente de Areia (%)	DNER ME 054	86	74	-	Mín. 55

As curvas granulométricas para cada um dos agregados utilizados estão apresentadas na Figura 4.1a. De maneira geral, a maior parte dos agregados retidos nas peneiras de 12,7 mm e 9,5 mm são provenientes da Brita 1, ao passo que nas peneiras de 4,75 mm e 2,00 mm são

oriundos da Brita 0. Os agregados de dimensão inferior a 2,00 mm foram provenientes de composição entre pó de pedra, areia natural e PET, quando aplicável. Já a mistura dos agregados para compor a curva de graduação densa do tipo CBUQ, cumprindo com os pontos de controle da metodologia SUPERPAVE para DMN de 19,0 mm e faixa C do DNIT, é apresentada na Figura 4.1b. O percentual máximo de substituição de PET na mistura é de 8%, de maneira a não afetar a curva convencional.

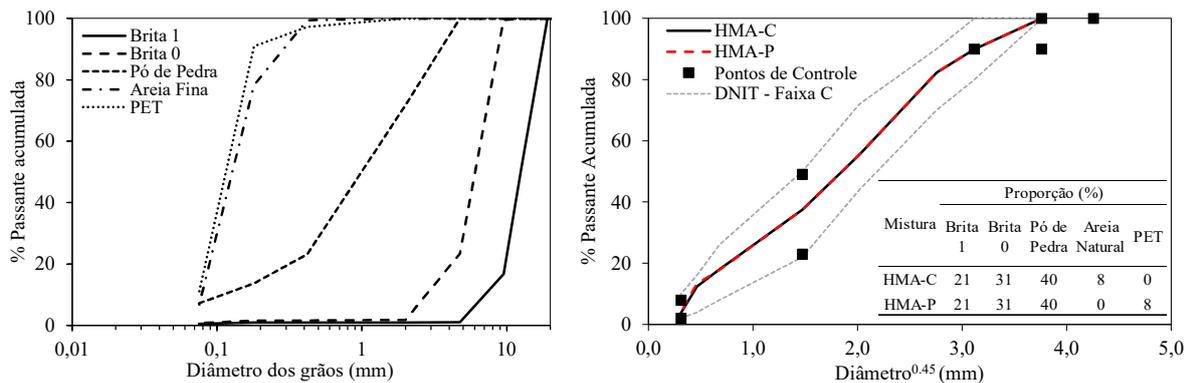


Figura 4.1 – Curva granulométrica: (a) agregados; (b) mistura

#### 4.1.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A Figura 4.2 apresenta os padrões de difração de raios-x (DRX) dos materiais usados no estudo, considerando os agregados minerais (Brita, Pó de pedra, Areia) e reciclado (PET).

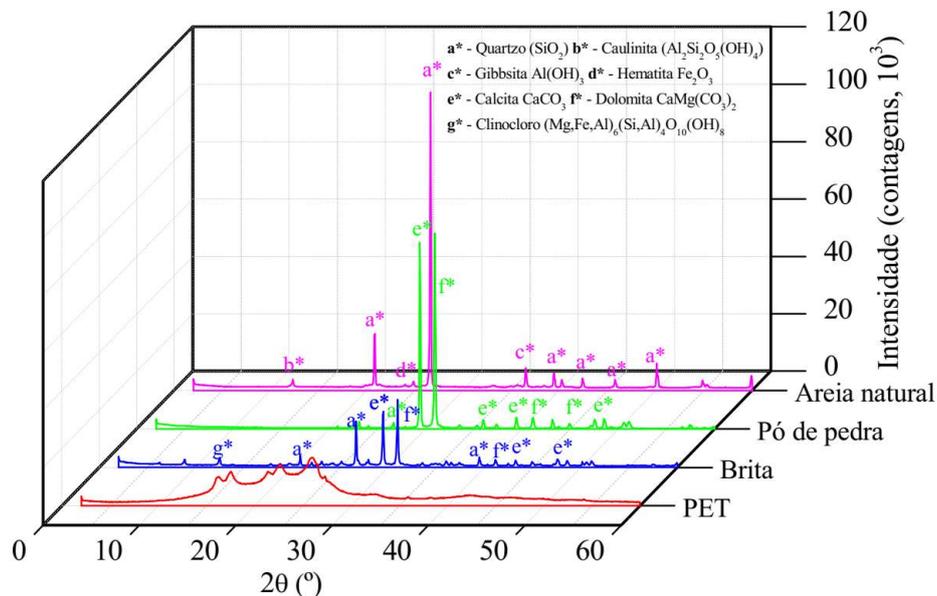


Figura 4.2 - Difrátogramas dos agregados minerais e reciclado empregados

Os agregados minerais demonstraram picos bem definidos, demonstrando uma estrutura cristalina, em que a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) e o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) são os

principais minerais que compõem a Brita, e o Pó de pedra, em concordância com autores anteriores que indicaram a origem calcária dos agregados provenientes da região de estudo (Lopes et al., 2020; Oliveira Junior & Farias, 2020). A areia natural, além da presença de quartzo (SiO<sub>2</sub>), demonstrou a presença de caulinita, gibsita, e hematita, devido ao processo de formação de solos tropicais lateríticos (Carvalho et al., 2015).

Em relação ao padrão de difração do polietileno tereftalato reciclado, pode-se observar bandas mais largas, indicando uma estrutura predominantemente amorfa com menor cristalinidade (Silva et al., 2019). Além disso, três picos cristalinos foram identificados, em aproximadamente  $2\theta = 17,0, 22,5$  e  $25,25^\circ$ , os quais Changmai et al. (2018) classificou como correspondentes a um espaçamento lateral na estrutura cristalina de 5,21, 3,49, 3,51 Å. Assim, podem ser observados três picos característicos do PET reciclado, referentes às fases monoclinica e ortorrômbica, e ao halo amorfo (Huang et al., 2012).

#### 4.1.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A composição química dos agregados minerais é mostrada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Composição Química dos Agregados

Agregado	Constituinte (%)								
	Ca	Si	Fe	Al	Mg	K	Ti	Sc	Ba
Brita	48,87	22,46	8,46	8,29	5,92	3,73	0,87	NI*	0,307
Pó de Pedra	83,857	3,113	1,266	1,024	8,959	0,491	NI*	0,91	NI*
Areia natural	0,153	64,312	20,022	13,301	NI*	0,435	0,81	NI*	0,573

\*NI – Não Identificado

Os elementos químicos identificados na espectrometria de fluorescência de raios-X estão de acordo com os resultados mineralógicos reportados anteriormente, em que a porcentagem de cálcio foi a mais representativa para o Pó de pedra (83,8 %), e Brita (48,8 %). Considerando a areia natural, o silício (64,3 %), ferro (20,0 %) e alumínio (13,3%) foram os principais elementos, dada a presença de quartzo, caulinita, gibsita e hematita. É importante mencionar que o ensaio não foi realizado no PET, uma vez que esta análise não identifica o carbono, principal elemento constituinte dos polímeros, o que ocasionaria uma caracterização imprecisa de sua composição.

#### 4.1.4 CARACTERIZAÇÃO TERMOGRAVIMÉTRICA

As curvas termogravimétricas estão representadas na Figura 4.3. Pode-se observar uma tendência semelhante nas temperaturas de degradação da Brita e Pó de pedra (Figura 4.3a e

Figura 4.3b), com um pico endotérmico em aproximadamente 750 °C, relacionado à reação de descarbonatação, ou seja, decomposição do CO<sub>2</sub> a partir do carbonato de cálcio, resultando em óxido de cálcio (CaCO<sub>3</sub> → CaO + CO<sub>2</sub>), conforme apontado por Trindade et al. (2011). Já para a areia natural (Figura 4.3c), obteve-se a menor perda de massa entre todos os materiais (3,73 %), em que foram observados dois picos pela DrATG. O primeiro pico é atribuído à perda de água da gibsita (220-260 °C), enquanto o segundo pico indica a perda de massa de caulinita, uma vez que as endotérmicas de desidroxilação ocorrem na faixa de 480 à 550 °C.

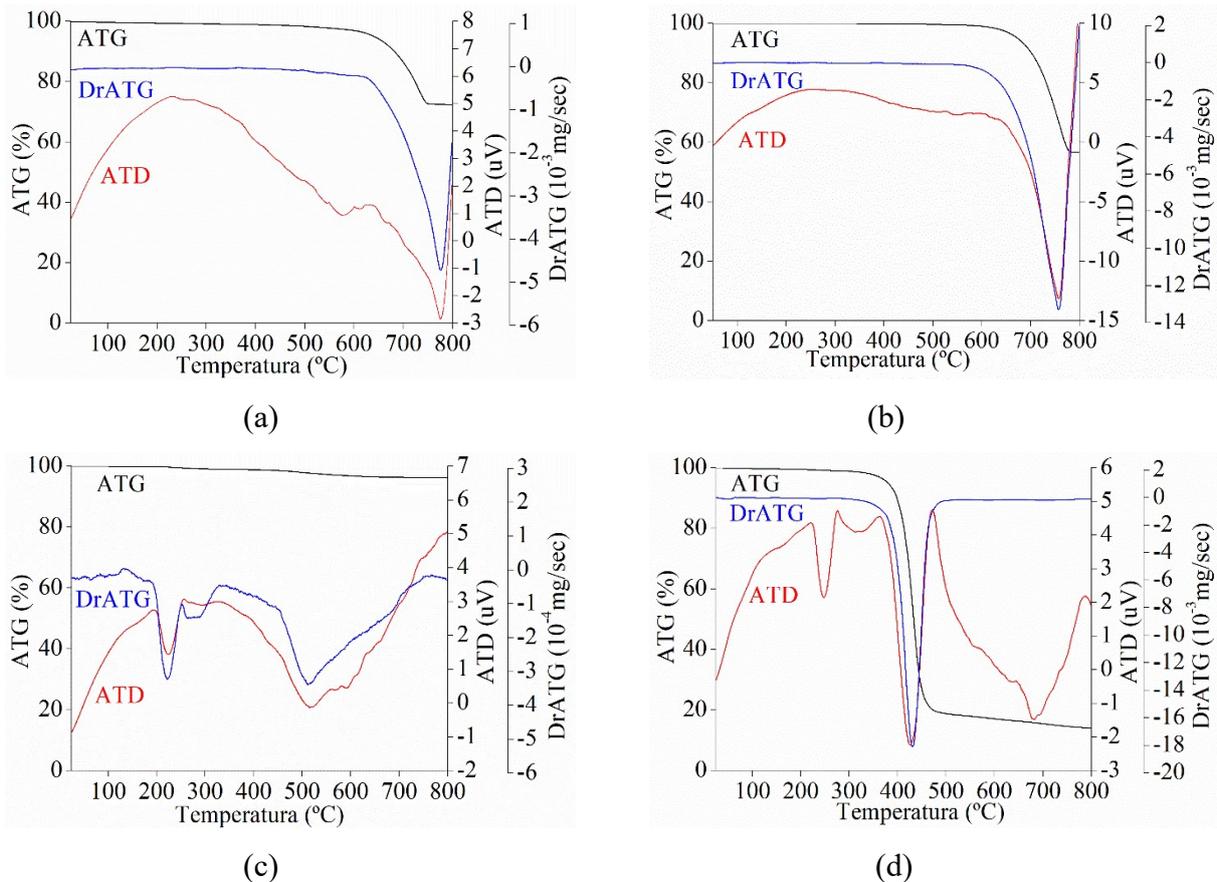
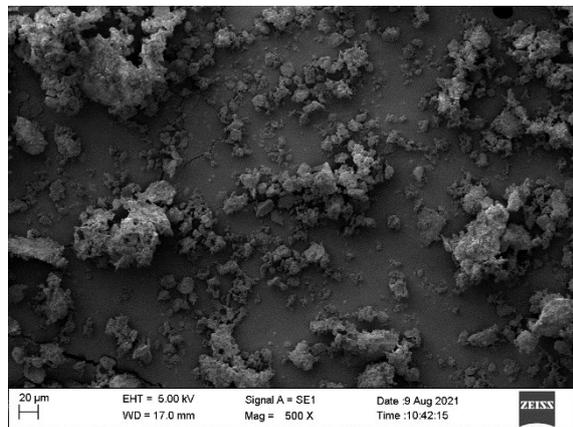


Figura 4.3 - Curvas termogravimétricas: (a) Brita; (b) Pó; (c) Areia; (d) PET

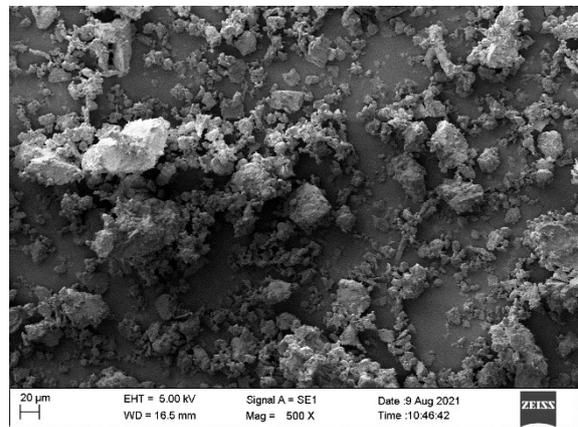
O PET reciclado foi o material mais suscetível à degradação (Figura 4.3d). O primeiro pico da ATD, a aproximadamente 250 °C, indica a ocorrência de fenômenos físicos que não envolvem degradação térmica, e demonstra o ponto de fusão do material, conforme indicado pela literatura (Girija et al., 2005; Samperi et al., 2004). Desse ponto de vista é possível demonstrar que o PET pode ser incorporado em misturas asfálticas, que envolvem temperaturas de até 200 °C, sem a ocorrência de degradação do material, a qual ocorre acima de 400 °C, devido à sua baixa condutividade térmica e alta estabilidade térmica, quando comparada a outros plásticos reciclados (Kazemi et al., 2021; Navarro et al., 2008; Yoshioka et al., 2004).

#### 4.1.5 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

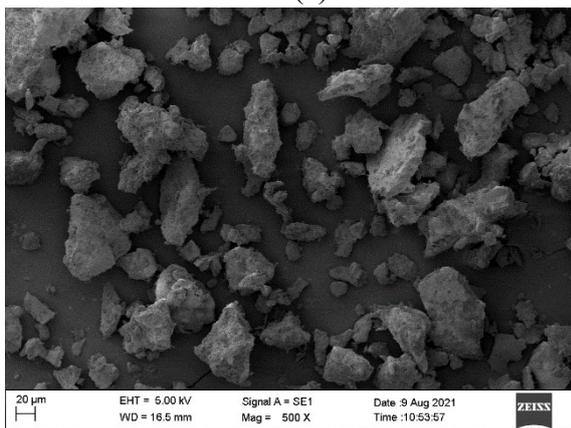
A Figura 4.4 mostra a morfologia dos materiais investigados por análise MEV. Em geral, todos os agregados na forma de filer demonstraram uma forma irregular com dissimilaridades nas dimensões. Em particular, os agregados minerais exibiram uma superfície mais rugosa, ao contrário da superfície mais lisa apresentada pelo PET (Antunes et al., 2017; Mistry & Kumar Roy, 2021; Silva et al., 2019). Nesse sentido, a tendência à aglomeração originada pelos agregados minerais pode levar a uma maior absorção do asfalto ligante (Chen et al., 2011; Esfandabad et al., 2020). Ao mesmo tempo, o filer de PET, sem coesão, pode gerar uma superfície maior a ser recoberta pelo ligante. Há também a diferença significativa de densidade real entre os agregados minerais e o PET, variável importante a ser considerada na determinação do teor de ligante de misturas com substituição de areia por PET reciclado, por massa e volume.



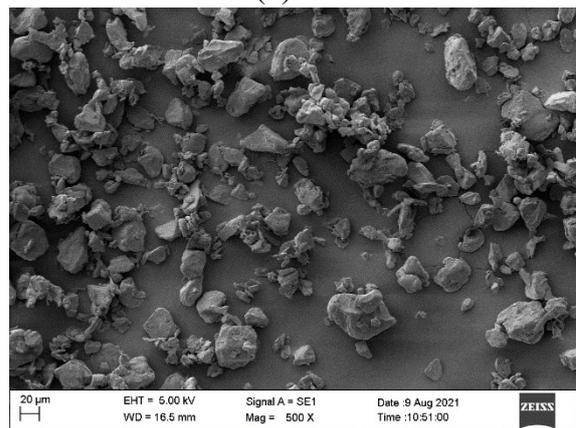
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.4 - MEV dos agregados: (a) Brita; (b) Pó; (c) Areia; (d) PET

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

### 4.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física do ligante utilizado encontra-se na Tabela 4.3, sendo observado conformidade com os limites definidos para o CAP 50/70 na Resolução N°19 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2005), tanto para a condição virgem quanto envelhecido a curto prazo (RTFOT).

Tabela 4.3 - Caracterização física do ligante.

Ensaio	Unidade	Resultado	Limites
Massa específica real (20°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	1,003	-
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	51	50 a 70
Ponto de Amolecimento	°C	47,5	mín. 46
Ponto de Fulgor	°C	323	mín. 235
Viscosidade rotacional Brookfield			
a 135 °C		351	mín. 274
a 150 °C	cP	184	mín. 112
a 177 °C		71	57 a 285
Efeito do calor e do ar (RTFOT)			
Varição de Massa	%	-0,290	máx. 0.5
Aumento do Ponto de Amolecimento	°C	3,4	máx. 8
Penetração Retida	%	64,7	mín. 55

A partir dos resultados de viscosidade rotacional Brookfield *versus* temperatura (Figura 4.5), foram determinadas as faixas de temperaturas de mistura (149-156 °C) e compactação (138-143 °C), bem como temperatura dos agregados 15°C acima da faixa de mistura (164-171 °C).

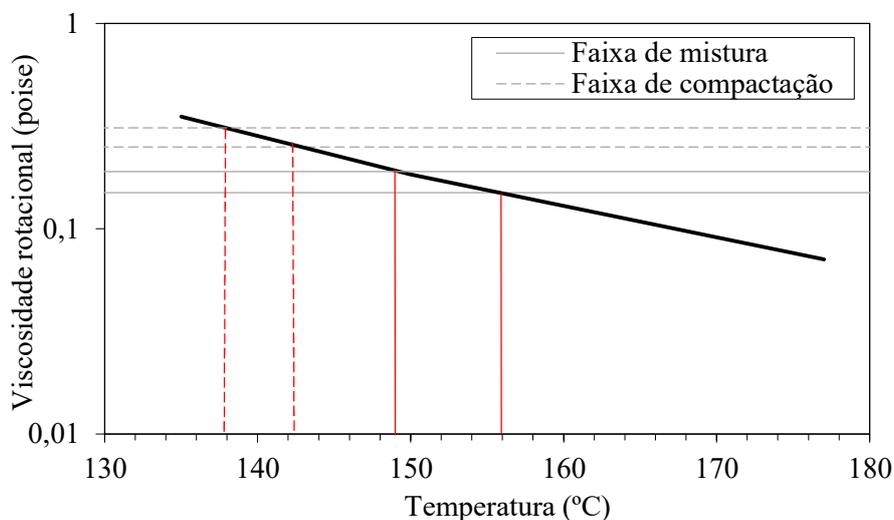


Figura 4.5 – Determinação das temperaturas de mistura e compactação

## 4.2.2 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

As curvas mestras do ligante para a temperatura de referência de 28°C, nas condições virgem e envelhecido por RTFOT, são apresentadas na Figura 4.6, enquanto que as variáveis obtidas pelo ajuste do modelo sigmoidal são expostas na Tabela 4.4. Vale mencionar que os valores de módulo cisalhante dinâmico ( $|G^*|$ ) e ângulo de fase ( $\phi$ ) utilizados no ajuste sigmoidal foram obtidos a partir da média de três repetições para cada condição experimental.

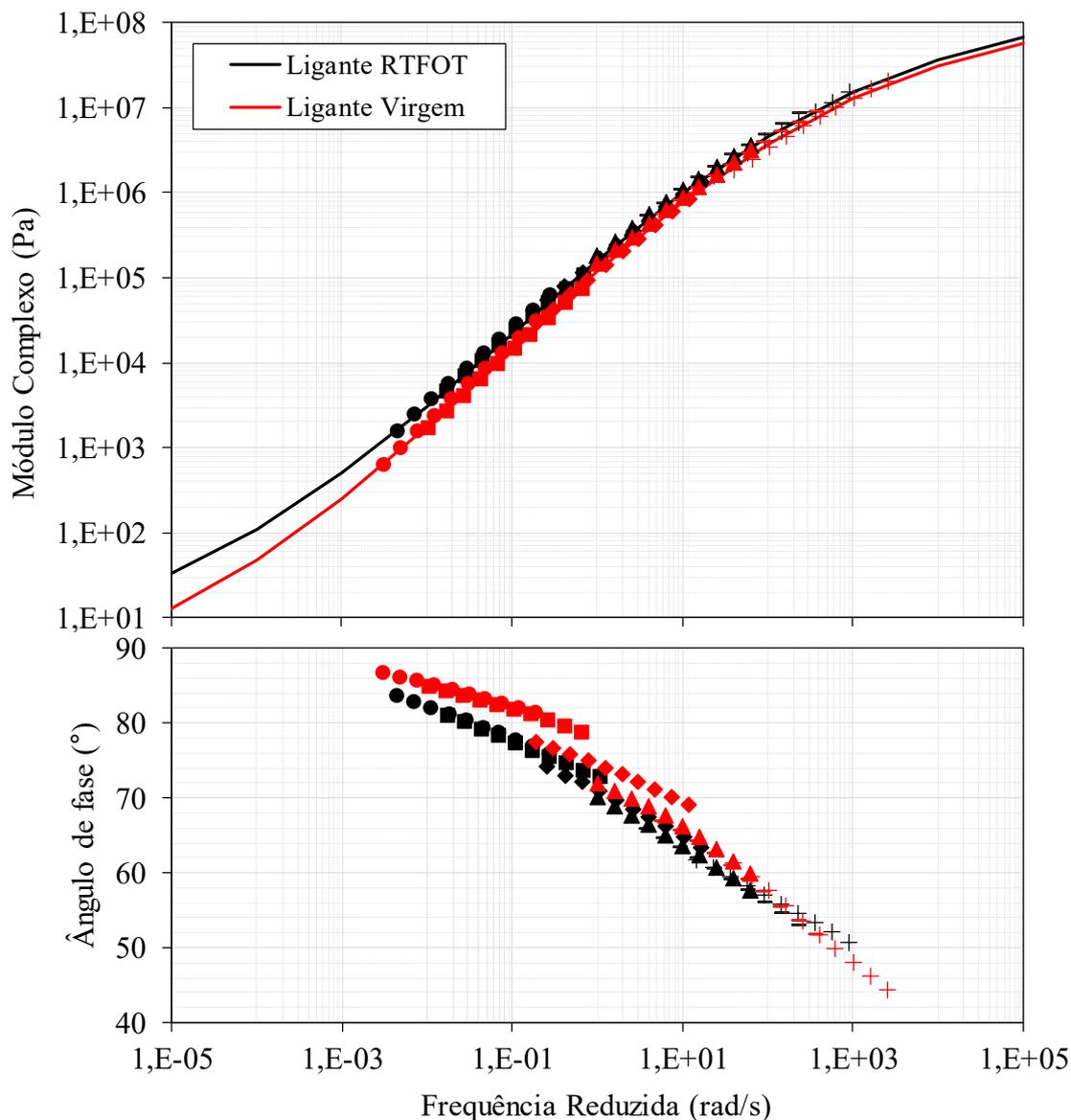


Figura 4.6 - Curva mestra e ângulo de fase do ligante na  $T_R$  de 28°C

Ambas as curvas apresentaram comportamento similar, sendo possível observar convergência dos resultados de  $|G^*|$  para frequências elevadas, visto que correspondem ao domínio de temperaturas baixas, em que o comportamento do ligante tende a um sólido elástico e o efeito do envelhecimento de curto prazo é menos significativo na resposta viscoelástica do

material. Para baixas frequências, representando baixa velocidade de tráfego e/ou altas temperaturas, é significativa a diferença entre as curvas mestras, apontando para uma maior sensibilidade do ligante virgem nessa faixa de investigação, visto que o processo de oxidação sofrido pelo ligante no RTFOT proporciona maior rigidez ao material (Mazzoni et al., 2020).

Tabela 4.4 - Variáveis do modelo sigmoidal e coeficientes do fator de translação

Ligante	$\delta_{MS}$	$\vartheta$	$\beta$	$\gamma_{MS}$	a	b	c
Virgem	-0.248	8.575	-0.493	0.434	8.18E-04	-1.70E-01	4.11862
RTFOT	0.272	8.141	-0.432	0.429	-2.80E-05	-9.54E-02	2.69304

As mesmas observações feitas para o módulo complexo dinâmico se estendem ao comportamento visualizado no ângulo de fase do ligante em ambas condições, uma vez que os resultados tendem a se sobrepor, ainda que, por efeito do envelhecimento experienciado no RTFOT, resulte em um ligante menos sensível aos efeitos de variação da temperatura, originando resposta mais elástica quando comparado ao ligante virgem, tendência essa corroborada pela literatura (Espinosa et al., 2021; Lopes et al., 2020; Xin et al., 2020).

#### 4.3 INTERAÇÃO AGREGADO-LIGANTE

A Figura 4.7 apresenta os resultados de FTIR/ATR para os mástiques compostos por agregado mineral (areia-ligante) e agregado polimérico reciclado (PET-ligante). O pico em torno de 2.845-2.983  $\text{cm}^{-1}$  indica vibração de estiramento da ligação C-H. As ligações C-H observadas entre a região de 1.462-1.382  $\text{cm}^{-1}$  foram classificadas como a vibração de flexão no plano de  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ . Os picos da areia próximos a 1.032  $\text{cm}^{-1}$  e 770  $\text{cm}^{-1}$  são indicativos da existência de  $\text{SiO}_2$  (Xu et al., 2020).

Considerando o mástique composto por PET, o pico em 721  $\text{cm}^{-1}$  está relacionado com a vibração aromática de C-H, enquanto o pico em 869,7  $\text{cm}^{-1}$  corresponde à vibração de flexão C-H fora do plano. A 1.013,6  $\text{cm}^{-1}$ , observa-se o pico de flexão no plano C-H, enquanto o estiramento assimétrico O-C-C é visto em 1.096,3  $\text{cm}^{-1}$ . O estiramento assimétrico C-C-O envolveu o carbono no anel aromático em 1.243  $\text{cm}^{-1}$ , com flexão de pico C-H em 1.460,4  $\text{cm}^{-1}$ , e estiramento do grupo de éster C=O em conjugação com o anel aromático à 1.712  $\text{cm}^{-1}$  (Baniya et al., 2020; Pereira et al., 2017).

Visualizado experimentalmente, o comportamento hidrofóbico do PET está associado a picos característicos em 721  $\text{cm}^{-1}$ , 1.096,3  $\text{cm}^{-1}$ , 1.243  $\text{cm}^{-1}$  e 1.712  $\text{cm}^{-1}$  (Baniya et al., 2020; Geyter et al., 2007), e tem sido relacionado à prevenção dos danos por umidade (Dalhat & Adesina, 2020; Padhan et al., 2013).

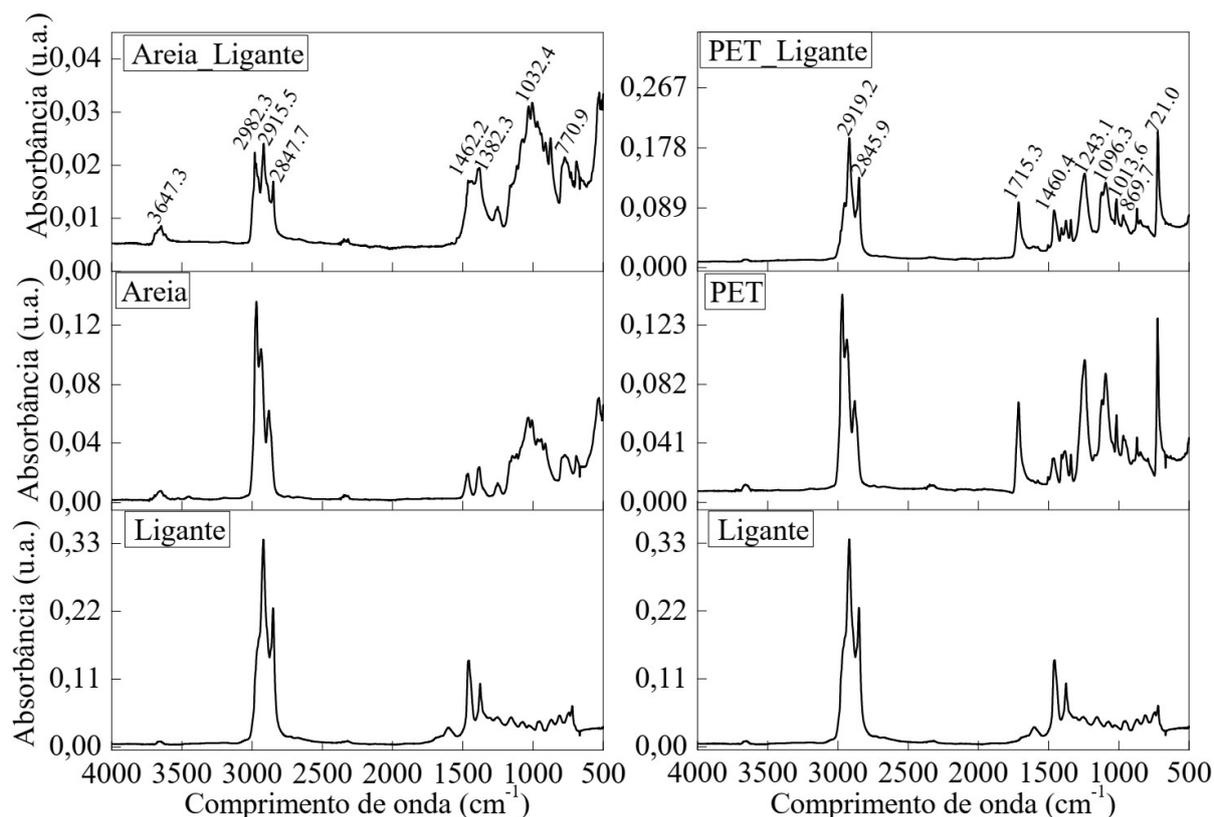


Figura 4.7 – FTIR/ATR dos mástiques compostos por areia e PET

Além disso, observa-se que os picos no mástique são originários da superposição dos picos de ligante asfáltico e filer, indicando que a interação asfalto-PET não gerou novas substâncias. Desprende-se disso que a interação asfalto-PET se dá por um processo físico, como outros estudos observaram (Ge et al., 2016; Kakar et al., 2021; Wu et al., 2021; Xu et al., 2020; Zhou et al., 2017). Neste ponto, reforça-se ponderações feitas anteriormente quanto a utilização do polietileno tereftalato reciclado para modificação do ligante mediante beneficiamento físico do material, visto que não ocorre interações químicas.

A Figura 4.8 retrata as curvas obtidas pela microscopia de força atômica (Figura 4.8a e Figura 4.8b), como também o trabalho de adesão referente aos mástiques com areia e PET (Figura 4.8c). As interações interatômicas começam a ocorrer a uma distância semelhante para ambos os materiais, ainda assim, o mástique PET demonstrou maior força adesiva, identificada pela área formada entre a curva de retração e a distância amostra-ponta.

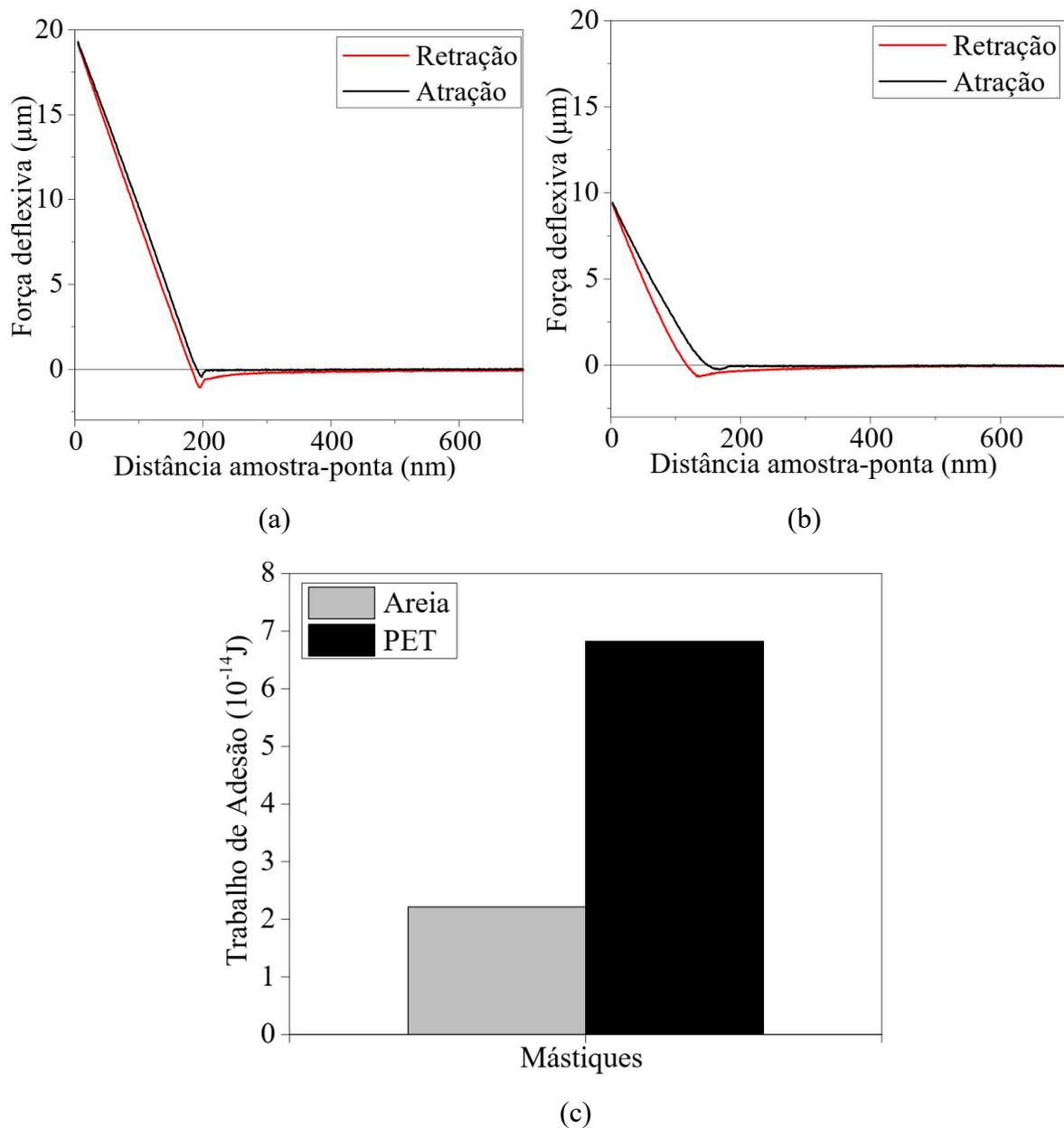


Figura 4.8 – Curvas força-distância para mástique de: (a) areia; (b) PET; (c) trabalho de adesão

Ainda que seja uma metodologia de análise recente, o resultado deste teste tem proporcionado boa concordância com os resultados relacionados ao teste de suscetibilidade à umidade na literatura, demonstrando que misturas asfálticas em que o mástique apresenta maior força adesiva resultam em maior resistência aos danos por umidade induzida.

Avaliando diferentes tipos de escórias em misturas asfálticas mediante ensaios de AFM, Moura et al. (2020) observaram que o maior trabalho de adesão obtido para a escória de aciaria quando comparado a escória de alto forno resfriada ao ar resultou em superior razão de resistência à tração retida (RRT) para as misturas asfálticas com a escória de aciaria. Já Mistry & Kumar Roy (2021) demonstraram a compatibilidade entre os resultados de força adesiva com

a resistência ao dano por umidade a partir da avaliação de filers provenientes das cinzas de casca de arroz e cinza volante classe F.

#### 4.4 ANÁLISE VOLUMÉTRICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Os parâmetros volumétricos obtidos na dosagem das misturas convencional e com 2% e 8% de PET estão retratados na Tabela 4.5, a partir da média dos valores de duas réplicas para cada teor ensaiado.

Tabela 4.5 – Parâmetros volumétricos da dosagem das misturas

Ligante (%)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	%Gmm @Ninicial	%Gmm @Nmáximo
Mistura convencional - HMA-C						
4,0	4,22	9,79	14,01	69,88	-	-
<b>4,1</b>	<b>3,96</b>	<b>10,13</b>	<b>14,09</b>	<b>71,90</b>	<b>87,6</b>	<b>97,0</b>
4,5	3,08	11,10	14,18	78,30	-	-
5,0	1,27	12,41	13,68	90,73	-	-
5,5	0,16	13,68	13,84	98,86	-	-
Mistura com 2% de PET - HMA-2P						
<b>4,1</b>	<b>4,1</b>	<b>10,05</b>	<b>14,14</b>	<b>71,12</b>	-	-
Mistura com 8% de PET - HMA-8P						
4,1	4,85	9,79	14,64	66,86	-	-
<b>4,25</b>	<b>3,99</b>	<b>10,22</b>	<b>14,21</b>	<b>71,96</b>	<b>86,8</b>	<b>96,6</b>
4,3	3,67	10,38	14,05	73,89	-	-
4,5	2,47	10,89	13,36	81,52	-	-

Como pode ser visto, a substituição de 2% de areia natural por PET reciclado não afeta os parâmetros volumétricos da mistura, enquanto que a substituição total de areia por PET resulta em aumento insignificante de 3,65% no teor de ligante de projeto, passando de 4,1% (HMA-C) para 4,25% (HMA-8P). É fundamental levar em consideração que essa pequena diferença, por se tratar de resultados experimentais, pode estar relacionada a variações inerentes ao próprio processo. Ademais, todos os parâmetros cumpriram com os requisitos volumétricos, em que se mencionam VAM (mín. 13%), RBV (65 a 75%), e relação entre massa específica aparente e Gmm para o  $N_{inicial}$  (< 89%) e  $N_{máximo}$  (< 98%).

Ao controlar a substituição por volume, acredita-se que haja uma equivalência entre o consumo de ligante da areia natural com superfície rugosa e PET com superfície lisa, como observado nas análises de microscopia (Figura 4.4). Assim, do ponto de vista da morfologia e

do processo de dosagem, a substituição de areia por PET em volume não causa efeito significativo no teor de ligante de projeto da mistura.

O efeito de distintas incorporações de PET na densidade máxima (Gmm) e volume de vazios das misturas, mantendo o teor de ligante asfáltico de 4,1% da mistura convencional (HMA-C), pode ser visualizado na Figura 4.9. A inserção e aumento no teor de PET resultam em diminuições do Gmm das misturas, e está relacionado às diferenças de densidade real de ambos os materiais (Tabela 4.1), em concordância com Hassani et al. (2005). Apesar disso, a redução máxima, para 8% de PET em massa, foi de apenas 5,43%. Vale mencionar que os valores de Gmm se ajustaram satisfatoriamente a uma tendência linear ( $R^2 = 0,97$ ), possibilitando a estimativa desse parâmetro para outros teores dentro da faixa de investigação.

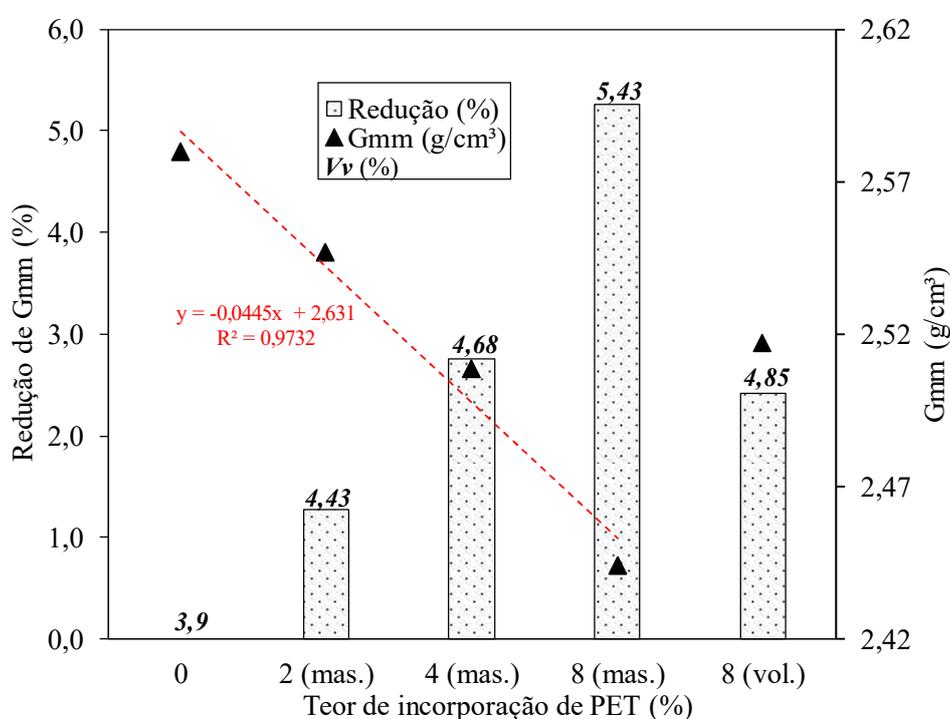


Figura 4.9 – Efeito da incorporação de PET na volumetria das misturas

Quando se trata de substituições em massa, espera-se que a menor densidade específica do PET resulte em uma maior superfície a ser recoberta pelo ligante asfáltico (Rondón-Quintana et al., 2019; Taherkhani & Arshadi, 2017). Quanto maior o teor de plástico reciclado adicionado, maior o volume de vazios apresentado pelas misturas, em que dois fatores podem estar associados a esse fenômeno. Como o teor de ligante é fixo, a adição e o aumento da quantidade de PET geram um filme de ligante asfáltico menor, prejudicando a lubrificação e processo de compactação da matriz de agregados. Além disso, o efeito de rebote elástico do PET pode afetar o processo de compactação (Taherkhani & Arshadi, 2017). Estudando a

substituição de areia por PET em misturas asfálticas semidensas, esse fenômeno foi observado por Mikhailenko et al. (2021). Recomenda-se que estudos futuros investiguem este último aspecto.

É importante mencionar que a adição de PET considerando 4% (mas.) e 8% (vol.) resulta em quantidades próximas de agregado reciclado na mistura, o que pode ser visto pela semelhança dos valores de Gmm e de volume de vazios. Com base nessa observação, análise de variância (ANOVA) foi conduzida ao nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05, a fim de checar se a diferença entre as médias obtidas era significativa, resultando em valores de *p-value* para o Gmm (0,19) e para o volume de vazios (0,33) superiores a 0,05. Assim, sob o ponto de vista volumétrico, pode-se afirmar que as médias são estatisticamente iguais e que independentemente do processo de incorporação, massa ou volume, o comportamento é governado pela quantidade de PET inserida na mistura.

#### 4.5 MICROTOMOGRAFIA

Inicialmente, foi realizada uma comparação do volume de vazios das misturas investigadas usando as abordagens de massa específica aparente (ASTM D 2726, 2019) e  $\mu$ -CT, conforme mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Volumetria das amostras ensaiadas

Mistura	Volume de vazios (%)	
	ASTM D2726	$\mu$ -CT
HMA-C	3,8	4,00
8% (wt.)	5,1	2,53
HMA-2P	3,9	3,21
HMA-8P	4,2	2,36

A partir dos resultados, pode-se observar uma diferença significativa entre as metodologias, principalmente na presença de elevados teores de PET. A obtenção do volume de vazios pela razão entre a massa específica aparente e massa específica máxima medida é a metodologia padrão utilizada em estudos experimentais em misturas asfálticas. Baseia-se no princípio de Arquimedes, em que a massa específica aparente da mistura é obtida por meio das relações de massa em condições de superfície seca, submersa e saturada. Assim, trata-se de uma medida física de fácil execução em laboratório, independentemente do tamanho da amostra. Por outro lado, a  $\mu$ -CT é baseada na fonte de raios-X e o tamanho da imagem bem como a técnica de captura podem afetar a resposta obtida.

A Figura 4.10 apresenta os percentuais das frações de interesse da mistura em relação ao volume total analisado. Por ser uma mistura asfáltica densa, a presença e distribuição dos vazios é influenciada pelo tamanho dos agregados existentes na amostra, explicando a concentração de vazios em regiões específicas, conforme observado nas misturas convencional (Figura 4.10a) e com 2% de PET (Figura 4.10b).

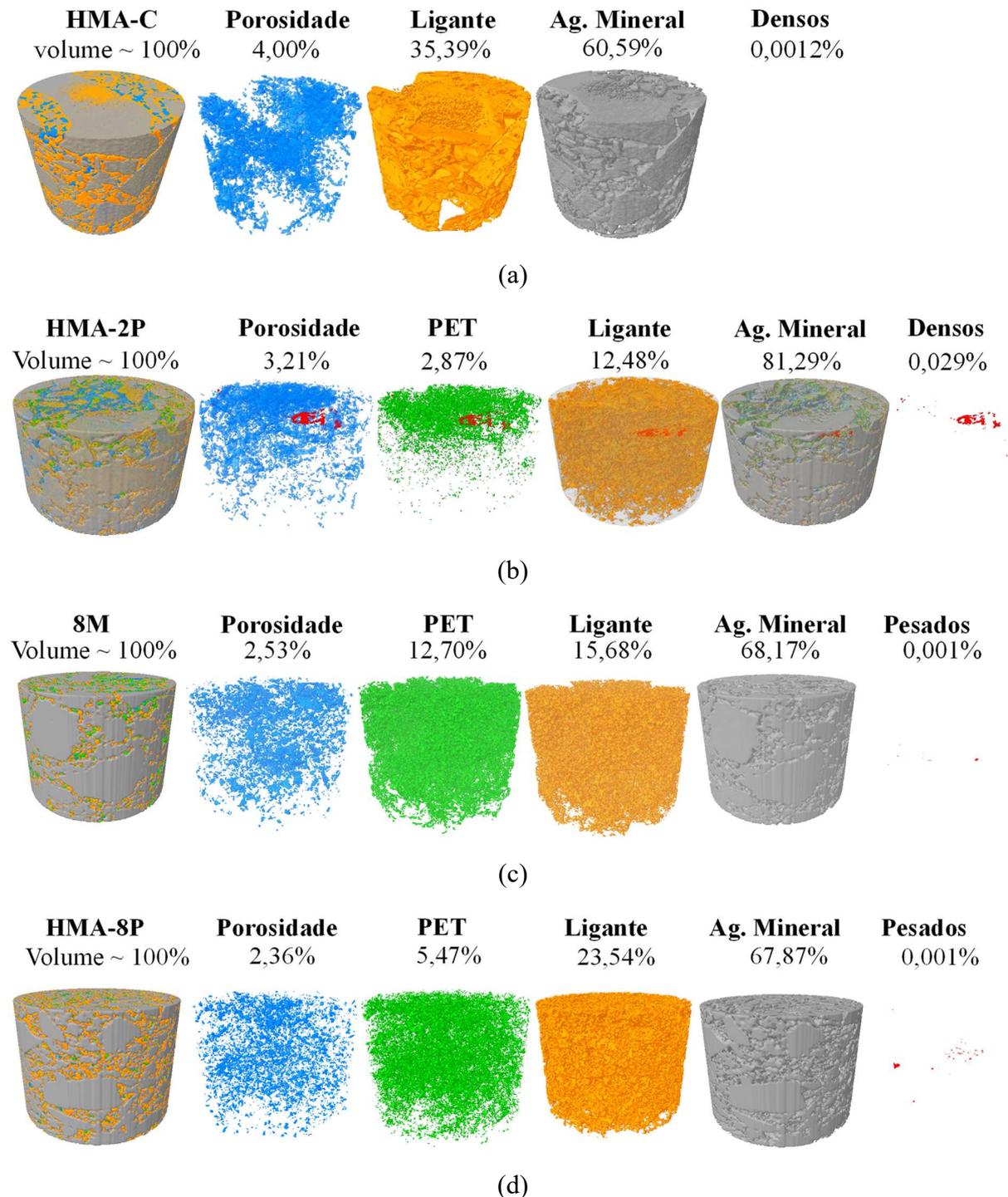


Figura 4.10 – Resultados de  $\mu$ -CT em relação ao volume das misturas: (a) HMA-C; (b) 8M; (c) HMA-2P; (d) HMA-8P

Além disso, é observada satisfatória dispersão do PET na matriz, em que sua inserção tende a uniformizar a distribuição de vazios no volume da amostra, resultando em maior homogeneidade da matriz e redução da presença de poros permeáveis, os quais estão associados à absorção de água via preenchimento parcial interagregado (Ferreira et al., 2022). Considerando a modificação do ligante asfáltico, Kalantar et al. (2012) indicam a dificuldade de dispersão do polietileno para modificar o ligante, demonstrando outro efeito positivo do PET substituindo os agregados minerais na mistura asfáltica via seca.

Vale ressaltar que as misturas foram moldadas com teores de ligante aproximadamente iguais, sendo a diferença no percentual de ligante identificado nas análises de  $\mu$ CT atribuída a variação da composição de agregados da amostra. A diminuição da dimensão do agregado resulta em uma maior superfície a ser recoberta por ligante, ocasionando maior consumo de ligante, conforme se observa na Figura 4.11, em que foi realizado o método da queima do ligante por ignição em forno mufla à 500°C (ASTM D 6307, 2019; Sousa et al., 2013) em amostra solta da mistura convencional, a fim de determinar o teor de ligante para grupos representativos da mistura.

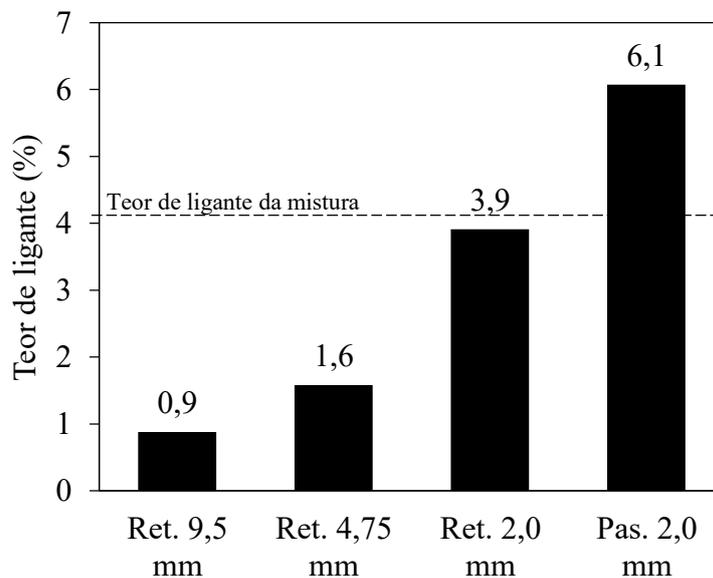


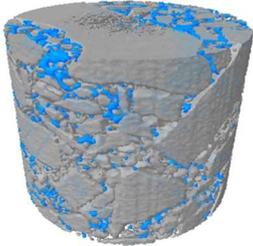
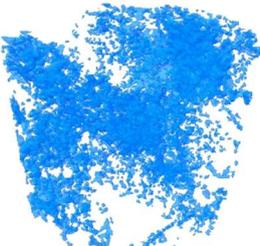
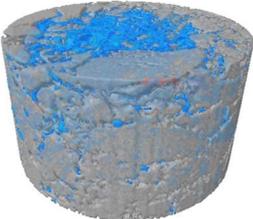
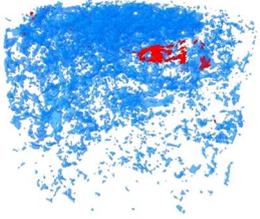
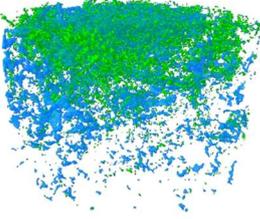
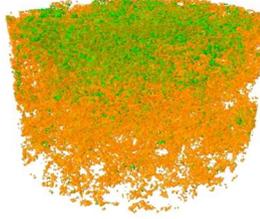
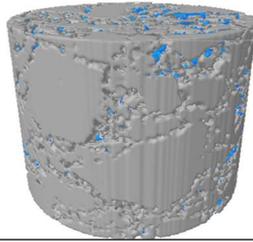
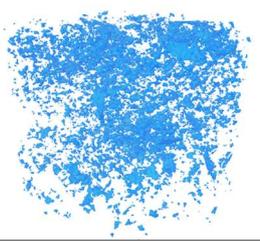
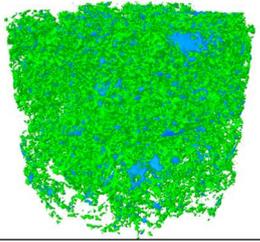
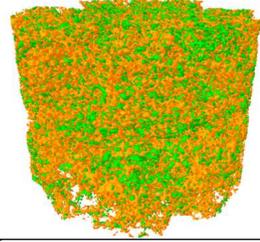
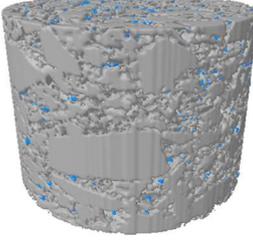
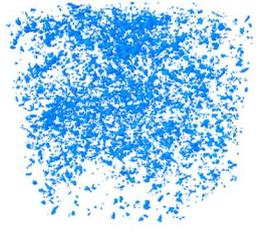
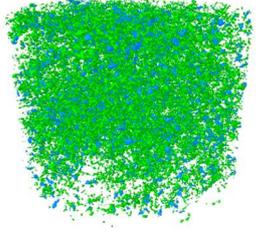
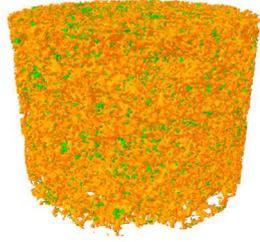
Figura 4.11 – Teor de ligante em função da granulometria

A partir da interação e distribuição dos componentes da matriz (Tabela 4.7), percebe-se que o PET atua no preenchimento dos vazios, havendo para a mistura com 2% de PET uma evidente sobreposição entre a região com maior concentração de vazios e a presença do PET. Considerando as análises com substituição de areia por 8% de PET em massa e volume, mesmo com fração semelhante de agregados minerais ( $\approx 68\%$ ), a mistura com 8% de PET em volume,

por conter metade da quantidade de PET reciclado em comparação da mistura 8M, resulta em uma maior volume de ligante recobrindo os agregados, corroborando a hipótese feita no estudo da volumetria.

No caso das misturas com 8% de PET em massa (8M) e volume (HMA-8P), a diferença de densidade entre a areia e o PET resulta em aumento do volume de PET na mistura, gerando poros fechados a partir do contato PET-PET devido à elevada área superficial que o PET introduz na mistura (Dalhat et al., 2019). Neste ponto, vale mencionar que esse efeito, para além da substituição por massa ou volume, está relacionado a quantidade de PET que é introduzida na mistura.

Tabela 4.7 – Interação e distribuição dos componentes na matriz

	Agregado Mineral/Vazios	Vazios	PET/Vazios	PET/Ligante
HMA-C			-	-
HMA-2P				
8M				
HMA-8P				

Legenda:

Agregado mineral  
  Vazios  
  PET  
  Ligante

Neste contexto, a Figura 4.12 retrata o histograma de distribuição de frequências dos vazios para as misturas estudadas. Em baixos teor de substituição, o PET atua preenchendo os macroporos da mistura, ao passo que quantidades elevadas de PET, além de preencherem os macroporos, resultam na criação de microporos.

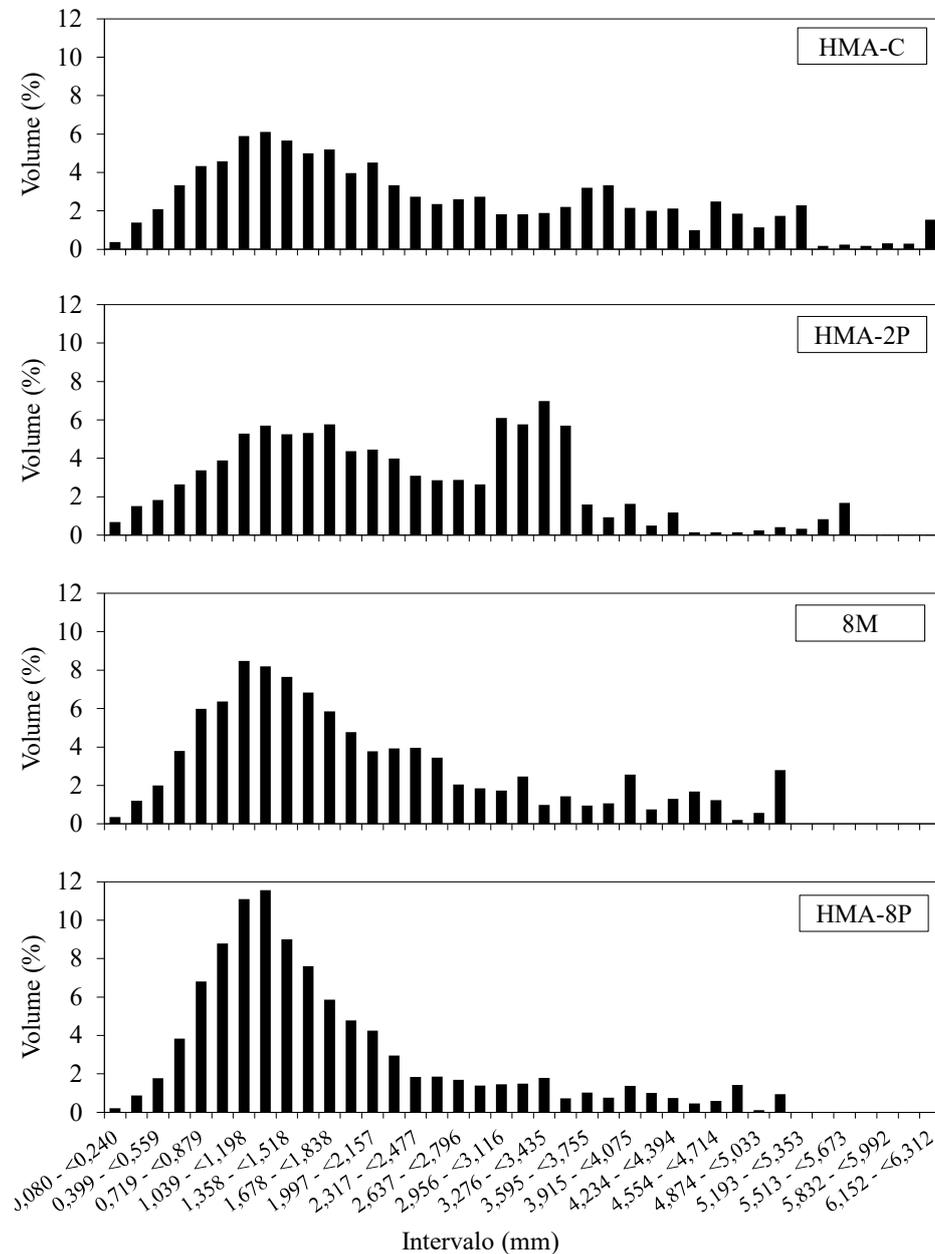


Figura 4.12 – Distribuição de vazios em percentual de volume.

Ademais, identifica-se que as principais divergências entre as metodologias de determinação do volume de vazios se dão para elevados teores de polietileno tereftalato reciclado (Tabela 4.6), o que pode estar associado a criação de poros tão pequenos pelo contato PET-PET que impossibilitaram sua identificação pelas limitações do tamanho do pixel da imagem.

#### 4.6 SUSCEPTIBILIDADE AO DANO POR UMIDADE INDUZIDA

A Figura 4.13 apresenta os resultados da resistência à tração indireta considerando os grupos condicionado e não condicionado, bem como a razão de resistência à tração retida (RRT), para as misturas asfálticas convencional e PET em substituição a 2% e 8% de areia.

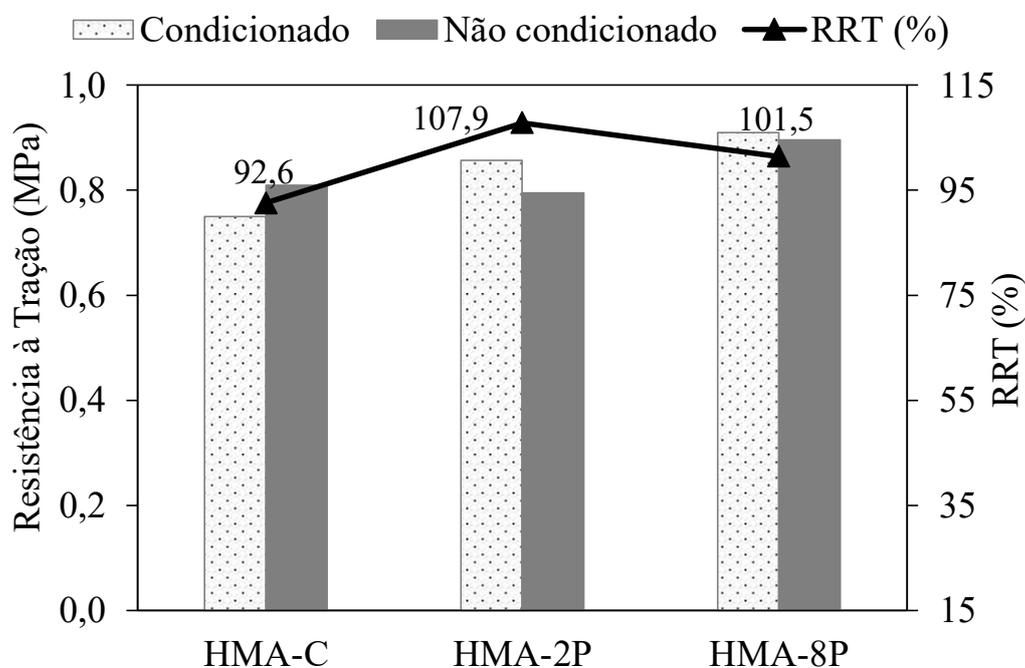


Figura 4.13 – Dano por umidade induzida para as misturas HMA-C, HMA-2P e HMA-8P

Os concretos asfálticos demonstraram RRT acima de 80%, que é adotado como requisito mínimo nas especificações de muitas agências rodoviárias. Além disso, foram observados efeitos positivos sobre os incrementos de resistência frente à umidade com a inserção de PET, levando a uma maior resistência à tração para o grupo condicionado e, conseqüentemente, RRT. Esse fenômeno pode ser entendido como um aumento na força de adesão entre ligante-agregado sob exposição à umidade (Bidgoli et al., 2019; Likitlersuang & Chompoorat, 2016; Silva et al., 2017). Os resultados apresentados aqui são corroborados por estudo de Leng et al. (2018), o qual demonstrou visualmente esse efeito benéfico a partir de ensaios de adesividade em mistura asfáltica não compactada.

Este comportamento é atribuído inicialmente à redução do óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) presente na areia natural (Tabela 4.2), composto que afeta negativamente à resistência à umidade da mistura asfáltica. Isso se deve a interação do grupo silanol polar ( $\text{Si-OH}$ ) na superfície do agregado silicoso com água, liberando o cátion  $\text{H}^+$  e tornando a superfície carregada negativamente e ácida ( $\text{Si-OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Si-O}^- + \text{H}_3\text{O}^+$ ), ao mesmo tempo em que o hidrogênio do ácido carboxílico do ligante se liga a molécula de água, resultando em carga negativa na

superfície do cimento asfáltico, afetando a aderência entre o agregado com presença de SiO<sub>2</sub> e ligante (Hefer et al., 2005; Moura et al., 2020).

Somado a isso, muitos autores comprovaram o efeito benéfico do PET reciclado na neutralização de superfícies ativas de agregados siliciosos, suprimindo a nucleação e o desenvolvimento de ácidos na interface (Fini et al., 2019; Hung et al., 2019; Khan et al., 2021; Oldham et al., 2021; Silva et al., 2017).

Com base nos resultados de FTIR (Figura 4.7), assume-se que o comportamento hidrofóbico do PET atue como um agente melhorador de adesividade na mistura (Dalhat & Adesina, 2020; Padhan et al., 2013). É importante mencionar que a maioria dos estudos utiliza aditivo derivado de PET para este fim (Merkel et al., 2020; Oldham et al., 2021), exigindo a transformação química do PET e causando a formação de subprodutos, enquanto que o PET micronizado em processo de via seca se mostra uma forma mais simples e fácil de melhorar essa propriedade.

Além do efeito hidrofóbico, o PET substituindo a areia aumenta as forças adesivas com o ligante asfáltico, como demonstrado na Figura 4.8, refletindo na maior resistência ao dano por umidade induzida. Com base na análise de energia livre de superfície, Ghabchi et al. (2021) demonstraram a suscetibilidade à umidade do agregado predominantemente composto por quartzo (SiO<sub>2</sub>) devido à reação exotérmica que favorece o descolamento da fase agregado-ligante na presença de umidade, o que não foi observado frente a combinação PET-ligante asfáltico.

Para regiões onde o regime intensivo de chuvas é um dos principais fatores associados ao processo de deterioração do pavimento, como o Brasil, a redução das perdas na ligação adesiva entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado e/ou na resistência coesiva do ligante asfáltico, é um dos aspectos mais importantes associados à incorporação do PET nas misturas asfálticas densas (Caro et al., 2008a; 2008b; Lucas Júnior et al., 2021).

#### **4.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

O comportamento mecânico das misturas convencional e com substituição de PET, considerando as condições experimentais descritas na Tabela 3.1, é mostrado na Figura 4.14.

A mistura HMA-C apresentou os maiores valores tanto para resistência à tração indireta (RT) quanto para o módulo de resiliência (MR), em que a adição de PET refletiu na redução de

ambas as propriedades, sendo essa tendência reportada por diversos autores (Dalhat et al., 2019; Modarres and Hamed, 2014a; 2014b; Moghaddam et al., 2012).

Sua ocorrência se dá por efeito da diferença do módulo de Young do agregado mineral ( $\approx 60$  GPa) e do PET reciclado (1,2 – 2,8 GPa), comparados a partir de resultados médios obtidos na literatura (Giraldi et al., 2005; Navarro et al., 2008; Oliveira Junior & Farias, 2020; Torres et al., 2000).

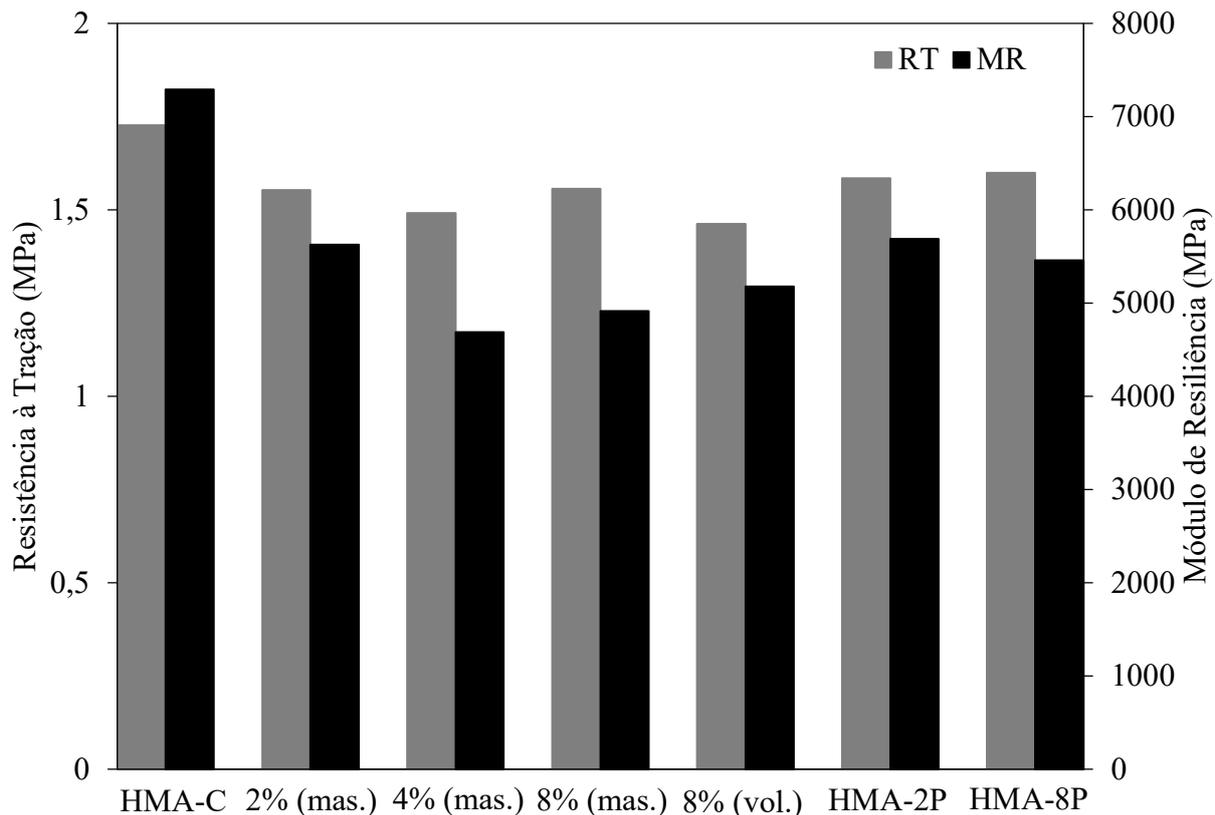


Figura 4.14 – Resistência à tração e Módulo de resiliência das misturas

Ainda assim, todas as misturas com plástico reciclado apresentaram resultados acima do requisito mínimo de RT de 0,65 MPa, estabelecido por especificação da agência rodoviária brasileira, bem como módulo de resiliência acima da faixa comumente relatada na literatura para misturas do tipo CBUQ (Bessa et al., 2015; Bidgoli et al., 2019; Likitlersuang & Chompoorat, 2016; Movilla-Quesada et al., 2019; Sanchez-Cotte et al., 2020).

#### 4.8 CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA DAS MISTURAS

Conforme abordado na metodologia, para cada mistura (HMA-C, HMA-2P, HMA-8P) foram ensaiados três corpos de prova, sendo apresentados neste item os resultados médios. Vale ressaltar que os coeficientes de variabilidade obtidos para cada ponto do módulo dinâmico ( $|E^*|$ )

e ângulo de fase ( $\phi$ ) ficaram abaixo de 15%, atestando a qualidade de preparação e homogeneidade das misturas.

A partir das varreduras de frequência (25; 10; 5; 1; 0,5; 0,1 Hz), e temperatura (5; 10; 20; 25; 35 °C), foram determinados os valores de módulo dinâmico, conforme demonstrado na Figura 4.15.

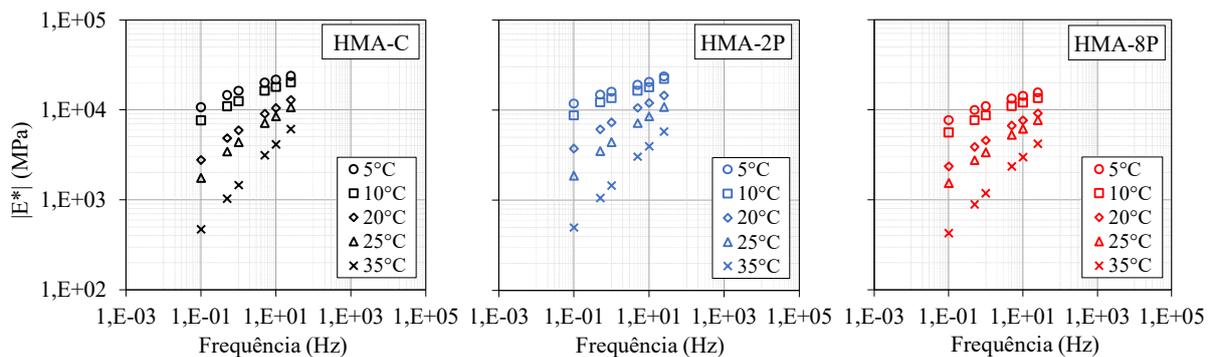


Figura 4.15 – Módulo dinâmico das misturas asfálticas

O aumento da temperatura resulta em diminuição do valor do  $|E^*|$ , bem como a diminuição da frequência. Esse comportamento é atribuído a diminuição na resposta elástica das misturas, sendo afetada tanto pelo efeito da temperatura quanto duração do carregamento.

Comparando as respostas das misturas convencional e com PET em temperaturas mais baixas (5 °C e 10 °C), observa-se que baixo teor de substituição (HMA-2P) não afeta a rigidez da mistura, visto que a inserção de PET promove melhoria na adesividade da matriz. Quando se tem presença de elevada quantidade de agregado reciclado (HMA-8P), mesmo com os ganhos de força de adesão, o menor módulo de Young do PET e densidade da mistura passam a ser os fatores predominantes do comportamento. Para temperaturas mais elevadas (25 °C e 35 °C) a diferença de comportamento se torna menor, e os resultados apontam para uma convergência.

Outro ponto importante de noticiar são os fatores de translação das curvas, demonstrados na Figura 4.16. Os fatores obtidos não indicaram diferenças significativas, ocasionando em similares ajustes da curva polinomial de segunda ordem para todas as misturas asfálticas. Conforme constatado nas análises termogravimétricas, apenas temperaturas acima de 450°C produzem algum efeito nas respostas térmicas dos agregados mineral e reciclado, logo, é possível supor que os fatores de translação nas temperaturas ensaiadas estejam mais associados a sensibilidade do ligante. Conforme constatado nas análises de FTIR, se prova mais uma vez que o PET reciclado está atuando via seca, sem ocasionar a modificação do ligante asfáltico.

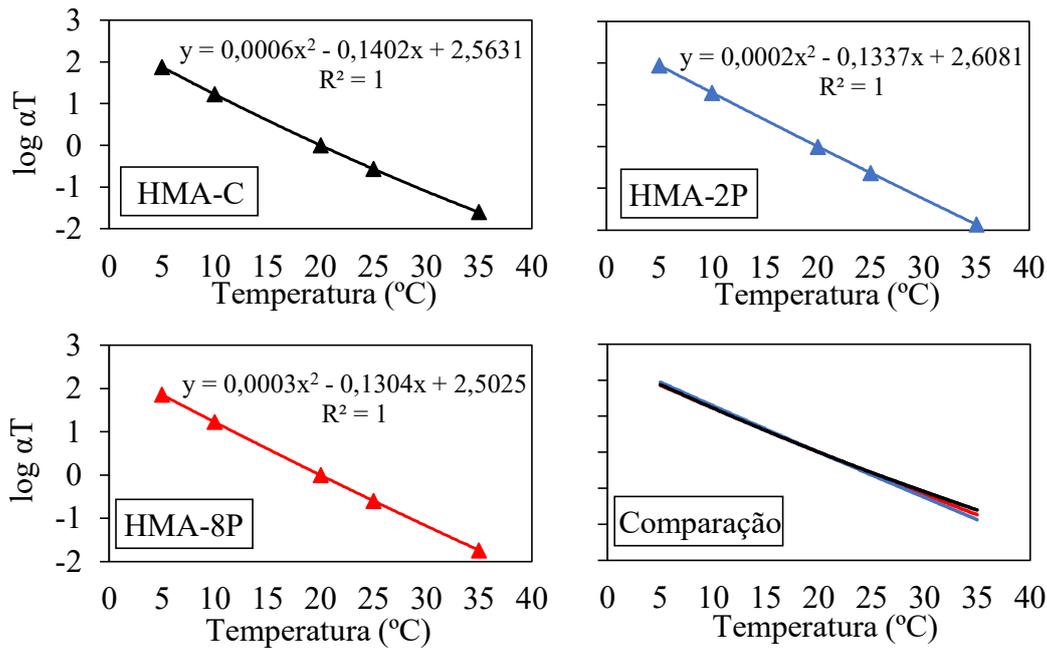


Figura 4.16 – Fatores de translação da curva mestra das misturas e sua comparação

Auxiliado pela função *Solver* do MS Excel a partir de metodologia estabelecida e automatizada em planilha por Mello et al. (2018), foi realizado o ajuste dos valores na função sigmoidal, sendo obtida as curvas mestras dos materiais asfálticos (Figura 4.17).

Em frequências mais elevadas, pode-se observar resultados superiores de  $|E^*|$  para a mistura convencional e com 2% de PET, ao passo que para frequências menores há uma tendência de sobreposição das curvas mestras da HMA-C e HMA-8P, ainda que a mistura com PET apresente resultado levemente superior. Ao integrar ambas análises em função da frequência, é possível concluir que a mistura convencional é mais sensível aos efeitos de frequência/temperatura, enquanto que a inserção de PET, embora provoque redução de  $|E^*|$  com 8% de PET, produz misturas asfálticas mais estáveis a essa variável (Walubita et al., 2012).

De acordo com discussão feita anteriormente, a diferença do módulo de Young entre o agregado mineral e reciclado é o principal fator associado a diminuição do módulo dinâmico em elevadas frequências e está associado a elevados teores de substituição de areia por PET, uma vez que a mistura HMA-2P se sobrepôs a curva mestra da mistura de referência (Shu & Huang, 2008). Dito isso, supõe-se que teores intermediários de substituição de PET na mistura asfáltica resultem em curvas mestras entre as obtidas para a mistura convencional e com 8% de substituição. Considerando baixas frequências, correspondendo ao domínio de temperaturas mais elevadas, observa-se comportamento benéfico da substituição de areia natural por plástico reciclado nos valores de módulo dinâmico.

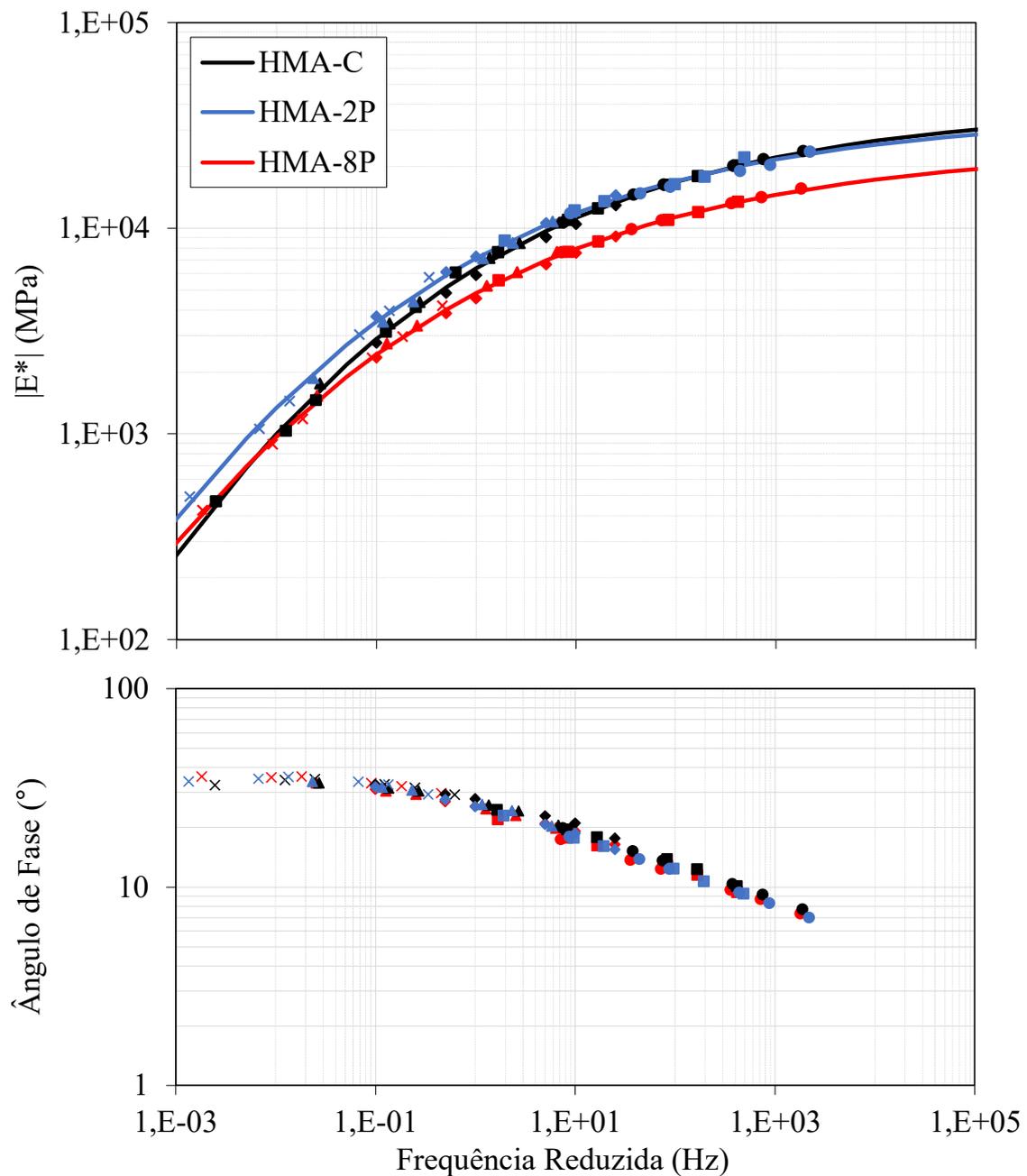


Figura 4.17 – Curva mestra e ângulo de fase das misturas asfálticas na  $T_R$  de 20°C

Além disso, o PET contribui para uma resposta mais elástica da mistura, demonstrado pela diminuição do ângulo de fase. Neste sentido, quanto maior a fração de PET reciclado adicionado maior é a resposta elástica da matriz. Em frequências mais baixas, correspondendo a temperaturas elevadas, os valores de ambas misturas tendem a uma convergência com sutil queda de  $\phi$ , dado que o ligante tende a se comportar como fluido viscoso, e o comportamento da mistura é governado majoritariamente pela matriz de agregados, a qual reflete em comportamento elástico e constante para a faixa de temperatura investigada.

Por fim, são apresentados na Tabela 4.8 as variáveis obtidas do ajuste dos dados ao modelo sigmoidal ( $\delta_{MS}$ ,  $\vartheta$ ,  $\beta$ ,  $\gamma_{MS}$ ) e coeficientes do fator de translação com a temperatura (a, b, c).

Tabela 4.8 – Variáveis do modelo sigmoidal e coeficientes do fator de translação

Mistura	$\delta_{MS}$	$\vartheta$	$\beta$	$\gamma_{MS}$	a	b	c
HMA-C	-3.195	7.782	-2.192	0.415	6.0E-04	-0.140	2.563
HMA-2P	-3,205	7,757	-2,314	0,411	1.7E-04	-0,133	2,608
HMA-8P	-3.293	7.686	-2.288	0.396	2.6E-04	-0.130	2.502

Pellinen et al. (2003) explicam que o parâmetro  $\gamma_{MS}$  está relacionado a inclinação da função, isto é, taxa de variação entre os valores mínimo e máximo, e  $\beta$  a posição horizontal do ponto de mudança entre eles. Ademais,  $\delta_{MS}$  e  $\vartheta$  são influenciados pela graduação do agregado, teor de ligante e volume de vazios, ao passo que  $\beta$  e  $\gamma_{MS}$  dependem das características do ligante e magnitude de  $\delta_{MS}$  e  $\vartheta$ .

#### 4.9 FADIGA

As curvas características de dano (C x S) ajustadas para as misturas de interesse (HMA-C, HMA-2P, HMA-8P) estão retratadas na Figura 4.18.

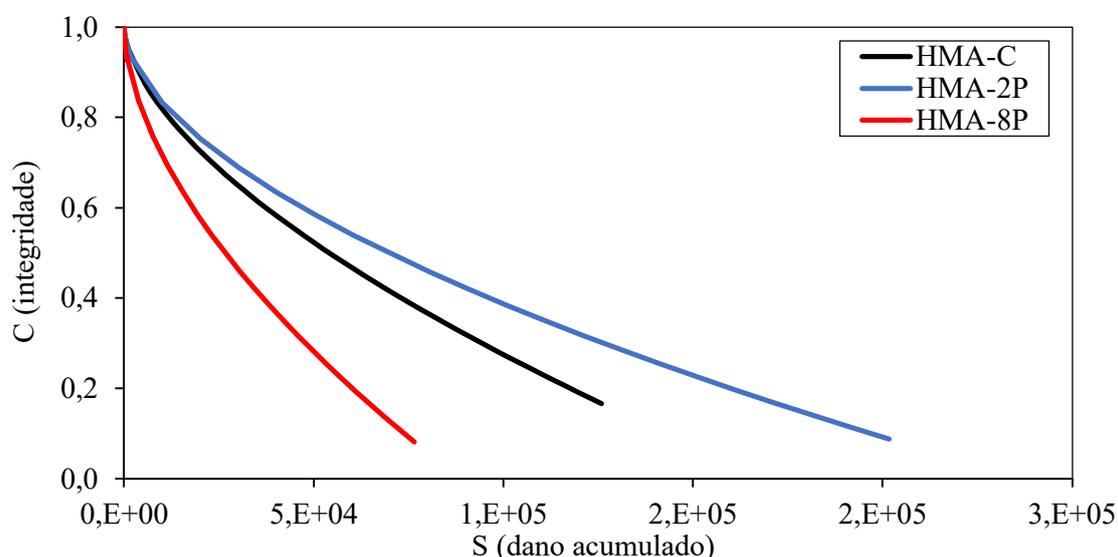


Figura 4.18 – Curva característica de dano das misturas para  $T_{ref}$  de 20°C

Nota-se que a mistura convencional rompe com maior integridade, enquanto que a mistura com 2% de PET atinge a ruptura com menor nível de integridade e maior tolerância ao dano acumulado, sendo necessário despender maior energia para provocar queda da sua integridade. Além disso, observa-se que as misturas HMA-C e HMA-8P perdem mais integridade para um mesmo nível de dano. Ao comparar o efeito da substituição parcial e total

de areia por PET, percebe-se que o agregado reciclado potencializa a resistência à fadiga, porém, esse comportamento benéfico é restrito a quantidade de material inserida na mistura.

Na Figura 4.19 são apresentadas as envoltórias de ruptura baseadas nos parâmetros  $D^R$  e  $G^R$ , as quais tem como objetivo identificar o potencial de fissuração de misturas asfálticas independentemente da estrutura do pavimento, por meio da vida de fadiga.

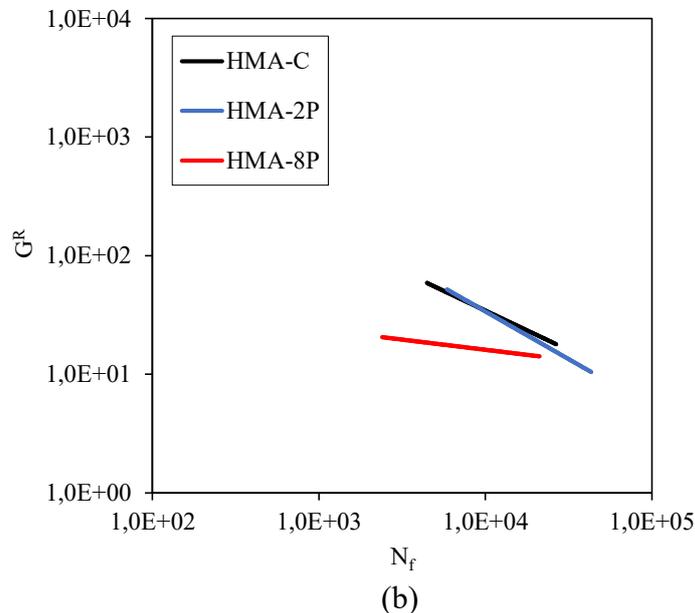
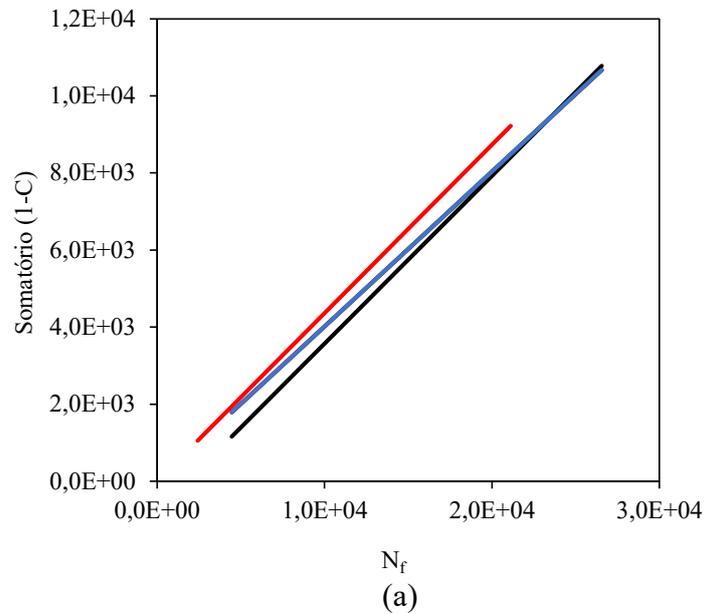


Figura 4.19 – Envoltórias de ruptura baseadas no: a)  $D^R$ ; b)  $G^R$

As envoltórias de ruptura do  $D^R$  são lineares na escala aritmética e um maior valor de  $D^R$  está associado a uma maior capacidade de acúmulo de dano nas misturas, isto é, capacidade de dissipar energia até o momento da ruptura. Pode-se observar similaridade entre as envoltórias de ruptura das misturas HMA-C e HMA-2P, visualizada pela sobreposição das envoltórias.

Ainda assim, a maior inclinação da mistura com inserção parcial de PET serve de indicativo de comportamento superior, conforme discutido por Mocelin (2018) e Colpo (2019). Para um mesmo valor de  $D^R$ , a mistura HMA-8P apresentou um menor número de ciclos até a ruptura ( $N_f$ ).

Analisando as envoltórias  $G^R$ , em escala logarítmica, novamente se observa sobreposição da mistura convencional com a mistura com substituição parcial de areia por PET, corroborando a hipótese de que o comportamento à fadiga não foi prejudicado pela modificação da matriz de agregados, diferentemente do observado pela mistura com substituição total de areia por PET. Misturas com melhor desempenho à fadiga apresentam envoltórias mais acima e à direita com menores inclinações, isto é, para um mesmo valor de  $G^R$ , misturas com essas características apresentam um  $N_f$  superior (Sabouri & Kim, 2014).

Os parâmetros da função potência ajustada para as curvas C x S são descritos na Tabela 4.9, os quais podem ser utilizados em simulações computacionais utilizando o programa FlexPAVE<sup>TM</sup> para avaliar o desempenho à fadiga das misturas levando em consideração as variáveis de clima, estrutura e tráfego. Além disso, são apresentados os coeficientes de regressão das envoltórias de ruptura do  $G^R$ , valores de  $D^R$  e o indicativo de capacidade de dano ( $S_{app}$ ).

Tabela 4.9 – Parâmetros de ajuste para as misturas asfálticas

Mistura	Modelo CxS		Critério de Ruptura $G^R$		Critério de ruptura $D^R$	$S_{app}$
	$C_{11}$	$C_{12}$	$\gamma$	$\delta$	$D^R$	
HMA-C	6,86E-04	6,05E-01	1,56E+04	-0,664	0,33	2,87
HMA-2P	8,95E-04	5,67E-01	5,58E+04	-0,804	0,32	3,33
HMA-8P	1,38E-03	5,78E-01	7,81E+01	-0,172	0,31	1,18

Os valores obtidos de  $D^R$  se enquadram na faixa de valores entre 0,3-0,8 descrita por Wang & Richard Kim (2019) e nota-se proximidade entre os valores obtidos para as diferentes misturas asfálticas. Ao considerar o  $S_{app}$  fica mais evidente a diferença entre as misturas, visto que esse parâmetro considera não só a rigidez, como também a tenacidade das misturas (Wang et al., 2020). Com base no  $S_{app}$ , pode-se classificar a mistura com 2% de PET como a mais resistente à fadiga, enquanto que a substituição total de areia por PET resultou na mistura mais sensível a esse dano.

#### 4.10 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A Figura 4.20 apresenta curvas típicas de fluência dinâmica para cada tipo de mistura ensaiada, considerando apenas um corpo de prova por mistura a fins ilustrativos. A proximidade de comportamento entre a mistura convencional e com 2% de PET demonstra que a substituição parcial de areia tende a não afetar a matriz, ao passo que a substituição total promoveu uma aceleração da deformação axial, indicando maior susceptibilidade das misturas com PET à fluência.

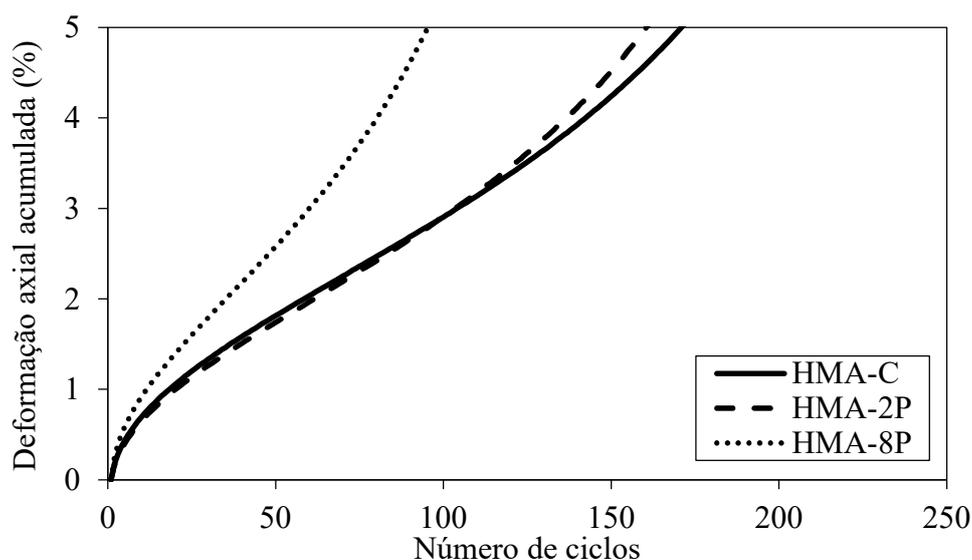


Figura 4.20 – Curvas de fluência dinâmica

Os resultados médios de *flow number* são apresentados na Figura 4.21, bem como o mínimo estabelecido por norma para tráfego de 3 a 10 ( $10^6$  ESALs), equivalente a FN de 50. A adição e incremento do agregado reciclado promova a redução do FN em comparação a mistura convencional, sendo apresentado pela substituição total o menor valor entre as misturas. Resultados similares foram obtidos por Silva et al. (2017) ao modificar o ligante asfáltico com 5% de PET micronizado em relação a massa de ligante.

Tendo em vista que a resistência à deformação permanente está relacionada a consistência do ligante (variável fixa) e matriz de agregados, a substituição de agregado mineral com maior rigidez por PET de menor rigidez é o principal responsável pelo comportamento observado. Ainda assim, os resultados se mostraram satisfatórios para tráfego médio e são oriundos de condições mais severas quanto ao tempo de condicionamento.

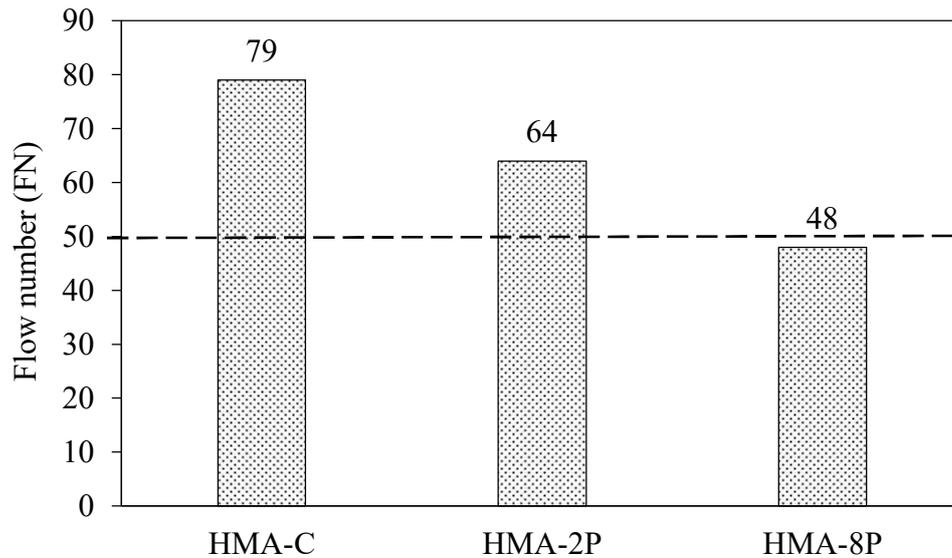


Figura 4.21 – *Flow number* das misturas asfálticas

Considerando que a mistura foi projetada para suportar tráfego de médio à elevado ( $0,3$  a  $30 \times 10^6$  ESALs), fica evidente que mesmo a mistura convencional não atende o requisito mínimo de *flow number* para tráfego elevado ( $FN_{\min}=190$ ). Acredita-se que esse comportamento esteja relacionado a origem calcária do material, a qual tem sido associado a materiais de baixa capacidade de suporte, bem como a curva granulométrica da mistura dos agregados (Al-Khateeb et al., 2013; Assis et al., 2017; Ferreira et al., 2020; Mahmoud et al., 2010; Moreno & Rubio, 2013).

Analisando conjuntamente os resultados de módulo dinâmico e *flow number*, os maiores módulos apresentados pelas misturas HMA-2P e HMA-8P em comparação da HMA-C em baixas frequências seriam um indicativo de melhor desempenho quanto à resistência a deformação permanente. De acordo com Walubita et al. (2012), em teoria, a mistura que apresenta rigidez mais elevada, isto é, maiores valores de  $|E^*|$ , é esperado maior resistência à deformação permanente. Estudando diferentes tipos de misturas, Zhang et al. (2013) demonstrou a inaplicabilidade dessa associação direta, onde os autores ressaltam a necessidade de mais estudos para investigar a acuraria dessa relação.

## 5. CONCLUSÕES

Com o propósito de avaliar o efeito da substituição de areia natural por PET reciclado no comportamento mecânico de mistura asfáltica densa foi conduzido extenso programa experimental, por meio das análises do qual pode-se concluir que:

- Por meio de análises termogravimétricas, comprovou-se que o PET reciclado pode ser incorporado às misturas asfálticas sem a ocorrência de degradação térmica, que inicia-se por volta de 400°C;
- Do ponto de vista morfológico e do processo de dosagem, a substituição de areia por 8% de PET em volume não causa efeito significativo no teor de ligante de projeto da mistura, devido à equivalência de consumo de ligante entre os materiais;
- Considerando um teor de ligante asfáltico fixo, a inserção e o aumento do teor de PET reduziram a densidade máxima medida (Gmm) da mistura e aumentaram o volume de vazios. Como observado na microtomografia, independentemente da substituição ocorrer por massa ou volume, a inserção elevada de PET reciclado afeta o processo de compactação;
- O PET em substituição parcial e total de areia natural aumentou a resistência ao dano por umidade induzida da mistura asfáltica ao aumentar a adesão ligante asfáltico-agregado, sendo uma das principais contribuições do PET reciclado em regiões onde o regime intensivo de chuvas é um dos principais fatores relacionados ao processo de deterioração do pavimento, como o Brasil;
- Mesmo com a redução de RT e MR das misturas com PET, devido ao contraste do módulo de Young do agregado mineral e PET reciclado, os resultados de RT ficaram acima do requisito mínimo, e os valores de MR se situaram em faixa consistente com misturas CBUQ da literatura;
- A adição de PET resultou em mistura asfáltica com resposta mais elástica e menos sensível aos efeitos de frequência/temperatura, sendo observado para a mistura com inserção parcial de PET (HMA-2P) maior rigidez;
- O comportamento à fadiga e deformação permanente indicaram que a inserção de PET é benéfica para misturas asfálticas densas, porém é restrita a quantidade de

material inserida. Neste contexto, 2% de PET produziu mistura mais resistência à fadiga, ao mesmo tempo que a redução de FN da HMA-2P ainda assegura valor compatível com tráfego suportado pela mistura convencional.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização de qualquer pesquisa experimental sempre se almeja explorar profundamente um determinado assunto, na busca pelo preenchimento de lacunas técnicas e científicas existentes. No desenvolvimento desse processo dinâmico, novos questionamentos e possibilidades vão surgindo e, não obstante ao desejo de investigá-los, limitações de cronograma, equipamentos ou de divergências quanto ao foco pré-estabelecido impossibilitam o cumprimento de todos esses objetivos.

Em virtude disso, pontua-se como sugestões para trabalhos futuros que queiram dar prosseguimento aos estudos de misturas asfálticas densas com a inserção de PET:

- Verificar o efeito da substituição de areia por PET em misturas asfálticas finas (MAF), a fim de complementar o espectro investigativo do dano por fadiga;
- Estudar a inserção parcial de PET em areia com diferente composição química, na busca por avaliar os efeitos de dano por umidade induzida quando não se tem a abundância de óxido de silício;
- Substituir o PET em outras frações de agregados miúdos, a fim de investigar o comportamento de misturas que não apresentam areia em sua composição;
- Avaliar o PET como aditivo na mistura, dado que a substituição não afeta o teor de ligante e que a incorporação do polietileno tereftalato reciclado produz efeitos benéficos em pequena quantidade;
- Verificar o comportamento em campo das misturas HMA-C e HMA-2P por meio de pista experimental.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO T 240. (2013). Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 1–11.
- AASHTO T 342. (2019). Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 1–18.
- ABNT NBR 11341. (2014). Derivados de Petróleo - Determinação dos Pontos de Fulgor e de Combustão em Vaso Aberto Cleveland. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 1–22.
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., & Ahmadinia, E. (2012). Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 984–989. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015>
- Al-Khateeb, G. G., Khedaywi, T. S., Obaidat, T. I. A.-S., & Najib, A. M. (2013). Laboratory Study for Comparing Rutting Performance of Limestone and Basalt Superpave Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(1), 21–29. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000519](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000519)
- ANP. (2005). ANP 19. *Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*, 6.
- Antunes, V., Freire, A. C., Quaresma, L., & Micaelo, R. (2017). Evaluation of waste materials as alternative sources of filler in asphalt mixtures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(6), 1–13. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1126-3>
- Arabani, M., Tahami, S. A., & Taghipoor, M. (2016). Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials. *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), 713–729. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1189349>
- Aragão, F. T. S., Pazos, A. R. G., Motta, L. M. G. da, Kim, Y. R., & Nascimento, L. A. H. do. (2016). Effects of morphological characteristics of aggregate particles on the mechanical behavior of bituminous paving mixtures. *Construction and Building Materials*, 123, 444–453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.013>
- Arias-Andres, M., Rojas-Jimenez, K., & Grossart, H. P. (2019). Collateral effects of microplastic pollution on aquatic microorganisms: An ecological perspective. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 112, 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.11.041>
- Assis, S. R. H. de, Queiroz, B. O. de, Araújo, C. C., Nunes, K. K. F., Melo, R. A. de, & Lucena, L. C. de F. L. (2017). Evaluation of limestone crushed dust aggregates in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 148, 659–665. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.107>
- ASTM 7175. (2015). Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. *American Society for Testing Materials*, 1–16. <https://doi.org/10.1520/D7175-15>. Copyright
- ASTM C 1252. (2017). Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). *ASTM International*, 04, 1–6. <https://doi.org/10.1520/C1252-17>. Copyright
- ASTM C 127. (2007). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity),

- and Absorption of Coarse Aggregate. *ASTM International*, 1–6. [www.astm.org](http://www.astm.org), or
- ASTM D 2041. (2011). Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. *American Society for Testing Materials*, 1–4. <https://doi.org/10.1520/D2041>
- ASTM D 2726. (2019). Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures. *American Society for Testing Materials*, 1–4. [https://doi.org/10.1520/D2726\\_D2726M-21](https://doi.org/10.1520/D2726_D2726M-21)
- ASTM D 4402. (2015). Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures using a Rotational Viscometer. *American Society for Testing Materials*, 1–4. <https://doi.org/10.1520/D4402>
- ASTM D 4791. (2019). Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. *ASTM International*, 1–4. <https://doi.org/10.1520/D4791-19.2>
- ASTM D 6307. (2019). Standard Test Method for Asphalt Content of Asphalt Mixture by Ignition Method. *American Society for Testing Materials*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D6307-19.2>
- ASTM D 6925. (2015). Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor. *American Society for Testing Materials*, 1–4. <https://doi.org/10.1520/D6925-15.2>
- Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453–1477. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>
- Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M., & Karim, M. R. (2014). Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Materials and Design*, 53, 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.015>
- Baniya, H. B., Shrestha, R., Guragain, R. P., Kshetri, M. B., Pandey, B. P., & Subedi, D. P. (2020). Generation and Characterization of an Atmospheric-Pressure Plasma Jet (APPJ) and Its Application in the Surface Modification of Polyethylene Terephthalate. *International Journal of Polymer Science*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9247642>
- Bastos, J. B. S., Babadopulos, L. F. A. L., & Soares, J. B. (2017). Relationship between multiple stress creep recovery (MSCR) binder test results and asphalt concrete rutting resistance in Brazilian roadways. *Construction and Building Materials*, 145, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.216>
- Beaumont, N. J., Aanesen, M., Austen, M. C., Börger, T., Clark, J. R., Cole, M., Hooper, T., Lindeque, P. K., Pascoe, C., & Wyles, K. J. (2019). Global ecological, social and economic impacts of marine plastic. *Marine Pollution Bulletin*, 142, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.022>
- Bessa, I. S., Branco, V. T. F. C., Soares, J. B., & Neto, J. A. N. (2015). Aggregate Shape Properties and Their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), 04014212. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001181](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001181)
- Bidgoli, M. A., Naderi, K., & Moghadas Nejad, F. (2019). Effect of Filler Type on Moisture

- Susceptibility of Asphalt Mixtures Using Mechanical and Thermodynamic Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(4), 04019024. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002648](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002648)
- Brito, G. Q. (2020). *Desempenho de Mistura Asfáltica do Tipo Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) com a Inserção de PET (Polietileno Tereftalato) Micronizado*.
- Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N. (2008a). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: Mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), 81–98. <https://doi.org/10.1080/10298430701792128>
- Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N. (2008b). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 2: Characterisation and modelling. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), 99–114. <https://doi.org/10.1080/10298430701792144>
- Carvalho, J. C., de Rezende, L. R., Cardoso, F. B. d. F., Lucena, L. C. d. F. L., Guimarães, R. C., & Valencia, Y. G. (2015). Tropical soils for highway construction: Peculiarities and considerations. *Transportation Geotechnics*, 5, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.004>
- Changmai, M., Banerjee, P., Nahar, K., & Purkait, M. K. (2018). A novel adsorbent from carrot, tomato and polyethylene terephthalate waste as a potential adsorbent for Co (II) from aqueous solution: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.009>
- Chen, M., Lin, J., & Wu, S. (2011). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3909–3914. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>
- CNT. (2021). *Pesquisa CNT de Rodovias 2021*.
- Colpo, G. B. (2019). *Comportamento à fadiga de misturas asfálticas: ensaios laboratoriais e instrumentação in situ*.
- Coutinho, R. P., Babadopulos, L. F. A. L., Freire, R. A., Castelo Branco, V. T. F., & Soares, J. B. (2013). The use of stress sweep tests for asphalt mixtures nonlinear viscoelastic and fatigue damage responses identification. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 47(5), 895–909. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0101-x>
- Dalhat, M. A., & Adesina, A. Y. (2020). Utilization of micronized recycled polyethylene waste to improve the hydrophobicity of asphalt surfaces. *Construction and Building Materials*, 240, 117966. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117966>
- 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. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002744](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002744)
- Di Benedetto, H., De La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., & Lundström, R. (2004). Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 37(267), 202–216. <https://doi.org/10.1007/bf02481620>
- DNER ME 035. (1998). Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles". *Departamento Nacional De Estradas De Rodagem*, 6.
- DNER ME 054. (1997). Método de Ensaio - Equivalente de Areia. *Departamento Nacional De*

- Estradas De Rodagem*, 10. <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me054-97.pdf>
- DNER ME 083. (1998). Agregados - Análise granulométrica. *Departamento Nacional De Estradas De Rodagem*, 1–5.
- DNER ME 084. (1995). Agregado Miúdo - Determinação da Densidade Real. *Departamento Nacional De Estradas De Rodagem*, 1–3.
- DNER ME 086. (1994). Agregado - Determinação do Índice de Forma. *Departamento Nacional De Estradas De Rodagem*, 5.
- DNER ME 193. (1996). Materiais Betuminosos Líquidos e Semi-sólidos - Determinação da Densidade e Massa Específica. *Departamento Nacional De Estradas De Rodagem*, 1–6.
- DNIT 031. (2006). Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico - Especificação de Serviço. *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*, 1–14.
- DNIT 131. (2010). Materiais Asfálticos – Determinação do Ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola - Método de ensaio. *Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes*, 6.
- DNIT 135. (2018). Asphalt paving - Asphalt mixes - Determination of the resilient modulus - Test Method. *Brazilian National Department of Transport Infrastructure (DNIT)*.
- DNIT 136. (2018). Asphalt paving – Asphalt mixes – Determination of tensile strength by diametric compression - Test method. *Brazilian National Department of Transport Infrastructure (DNIT)*.
- DNIT 155. (2010). Material Asfáltico – Determinação da Penetração - Método de Ensaio. *Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes*, 1–7.
- DNIT 180. (2018). Pavimentação - Misturas Asfálticas - Determinação do Dano por Umidade Induzida – Método de Ensaio. *Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes*, 9.
- Esfandabad, A. S., Motevalizadeh, S. M., Sedghi, R., Ayar, P., & Asgharzadeh, S. M. (2020). Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET). *Construction and Building Materials*, 259, 120410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120410>
- Espinosa, L. V., Gadler, F., Mota, R. V., Guatimosim, F. V., Camargo, I., Vasconcelos, K., Rodrigo, R. M., & Bernucci, L. L. B. (2021). Multi-scale study of bio-binder mixtures as surface layer: Laboratory evaluation and field application and monitoring. *Construction and Building Materials*, 287, 122982. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122982>
- Ferreira, J. L. S., Babadopulos, L. F. A. L., Bastos, J. B. S., & Soares, J. B. (2020). A tool to design rutting resistant asphalt mixes through aggregate gradation selection. *Construction and Building Materials*, 236, 117531. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117531>
- Ferreira, J. W. dos S., Marroquin, J. F. R., Felix, J. F., Farias, M. M., & Casagrande, M. D. T. (2022). The feasibility of recycled micro polyethylene terephthalate (PET) replacing natural sand in hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 330(December 2021), 127276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127276>
- Ferreira, J. W. dos S., Senez, P. C., & Casagrande, M. D. T. (2021). Pet fiber reinforced sand performance under triaxial and plate load tests. *Case Studies in Construction Materials*,

15(October), e00741. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00741>

- Fini, E. H., Hung, A. M., & Roy, A. (2019). Active Mineral Fillers Arrest Migrations of Alkane Acids to the Interface of Bitumen and Siliceous Surfaces. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(12), 10340–10348. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00352>
- Freire, R. A., F. A. L. Babadopulos, L., T. F. Castelo Branco, V., & Bhasin, A. (2017). Aggregate Maximum Nominal Sizes' Influence on Fatigue Damage Performance Using Different Scales. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017067. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001912](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001912)
- Ge, D., Yan, K., You, Z., & Xu, H. (2016). Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene. *Construction and Building Materials*, 126, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.014>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 3–8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Geyter, N., Morent, R., & Leys, C. (2007). Surface characterization of plasma-modified polyethylene by contact angle experiments and ATR-FTIR spectroscopy. *Surface and Interface Analysis*, 40(3–4), 608–611. <https://doi.org/10.1002/sia.2611>
- Ghabchi, R., Dharmarathna, C. P., & Mihandoust, M. (2021). Feasibility of using micronized recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as an asphalt binder additive: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123377>
- Gibreil, H. A. A., & Feng, C. P. (2017). Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 142, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.062>
- Giraldi, A. L. F. M., De Jesus, R. C., & Mei, L. H. I. (2005). The influence of extrusion variables on the interfacial adhesion and mechanical properties of recycled PET composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163(SPEC. ISS.), 90–95. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.046>
- Girija, B. G., Sailaja, R. R. N., & Madras, G. (2005). Thermal degradation and mechanical properties of PET blends. *Polymer Degradation and Stability*, 90(1), 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.03.003>
- Gómez-Meijide, B., Ajam, H., Lastra-González, P., & Garcia, A. (2018). Effect of ageing and RAP content on the induction healing properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 179, 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.121>
- Gürü, M., Çubuk, M. K., Arslan, D., Farzarian, S. A., & Bilici, İ. (2014). An approach to the usage of polyethylene terephthalate (PET) waste as roadway pavement material. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.018>
- Hassani, A., Ganjidoust, H., & Maghanaki, A. A. (2005). Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management and Research*, 23(4), 322–327. <https://doi.org/10.1177/0734242X05056739>
- Hefer, A. W., Little, D. N., Lytton, R. L., Al-Qadi, I. L., Taylor, M., King, G., & Anderson, D. (2005). A synthesis of theories and mechanisms of bitumen-aggregate adhesion including recent advances in quantifying the effects of water. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*,

74(March), 139–195.

- Huang, Z., Bi, L., Zhang, Z., & Han, Y. (2012). Effects of dimethylolpropionic acid modification on the characteristics of polyethylene terephthalate fibers. *Molecular Medicine Reports*, 6(4), 709–715. <https://doi.org/10.3892/mmr.2012.1012>
- Hung, A. M., Pahlavan, F., Shakiba, S., Chang, S. L. Y., Louie, S. M., & Fini, E. H. (2019). Preventing Assembly and Crystallization of Alkane Acids at the Silica-Bitumen Interface to Enhance Interfacial Resistance to Moisture Damage. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(47), 21542–21552. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b04890>
- Kakar, M. R., Mikhailenko, P., Piao, Z., Bueno, M., & Poulikakos, L. (2021). Analysis of waste polyethylene (PE) and its by-products in asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 280, 122492. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122492>
- Kalantar, Z. N., Karim, M. R., & Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials*, 33, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009>
- Kasavan, S., Yusoff, S., Rahmat Fakri, M. F., & Siron, R. (2021). Plastic pollution in water ecosystems: A bibliometric analysis from 2000 to 2020. *Journal of Cleaner Production*, 313(June), 127946. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127946>
- Kazemi, M., Faisal Kabir, S., & Fini, E. H. (2021). State of the art in recycling waste thermoplastics and thermosets and their applications in construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 174(June). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105776>
- Khan, M. I., Sutanto, M. H., Napiah, M. Bin, Zoorob, S. E., Al-Sabaeei, A. M., Rafiq, W., Ali, M., & Memon, A. M. (2021). Investigating the mechanical properties and fuel spillage resistance of semi-flexible pavement surfacing containing irradiated waste PET based grouts. *Construction and Building Materials*, 304(May), 124641. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124641>
- Kim, Y. R. (2009). *Modeling of Asphalt Concrete*. McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.1036/007146462X>
- Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., & Ismail, N. 'Izzati. (2021). Current state of marine plastic pollution and its technology for more eminent evidence: A review. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123537. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123537>
- Kutay, M. E., & Lanotte, M. (2018). Viscoelastic continuum damage ( VECD ) models for cracking problems in asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 8436, 0. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1279492>
- Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, Á., & Indacoechea-Vega, I. (2016). Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste. *Construction and Building Materials*, 112, 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.156>
- Leandro, R. P., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. L. B. (2017). Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 156, 424–434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.178>
- Lebreton, L., & Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and

- disposal. *Palgrave Communications*, 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>
- Leng, Z., Sreeram, A., Padhan, R. K., & Tan, Z. (2018). Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Journal of Cleaner Production*, 196, 615–625. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.119>
- Li, Y., Yang, J., & Tan, T. (2015). Study on adhesion between asphalt binders and aggregate minerals under ambient conditions using particle-modified atomic force microscope probes. *Construction and Building Materials*, 101, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.011>
- Likitlersuang, S., & Chompoorat, T. (2016). Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(5), 337–344. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.002>
- Lopes, L. N., de Farias, M. M., & de Mello, L. G. R. (2020). Fatigue tests and damage analyses in modified binders and gap-graded asphalt mixtures with Reacted and Activated Rubber–RAR. *Road Materials and Pavement Design*, 0629. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1710553>
- López, M. A. C., Fedrigo, W., Kleinert, T. R., Matuella, M. F., Núñez, W. P., & Ceratti, J. A. P. (2018). Flexural fatigue evaluation of cement-treated mixtures of reclaimed asphalt pavement and crushed aggregates. *Construction and Building Materials*, 158, 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.003>
- Louzada, N. dos S. L., Malko, J. A. C., & Casagrande, M. D. T. (2019). Behavior of Clayey Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 04019218. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002863](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002863)
- Lucas Júnior, J. L. O., Da Silva, L. S. V., Rocha, W. S., Babadopulos, L. F. A. L., & Soares, J. B. (2021). Effects of rheology and adhesiveness of asphalt binders to different substrates on the resistance to moisture conditioning. *Journal of Adhesion*, 00(00), 1–20. <https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1942855>
- Mahmoud, E., Masad, E., & Nazarian, S. (2010). Discrete Element Analysis of the Influences of Aggregate Properties and Internal Structure on Fracture in Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1), 10–20. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000005](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000005)
- Mazzoni, L. N., Takahashi, M. M., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. (2020). Avaliação da influência do envelhecimento e da temperatura nas características viscoelásticas de ligantes asfálticos. *TRANSPORTES*, 28(1), 135–146. <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i1.1897>
- Mello, L. G. R. de, Farias, M. M. de, & Kaloush, K. E. (2018). Using damage theory to analyze fatigue of asphalt mixtures on flexural tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(6), 617–626. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.02.003>
- Mello, L. G. R. (2008). *A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas*. Universidade de Brasília.
- Merkel, D. R., Kuang, W., Malhotra, D., Petrossian, G., Zhong, L., Simmons, K. L., Zhang, J., & Cosimbescu, L. (2020). Waste PET Chemical Processing to Terephthalic Amides and

- Their Effect on Asphalt Performance. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(14), 5615–5625. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00036>
- Mikhailenko, P., Piao, Z., Kakar, M. R., Athari, S., Bueno, M., & Poulikakos, L. D. (2021). Effect of waste PET and CR as sand replacement on the durability and effect of waste PET and CR as sand replacement on the durability and acoustical properties of semi dense asphalt (SDA) mixtures. *Sustainable Materials and Technologies*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00295>
- Mistry, R., & Kumar Roy, T. (2021). Performance evaluation of bituminous mix and mastic containing rice husk ash and fly ash as filler. *Construction and Building Materials*, 268, 121187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121187>
- Mocelin, D. M. (2018). *Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico*.
- Modarres, A., & Hamed, H. (2014a). Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET). *Construction and Building Materials*, 68, 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.054>
- Modarres, A., & Hamed, H. (2014b). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials and Design*, 61, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.046>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.054>
- Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M. R. (2014). Experimental characterization of rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads. *Construction and Building Materials*, 65, 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.006>
- Moreno, F., & Rubio, M. C. (2013). Effect of aggregate nature on the fatigue-cracking behavior of asphalt mixes. *Materials and Design*, 47, 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.048>
- Moura, B. L. R. de, Teixeira, J. E. S. L., Simão, R. A., Khedmati, M., Kim, Y. R., & Pires, P. J. M. (2020). Adhesion between steel slag aggregates and bituminous binder based on surface characteristics and mixture moisture resistance. *Construction and Building Materials*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120685>
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., Silva-Klein, L. T., Lastra-González, P., & Castro-Fresno, D. (2019). Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen. *Waste Management*, 87, 751–760. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.018>
- Navarro, R., Ferrándiz, S., López, J., & Seguí, V. J. (2008). The influence of polyethylene in the mechanical recycling of polyethylene terephthalate. *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1–3), 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.126>
- Oldham, D., Mallick, R., & Fini, E. H. (2021). Reducing susceptibility to moisture damage in asphalt pavements using polyethylene terephthalate and sodium montmorillonite clay. *Construction and Building Materials*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121302>

- Oliveira Junior, M., & Farias, M. M. (2020). A simple numerical methodology to simulate creep and recovery tests in HMA. *Construction and Building Materials*, 262, 120793. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120793>
- Osmari, P. H., de Souza, R. C., do Nascimento, L. A. H., & Aragão, F. T. S. (2020). Evaluation of the relationship between the fatigue performance of FAM and AC mixtures based on volumetric characteristics and on the S-VECD theory. *Construction and Building Materials*, 265, 13–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120294>
- Padhan, R. K., Gupta, A. A., Badoni, R. P., & Bhatnagar, A. K. (2013). Poly(ethylene terephthalate) waste derived chemicals as an antistripping additive for bitumen - An environment friendly approach for disposal of environmentally hazardous material. *Polymer Degradation and Stability*, 98(12), 2592–2601. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.019>
- Partl, M. N., Flisch, A., & Jönsson, M. (2007). Comparison of Laboratory Compaction Methods using X-ray Computer Tomography. *Road Materials and Pavement Design*, 8(2), 139–164. <https://doi.org/10.3166/rmpd.8.139-164>
- Pellinen, T. K., Witczak, M. W., & Bonaquist, R. F. (2003). Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-Linear Least Squares Optimization. *Recent Advances in Materials Characterization and Modeling of Pavement Systems*, 83–101. [https://doi.org/10.1061/40709\(257\)6](https://doi.org/10.1061/40709(257)6)
- Pereira, A. P. S., Da Silva, M. H. P., Lima, É. P., Dos Santos Paula, A., & Tommasini, F. J. (2017). Processing and characterization of PET composites reinforced with geopolymer concrete waste. *Materials Research*, 20, 411–420. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0734>
- Pérez, I., & Pasandín, A. R. (2017). Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 165, 405–414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.140>
- Plessis, A., & Boshoff, W. P. (2019). A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials. *Construction and Building Materials*, 199, 637–651. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.049>
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- Rai, P. K., Lee, J., Brown, R. J. C., & Kim, K. H. (2021). Micro- and nano-plastic pollution: Behavior, microbial ecology, and remediation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125240>
- Rondón-Quintana, H. A., Ruge-Cárdenas, J. C., & Farias, M. M. de. (2019). Behavior of Hot-Mix Asphalt Containing Blast Furnace Slag as Aggregate: Evaluation by Mass and Volume Substitution. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 04018364. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002574](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002574)
- Sabouri, M., & Kim, Y. R. (2014). Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. *Transportation Research Record*, 2447, 117–125. <https://doi.org/10.3141/2447-13>
- Samperi, F., Puglisi, C., Alicata, R., & Montaudo, G. (2004). Thermal degradation of

- poly(ethylene terephthalate) at the processing temperature. *Polymer Degradation and Stability*, 83(1), 3–10. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00166-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00166-6)
- Sanchez-Cotte, E. H., Fuentes, L., Martinez-Arguelles, G., Rondón Quintana, H. A., Walubita, L. F., & Cantero-Durango, J. M. (2020). Influence of recycled concrete aggregates from different sources in hot mix asphalt design. *Construction and Building Materials*, 259, 120427. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120427>
- Shanbara, H. K., Ruddock, F., & Atherton, W. (2018). A laboratory study of high-performance cold mix asphalt mixtures reinforced with natural and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, 172, 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.252>
- Shu, X., & Huang, B. (2008). Dynamic Modulus Prediction of HMA Mixtures Based on the Viscoelastic Micromechanical Model. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(8), 530–538. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:8\(530\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:8(530))
- Shukla, S. R., & Harad, A. M. (2006). Aminolysis of polyethylene terephthalate waste. *Polymer Degradation and Stability*, 91(8), 1850–1854. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.11.005>
- Sides, A., Uzan, J., & Perl, M. (1985). A Comprehensive Viscoelasto-Plastic Characterization of Sand-Asphalt Compressive and Tensile Cyclic Loading. *Journal of Testing and Evaluation*, 13(1), 10. <https://doi.org/10.1520/JTE10760J>
- Silva, G. G., Valente, M. L. da C., Bachmann, L., & dos Reis, A. C. (2019). Use of polyethylene terephthalate as a prosthetic component in the prosthesis on an overdenture implant. *Materials Science and Engineering C*, 99(December 2018), 1341–1349. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.01.136>
- Silva, J. A. A., De Figueirêdo Lopes Lucena, L. C., Rodrigues, J. K. G., Carvalho, M. W., & Costa, D. B. (2015). Use of Micronized Polyethylene Terephthalate (Pet) Waste in Asphalt Binder. *Petroleum Science and Technology*, 33(15–16), 1508–1515. <https://doi.org/10.1080/10916466.2015.1079538>
- Silva, J. de A. A. e., Rodrigues, J. K. G., de Carvalho, M. W., Lucena, L. C. de F. L., & Cavalcante, E. H. (2017). Mechanical performance of asphalt mixtures using polymer-micronized PET-modified binder. *Road Materials and Pavement Design*, 19(4), 1001–1009. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1283353>
- Smith, B. J., & Hesp, S. A. M. (2000). Crack Pinning in Asphalt Mastic and Concrete: Regular Fatigue Studies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1728(1), 75–81. <https://doi.org/10.3141/1728-11>
- Sousa, P., Kassem, E., Masad, E., & Little, D. (2013). New design method of fine aggregates mixtures and automated method for analysis of dynamic mechanical characterization data. *Construction and Building Materials*, 41, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.038>
- Stock, F., Kochleus, C., Bänisch-Baltruschat, B., Brennholt, N., & Reifferscheid, G. (2019). Sampling techniques and preparation methods for microplastic analyses in the aquatic environment – A review. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 113, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.01.014>
- Taherkhani, H., & Arshadi, M. R. (2017). Investigating the mechanical properties of asphalt concrete containing waste polyethylene terephthalate. *Road Materials and Pavement*

- Design*, 20(2), 381–398. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1395354>
- Torres, A., Brandt, J., Lear, K., & Liu, J. (2017). A looming tragedy of the sand commons. *Science*, 357(6355), 970–971. <https://doi.org/10.1126/science.aao0503>
- Torres, N., Robin, J. J., & Boutevin, B. (2000). Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection molding. *European Polymer Journal*, 36(10), 2075–2080. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(99\)00301-8](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(99)00301-8)
- Trindade, M. J., Dias, M. I., Rocha, F., Prudêncio, M. I., & Coroado, J. (2011). Bromine volatilization during firing of calcareous and non-calcareous clays: Archaeometric implications. *Applied Clay Science*, 53(3), 489–499. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.07.001>
- UNEP. (2014). Valuing Plastics: The Business Case for Measuring, Managing and Disclosing Plastic Use in the Consumer Goods Industry. In *United Nations Environment Programme (UNEP)*. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25302/Valuing\\_Plastic\\_ES.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Awww.gpa.unep.org%0Awww.unep.org/pdf/ValuingPlastic/](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25302/Valuing_Plastic_ES.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Awww.gpa.unep.org%0Awww.unep.org/pdf/ValuingPlastic/)
- UNEP. (2016). Marine Plastic Debris & Microplastics. Global Lessons and Research to Inspire Action and Guide Policy Change. In *United Nations Environment Programme (UNEP)*.
- UNEP. (2019). Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources. In *United Nations Environment Programme (UNEP)*. <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/rising-demand-sand-calls-resource-governance>
- Vargas, G. A. B., Oliveira, A. D., & Aragão, F. T. S. (2018). Influência do modo de aplicação de carga nas propriedades de fratura de uma mistura asfáltica de agregados finos. *Transportes*, 26(3), 39–50. <https://doi.org/10.14295/transportes.v26i3.1609>
- Vasconcelos, Y. (2019). Planeta Plástico. *Pesquisa FAPESP*, 281, 1–23.
- Vethaak, A. D., & Legler, J. (2021). Microplastics and human health. *Science*, 371(6530), 672–674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>
- Walubita, L., Zhang, J., Das, G., Hu, X., Mushota, C., Alvarez, A., & Scullion, T. (2012). Hot-mix asphalt permanent deformation evaluated by Hamburg wheel tracking, dynamic modulus, and repeated load tests. *Transportation Research Record*, 2296, 46–56. <https://doi.org/10.3141/2296-05>
- Wang, Y. D., Underwood, B. S., & Kim, Y. R. (2020). Development of a fatigue index parameter, S app , for asphalt mixes using viscoelastic continuum damage theory. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2), 438–452. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1751844>
- Wang, Y., & Richard Kim, Y. (2017). Development of a pseudo strain energy-based fatigue failure criterion for asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(10), 1182–1192. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1394100>
- Wu, W., Jiang, W., Yuan, D., Lu, R., Shan, J., Xiao, J., & Ogbon, A. W. (2021). A review of asphalt-filler interaction: Mechanisms, evaluation methods, and influencing factors. *Construction and Building Materials*, 299(March), 124279.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124279>

- WWF. (2019). Solving plastic Pollution: Transparency and Accountability. In *WWF Report*.
- Xin, X., Yao, Z., Shi, J., Liang, M., Jiang, H., Zhang, J., Zhang, X., & Yao, K. (2020). Rheological properties, microstructure and aging resistance of asphalt modified with CNTs/PE composites. *Construction and Building Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120100>
- Xu, H., Tan, Y., & Yao, X. (2016). X-ray computed tomography in hydraulics of asphalt mixtures: Procedure, accuracy, and application. *Construction and Building Materials*, 108, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.032>
- Xu, M., Yi, J., Feng, D., Huang, Y., & Wang, D. (2016). Analysis of Adhesive Characteristics of Asphalt Based on Atomic Force Microscopy and Molecular Dynamics Simulation. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(19), 12393–12403. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b01598>
- Xu, W., Qiu, X., Xiao, S., Hong, H., Wang, F., & Yuan, J. (2020). Characteristics and mechanisms of asphalt–filler interactions from a multi-scale perspective. *Materials*, 13(12), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ma13122744>
- Yoshioka, T., Grause, G., Eger, C., Kaminsky, W., & Okuwaki, A. (2004). Pyrolysis of poly(ethylene terephthalate) in a fluidised bed plant. *Polymer Degradation and Stability*, 86(3), 499–504. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.06.001>
- Zhang, D., Liu, X., Huang, W., Li, J., Wang, C., Zhang, D., & Zhang, C. (2020). Microplastic pollution in deep-sea sediments and organisms of the Western Pacific Ocean. *Environmental Pollution*, 259, 113948. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113948>
- Zhang, J., Alvarez, A. E., Lee, S. I., Torres, A., & Walubita, L. F. (2013). Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation. *Construction and Building Materials*, 44, 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.013>
- Zhao, Z., Jiang, J., Ni, F., & Ma, X. (2021). 3D-Reconstruction and characterization of the pore microstructure within the asphalt FAM using the X-ray micro-computed tomography. *Construction and Building Materials*, 272, 121764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121764>
- Zhou, S. B., Liu, S., & Xiang, Y. (2017). Effects of Filler Characteristics on the Performance of Asphalt Mastic: A Statistical Analysis of the Laboratory Testing Results. *International Journal of Civil Engineering*, 16(9), 1175–1183. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0272-x>