



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

EULÁLIA ROMÃO BARBOSA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, HIDRÁULICO E AMBIENTAL
DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS RECICLADAS

FORTALEZA

2025

EULÁLIA ROMÃO BARBOSA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, HIDRÁULICO E AMBIENTAL
DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS RECICLADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus Fortaleza*, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos.

Coorientador: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B238a Barbosa, Eulália Romão.
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, HIDRÁULICO E AMBIENTAL DE MISTURAS
ASFÁLTICAS POROSAS RECICLADAS / Eulália Romão Barbosa. - 2025.
136 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental,
Campus Fortaleza, 2025.

Orientação: Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos.

Coorientação: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos.

1. Camada porosa de atrito. 2. Propriedades mecânicas e hidráulicas. 3. *Reclaimed Asphalt Pavement*.
4. Cinzas da incineração de resíduos de serviços de saúde. 5. Análise Ambiental. I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Processo: 23256.002913/2025-21

Interessado: Eulália Romão Barbosa

EULÁLIA ROMÃO BARBOSA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, HIDRÁULICO E AMBIENTAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS RECICLADAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* de Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovada em: **07/04/2025**

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos (orientadora)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Documento assinado eletronicamente por **Juceline Batista dos Santos Bastos, Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 08/04/2025, às 10:35, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos, Usuário Externo**, em 08/04/2025, às 13:30, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Barbosa Soares, Usuário Externo**, em 09/04/2025, às 15:15, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **7248555** e o código CRC **F34760D8**.

A Deus por me conceder força e coragem para perseverar nos momentos difíceis, e por ter colocado pessoas maravilhosas em meu caminho para me apoiar e inspirar.

À minha família, em especial aos meus queridos irmãos Adauto, Adaildo e Eudes, dedico esse trabalho por serem minha base ao longo da minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por nunca me desamparar e por me fortalecer em todos os momentos, diante das adversidades.

Minha profunda gratidão à minha orientadora, Juceline Batista dos Santos Bastos, pelo suporte necessário, ensinamentos valiosos, profissionalismo exemplar e pela confiança depositada em mim. Seus conhecimentos e disponibilidade foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Meu muito obrigada, pelo incentivo, paciência, motivação ao longo dessa jornada. Você é minha inspiração e referência na pesquisa e como profissional.

Ao meu coorientador Gemmelle Oliveira Santos, pelo apoio em determinados momentos da pesquisa, nos quais pude contar com seus conhecimentos para avançar no trabalho. Meu muito obrigada, pelo suporte necessário, feedbacks, incentivo, confiança e dedicação exemplar.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental (PGTGA), agradeço pelos ensinamentos durante o mestrado. Especialmente às professoras Teresa Farias, Waleska Eloí e Glória Maria, pelo ensino inspirador, incentivo constante e dedicação exemplar, foram fundamentais para meu crescimento acadêmico.

Ao professor Lucas Babadopulos, pelas valiosas contribuições a esta pesquisa. Sou imensamente grata pela parceria, pelo conhecimento compartilhado e, principalmente, por ser um profissional tão dedicado, atencioso e exemplar. Muito obrigada por tudo!

Ao professor Jorge Soares, por aceitar a participar da banca da defesa e por suas excelentes contribuições. Obrigada por tudo!

Ao professor Iuri Bessa, pela cordialidade com as atividades no laboratório, reciprocidade e parceria, meu muito obrigada!

Às minhas queridas irmãs, Erisolúcia Barbosa, Maria do Carmo e Solange Barbosa, pelo incentivo, apoio durante meu percurso de jornada acadêmica.

Ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC/LMP e ao laboratorista Rômulo pela ajuda com os ensaios e confecção das misturas, e à Leônia, Wesley e Johnny pelo suporte com os ensaios com os ligantes. Vocês foram excepcionais, muito obrigada por tanto.

Ao Laboratório de Solos do IFCE e ao Laboratorista Sabóia pela ajuda nos ensaios.

Ao Laboratório de Raios-X (LRX) do Departamento de Física da UFC.

Agradeço especialmente aos bolsistas do Laboratório de Misturas Asfálticas da UFC, Lucas Lira, Artur Veras e Lígia Holanda, pela ajuda com os ensaios mecânicos. Vocês foram essenciais para a realização dessa pesquisa.

Aos meus colegas de mestrado, Sandro Braga, Maria Bárbara, Valesca Hellen, Alessandra Bastos e Senira Marcos, pelo apoio concedido ao longo desta pesquisa. Juntos, compartilhamos momentos de colaboração e camaradagem, enriquecendo esta jornada.

Aos meus amigos (as) do laboratório LMP, Lígia, Ranielly, Lívia, Noemy, Lucas, Artur, Assis, Otávio, Madson, Mauro, Abcael, Thayne, Natasha, Natália, Elias e Flávio. A vocês, meu muito obrigada, por tornarem essa etapa mais leve e prazerosa.

À administração do CT-Asfalto, Annie e Iolanda pela solicitude.

À CAPES, pela bolsa concedida; aos projetos que financiaram esta pesquisa (CNPq, FNDCT/MCTI); ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental (PGTGA); e às empresas parceiras — Greca Asfalto, pela disponibilização dos ligantes, e Insttale Engenharia, pelo fornecimento de insumos e parcerias.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegar até aqui.

Obrigada a todos!

“Se quiser ir rápido, vá sozinho. Se quiser ir longe, vá acompanhado” (Provérbio Africano).

RESUMO

O processo contínuo de urbanização tem gerado problemas como a impermeabilização do solo e alagamentos urbanos, impulsionando o desenvolvimento de pavimentos funcionais, como a Camada Porosa de Atrito (CPA), que auxilia na drenagem devido à sua estrutura porosa. No entanto, a durabilidade dessas misturas ainda é um desafio, estando a adesividade entre os componentes um fator crítico para a resistência mecânica e a funcionalidade a longo prazo. Nesse contexto, esta pesquisa investigou o uso de materiais reciclados, como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) e Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviço de Saúde (CIRSS), em misturas asfálticas porosas, visando melhorar o desempenho mecânico e manter suas propriedades funcionais com redução de riscos ao meio ambiente. Foram produzidas cinco misturas asfálticas porosas utilizando dois ligantes modificados: Asfalto-Borracha (AB) e Asfalto Altamente Modificado (HiMA). As misturas incluíram uma de referência com AB (AB-AM), uma com 10% de RAP (AB-RAP) e três com HiMA: uma de referência (HI-AM), uma com 10% de RAP (HI-RAP) e outra com 10% de RAP e 1% de cinzas (HI-RAP-C). Todas as misturas foram dosadas com 4,5% de ligante asfáltico, seguindo a metodologia *Superpave*. O programa experimental foi dividido em duas fases: a primeira avaliou as misturas com AB por meio de ensaios mecânicos (resistência à tração por compressão diametral, desgaste Cântabro, dano por umidade, módulo de resiliência, módulo complexo, ressonância por impacto, deformação permanente) e permeabilidade. Já a segunda fase focou nas misturas com HiMA e nos parâmetros mecânicos de resistência à tração, desgaste Cântabro, dano por umidade, módulo de resiliência, vazios comunicantes e permeabilidade, com análise estatística dos dados. Adicionalmente, foram realizados ensaios de lixiviação em batelada, solubilização e lixiviação em coluna. Os resultados indicaram que as misturas com RAP e AB apresentaram função estrutural, mas não atenderam aos requisitos de projeto para CPA em termos de resistência à tração (0,55 MPa), desagregação ($\leq 25\%$) e suscetibilidade à umidade (80%). A permeabilidade mostrou coeficientes hidráulicos médios (10^{-2} cm/s) para todas as misturas produzidas. Já as misturas com HiMA apresentaram melhores resultados para a resistência à tração, dano por umidade e módulo de resiliência, embora não tenham atendido ao limite de desagregação (perda máxima de 25%). As análises químicas identificaram altas concentrações de óxidos de silício para agregado mineral (47,3%) e RAP (48,6%) e óxido de cálcio para as cinzas (64,9%). Os ensaios de lixiviação indicaram que os resíduos não ultrapassaram os limites de concentração estabelecidos pela norma NBR 10.004/2004, sendo classificados como não perigosos. No entanto, o ensaio de solubilização revelou a liberação de alguns compostos, levando a

classificação dos resíduos como Classe II A Não-inertes. Conclui-se que, tecnicamente, as misturas recicladas com HiMA apresentaram desempenho mecânico satisfatório, exceto na resistência à desagregação. Ambientalmente, os resíduos não apresentam risco de contaminação, uma vez que os ensaios de lixiviação em batelada e em coluna não mostraram potencial de liberação de substâncias que comprometam a qualidade da água ou do solo.

Palavras-chave: Camada porosa de atrito; Propriedades mecânicas e hidráulicas; *Reclaimed Asphalt Pavement*; Cinzas da incineração de resíduos de serviços de saúde; Análise Ambiental.

ABSTRACT

The continuous urbanization process has led to issues such as soil impermeabilization and urban flooding, driving the development of functional pavements like the Porous Friction Course (PFC), which aids in drainage due to its porous structure. However, the durability of these mixtures remains a challenge, with the adhesion between components being a critical factor for mechanical strength and long-term functionality. In this context, this research investigated the use of recycled materials, such as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and Healthcare Waste Incineration Ashes (HWIA), in porous asphalt mixtures, aiming to improve mechanical performance while maintaining functional properties and reducing environmental risks. Five porous asphalt mixtures were produced using two modified binders: Rubberized Asphalt (RA) and Highly Modified Asphalt (HiMA). The mixtures included a reference mixture with RA (RA-MA), one with 10% RAP (RA-RAP), and three with HiMA: a reference mixture (HI-MA), one with 10% RAP (HI-RAP), and another with 10% RAP and 1% ashes (HI-RAP-A). All mixtures were designed with 4.5% asphalt binder, following the Superpave methodology. The experimental program was divided into two phases: the first assessed RA mixtures through mechanical tests (indirect tensile strength, Cantabro loss, moisture damage, resilient modulus, complex modulus, impact resonance, and permanent deformation) and permeability. The second phase focused on HiMA mixtures, evaluating tensile strength, Cantabro loss, moisture damage, resilient modulus, interconnected voids, and permeability, with statistical data analysis. Additionally, batch leaching, solubilization, and column leaching tests were conducted. The results indicated that the mixtures containing RAP and AR exhibited structural functionality but did not meet the PFC design requirements in terms of tensile strength (0.55 MPa), disintegration resistance ($\leq 25\%$), and moisture susceptibility (80%). Permeability tests showed average hydraulic coefficients on the order of 10^{-2} cm/s for all mixtures produced. In contrast, the mixtures with HiMA presented better results for tensile strength, moisture damage resistance, and resilient modulus, although they did not meet the disintegration limit (maximum loss of 25%). Chemical analyses identified high concentrations of silicon oxides in the mineral aggregate (47.3%) and RAP (48.6%), and a high calcium oxide content in the ashes (64.9%). Leaching tests indicated that the residues did not exceed the concentration limits established by NBR 10.004/2004, classifying them as non-hazardous. However, the solubilization test revealed the release of certain compounds, leading to the classification of the residues as Class II A Non-Inert. In conclusion, the HiMA recycled mixtures demonstrated satisfactory mechanical performance, except for disintegration resistance. Environmentally, the residues do

not pose a contamination risk, as the batch and column leaching tests showed no potential for the release of substances that could compromise water or soil quality.

Keywords: Porous Friction Course; Mechanical and Hydraulic Properties; Reclaimed Asphalt Pavement; Healthcare waste incineration ashes; Environmental Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Esquema de funcionamento da CPA.....	21
Figura 2 — Diagrama esquemático de uma CPA de camada dupla.....	23
Figura 3 — Tipo de colmatação	24
Figura 4 — Distribuição dos vazios em uma mistura porosa.....	25
Figura 5 — Vazio vertical e horizontal	25
Figura 6 — Esquema do experimento de Darcy	27
Figura 7 — Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).....	31
Figura 8 — Interação dos ligantes na mistura asfáltica reciclada	33
Figura 9 — Esquema de fabricação do AB via úmido pelo processo de mistura estocável	37
Figura 10 — Fluxograma experimental.....	44
Figura 11 — Pilha de brita 3/8" - OCS.....	46
Figura 12 — Pilha de RAP	46
Figura 13 — Resíduos (a) Cinzas (b) e Planta-Incinerador (c)	47
Figura 14 — Curvas granulométricas dos agregados naturais primeira e segunda coleta	48
Figura 15 — Curvas granulométricas do RAP	49
Figura 16 — Forma crivos redutores (a), Forma aplicativo de imagem 2D (b).....	49
Figura 17 — Preparo das amostras para análises químicas.....	51
Figura 18 — Curvas granulométricas de projeto das misturas.....	53
Figura 19 — Ensaio de RT	56
Figura 20 — Representação do ensaio de desgaste cântabro	57
Figura 21 — Representação do ensaio de dano por umidade induzida.....	57
Figura 22 — UTM (a), Ensaio em andamento (b) Duração dos tempos de descanso (c)	58
Figura 23 — Frequências de carregamento (a) e ensaio em execução (b)	59
Figura 24 — Ensaio de deformação permanente SSR	61
Figura 25 — Procedimento do ensaio de vazios comunicantes	62
Figura 26 — Permeâmetro de carga constante.....	63
Figura 27 — Fluxograma das análises ambientais	64
Figura 28 — (a) CP submetido à expansão (b) CP em espera para desenformar.....	65
Figura 29 — Fluxograma das misturas e ensaios com AB.....	66
Figura 30 — Fluxograma experimental dos ensaios não destrutivos.....	67
Figura 31 — Representação e exemplo de resultados do ensaio de ressonância por impacto .	68
Figura 32 — Procedimento de extração do lixiviado em batelada.....	70

Figura 33 — Procedimento de extração do extrato solubilizado	70
Figura 34 — Configuração do ensaio de lixiviação em coluna.....	71
Figura 35 — Variação do Vv e números de giros das misturas AB.....	73
Figura 36 — Volume de vazio médio das misturas com HiMA	74
Figura 37 — RT das misturas AB-AM e AB-RAP	75
Figura 38 — Desgaste cântabro das misturas AB	76
Figura 39 — Dano por umidade induzida	77
Figura 40 — Módulo de resiliência das misturas AB	78
Figura 41 — Comparação das curvas mestras das misturas à 21,1 °C.....	80
Figura 42 — Curvas mestras do módulo complexo segmentadas das temperaturas.....	81
Figura 43 — Módulo complexo nas curvas Cole-Cole	82
Figura 44 — Diagrama de Black com modelagem 2S2P1D	82
Figura 45 — Curvas mestras do ângulo de fase das misturas	83
Figura 46 — Curva mestra: (a) AB-AM e (b) AB-RAP	84
Figura 47 — Deformação permanente das misturas AB-AM e AB-RAP.....	84
Figura 48 — Permeabilidade das misturas AB-AM e AB-RAP	85
Figura 49 — Composição química dos agregados	87
Figura 50 — DRX dos agregados	88
Figura 51 — RT das misturas com HiMA	91
Figura 52 — Perda de massa pelo desgaste cântabro.....	93
Figura 53 — MR das misturas com HiMA	95
Figura 54 — Medianas do RT e RRT	97
Figura 55 — Vazios comunicantes e permeabilidade	99
Figura 56 — Classificação de solos quanto a permeabilidade	100
Figura 57 — Parâmetros inorgânicos da lixiviação em batelada	101
Figura 58 — Parâmetros inorgânicos da lixiviação em coluna	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Classificação dos solos segundo grau de permeabilidade	28
Tabela 2 — Composição química dos principais óxidos das CIRSS da literatura.....	38
Tabela 3 — Ensaio e normas para caracterização geotécnica dos agregados.....	48
Tabela 4 — Características do ligante Asfalto-Borracha	50
Tabela 5 — Características do ligante altamente modificado - HiMA	51
Tabela 6 — Requisitos de projeto da CPA.....	52
Tabela 7 — Composição (%) das misturas	53
Tabela 8 — Ensaio mecânico e normas para avaliação das misturas.....	55
Tabela 9 — Parâmetros da caracterização dos agregados utilizados	73
Tabela 10 — Valor médio das densidades de massa específica máxima e aparente.....	74
Tabela 11 — Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2.....	79
Tabela 12 — Teste de normalidade Shapiro-Wilk por ensaios e misturas.....	89
Tabela 13 — Teste ANOVA para resistência à tração por compressão diametral.....	90
Tabela 14 — Teste ANOVA para desgaste cântabro	92
Tabela 15 — Teste Kruskal-Wallis	94
Tabela 16 — Teste de Dunn's.....	95
Tabela 17 — Teste Kruskal-Wallis	96
Tabela 18 — Teste ANOVA para vazios comunicantes	98
Tabela 19 — Teste ANOVA para permeabilidade.....	98
Tabela 20 — Parâmetros de solubilização das amostras	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AB8	Asfalto-Borracha - Classificação conforme a viscosidade <i>brookfield</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
AMB	Asfalto Modificado com Borracha
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado Quente
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
COVs	Composto Orgânicos Voláteis
CPA	Camada Porosa de Atrito
AB-AM	Mistura de Referência com Asfalto-Borracha
AB-RAP	Mistura Reciclada com Asfalto-Borracha
HI-AM	Mistura de Referência com fresado e HiMA
HI-RAP	Mistura reciclada com fresado e HiMA
HI-RAP-C	Mistura reciclada com (fresado e cinzas) e HiMA
CP	Corpo de Prova
CTRP	Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos
DC	Desgaste Cântabro
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DUI	Dano por Umidade Induzida
DP	Deformação Permanente
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>

EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
EUA	Estados Unidos da América
Fred	Frequência Reduzida
FRF	Funções de Resposta em Frequência
G_{mm}	Massa específica máxima medida
G_{mb}	Massa específica aparente
G_{sa}	Densidade Relativa Real
G_{sb}	Densidade Relativa Aparente
HAPs	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
HiMA	<i>Highly Modified Asphalt</i>
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
K	Coeficiente de Permeabilidade
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LRX	Laboratório de Raio - X
LVDTs	<i>Linear Variable Differential Transformers</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
MR	Módulo de Resiliência
ME_{sa}	Massa Específica Real
ME_{sb}	Massa Específica Aparente
NBR	Norma Brasileira
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RI	Ressonância por Impacto
RSP	Resíduos Sólidos Perigosos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RT	Resistência à Tração
SBS	Estireno Butadieno Estireno

SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SSR	<i>Stress Sweep Rutting</i>
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
T _{ref}	Temperatura de Referência
TCLP	<i>Toxicity characteristic leaching procedure</i>
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OGFC	<i>Open Graded Friction Course</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PA	<i>Porous Asphalt</i>
PEMs	<i>Porous European Mixes</i>
PFC	<i>Porous Friction Course</i>
PSTT	Princípio da Superposição Tempo-Temperatura
UFC	Universidade Federal do Ceará
USTMA	<i>US Tire Manufacturers Association</i>
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
V _v	Volume de Vazios
WLF	<i>William, Landel e Ferry</i>
WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Zn	Zinco
Pb	Chumbo
Cu	Cobre
Sr	Estrôncio
Mn	Manganês
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Fe	Ferro
Ti	Titânio
CaO	Óxido de Cálcio
SiO ₂	Óxido de Silício
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
Na ₂ O	Óxido de Sódio
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
K ₂ O	Óxido de Potássio
TiO ₂	Óxido de Titânio
ZnO	Óxido de Zinco
MgO	Óxido de Magnésio
φ	Ângulo de fase
ΔD	Deslocamento Horizontal
$ E^* $	Módulo Complexo
MPa	Mega Pascal
μ	Razão de Poisson
(φ)	Alfa

β	Beta
%	Porcentagem
A_n	Desgaste de Abrasão
σ_R	Resistência à Tração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Questões de Pesquisa	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos.....	18
2.3	Estrutura do Trabalho	18
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
3.1	Histórico de Uso da Camada Porosa de Atrito (CPA)	20
3.2	Características Gerais da Camada Porosa de Atrito (CPA)	21
3.2.1	<i>Permeabilidade de Misturas Asfálticas Porosas.....</i>	24
3.3	Resíduos Gerados e Destinações.....	28
3.4	Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	31
3.5	Incorporação de RAP em CPAs	34
3.6	Uso de Asfalto-Borracha em Pavimentos	35
3.7	Histórico de Uso e Características Químicas e Mineralógicas das Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde.....	37
3.8	Revisão das Normas e Estudos Relacionados à Classificação e Impactos Ambientais dos Resíduos em Pavimentação	40
4	MATERIAL E MÉTODOS	43
4.1	Material	45
4.1.1	<i>Caracterização dos Materiais Utilizados</i>	47
4.1.2	<i>Caracterização dos Ligantes</i>	50
4.1.3	<i>Caracterização Química</i>	51
4.1.4	<i>Projeto de Misturas.....</i>	52
4.1.4.1	<i>Determinação do Volume de Vazios (Vv).....</i>	53
4.1.5	<i>Caracterização Mecânica</i>	55
4.1.5.1	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)</i>	55
4.1.5.2	<i>Desgaste Cântabro (DC).....</i>	56
4.1.5.3	<i>Dano por Umidade Induzida (DUI)</i>	57
4.1.5.4	<i>Módulo de Resiliência (MR).....</i>	58
4.1.5.5	<i>Módulo Complexo E^*.....</i>	59

4.1.5.6	<i>Deformação Permanente (DP)</i>	60
4.1.6	Caracterização Funcional	61
4.1.6.1	<i>Vazios Comunicantes (VC)</i>	61
4.1.6.2	<i>Permeabilidade (k)</i>	62
4.1.7	Caracterização Ambiental	63
4.1.7.1	<i>Ensaio de Lixiviação e Solubilização</i>	64
4.2	Etapas Metodológicas	64
4.2.1	<i>Avaliação das Propriedades Mecânicas e Hidráulicas das Misturas Produzidas com Asfalto-Borracha</i>	64
4.2.2	<i>Avaliação da Adequação das Abordagens para Determinar a Rigidez das Misturas Produzidas com Asfalto-Borracha</i>	66
4.2.3	<i>Avaliação do Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas Asfálticas Porosas Produzidas com RAP, Cinzas de Resíduos de Serviço de Saúde e Ligante Altamente Modificado – HiMA</i>	68
4.2.4	<i>Caracterização Química dos Efluentes após Ensaio de Lixiviação e Solubilização e Classificação conforme a Norma ABNT 10.004/2004</i>	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1	<i>Avaliação do Comportamento Mecânico e Hidráulico entre as Misturas AB-AM e AB-RAP</i>	72
5.1.1	<i>Caracterização Física dos Constituintes</i>	72
5.1.2	<i>Volume de Vazios</i>	73
5.1.3	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>	74
5.1.4	<i>Desgaste Cântabro</i>	75
5.1.5	<i>Dano por Umidade Induzida</i>	76
5.2	<i>Avaliação da Adequação das Abordagens Utilizadas para Determinar as Propriedades de Rigidez, Módulo de Resiliência (MR), Módulo Complexo E^* e Ressonância por Impacto (RI) em Camadas Porosas de Atrito (CPA)</i>	77
5.2.1	<i>Módulo de Resiliência</i>	77
5.2.2	<i>Módulo Complexo</i>	79
5.2.3	<i>Ressonância por Impacto</i>	83
5.2.4	<i>Deformação Permanente</i>	84
5.2.5	<i>Permeabilidade das Misturas</i>	85

5.3	Avaliação do Comportamento Mecânico e Hidráulico das Misturas Asfálticas Porosas Produzidas com RAP, Cinzas de Resíduo de Serviço de Saúde e Ligante Altamente Modificado – HiMA.....	86
5.3.1	<i>Caracterização Química dos Agregados</i>	86
5.3.2	<i>Análise Estatística das Misturas Produzidas com Ligante Altamente Modificado HiMA</i>	89
5.3.2.1	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>	90
5.3.2.2	<i>Desgaste Cântabro</i>	92
5.3.2.3	<i>Módulo de Resiliência</i>	94
5.3.2.4	<i>Dano por Umidade Induzida</i>	96
5.3.2.5	<i>Vazios Comunicantes e Permeabilidade</i>	97
5.4	Avaliação Ambiental da Caracterização Química do Lixiviado e Solubilizado .	100
5.4.1	<i>Ensaio de Lixiviação e Solubilização</i>	100
6	CONCLUSÕES.....	106
6.1	Avaliação das Propriedades Mecânicas e Hidráulicas das Misturas Produzidas com Asfalto-Borracha	106
6.2	Avaliação da Adequação das Abordagens para Determinar as Propriedades de Rigidez das Misturas Produzidas com Asfalto-Borracha	107
6.3	Avaliação do Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas Asfálticas Porosas Produzidas com RAP, Cinzas de Resíduos de Serviço de Saúde e Ligante Altamente Modificado – HiMA.....	107
6.4	Caracterização Química dos Efluentes após Ensaios de Lixiviação e Solubilização e Classificação conforme a Norma ABNT 10.004/2004.....	108
	REFERÊNCIAS	110

1 INTRODUÇÃO

O processo intensivo da urbanização tem gerado problemas relacionados à impermeabilização do solo, resultando em aumento do escoamento superficial e, consequentemente, no risco de alagamentos urbanos. Esse cenário tem levado ao desenvolvimento de pavimentos que, além de garantirem condições adequadas de trafegabilidade, integrem características funcionais, proporcionando mais conforto e segurança aos usuários.

Uma das alternativas que têm se destacado é o uso de pavimentos asfálticos porosos, conhecido no Brasil como Camada Porosa de Atrito (CPA), que se destaca por suas propriedades funcionais, como alta capacidade de drenagem e redução de ruído, devido aos elevados teores de vazios, que varia entre 18% e 25% (DNER-ES, 1999).

A estrutura permeável da CPA a torna uma ferramenta eficaz para a gestão de águas pluviais, auxiliando no combate a inundações urbanas (Slebi-Acevedo *et al.*, 2023), devido à sua capacidade de infiltração elevada, que pode atingir até 90% (Hammes; Thives, 2023). No entanto, a CPA enfrenta desafios de durabilidade devido à sua baixa resistência e facilidade de desagregação, problemas resultantes de falhas adesivas e coesivas entre o ligante e os agregados (Mo *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2021). Por esse motivo, ligantes modificados de alta viscosidade e agregados de boa qualidade devem ser empregados para esse tipo de mistura (Garcia, 2017).

Além dos desafios técnicos, a indústria de pavimentação enfrenta pressões ambientais e econômicas associadas ao elevado consumo de recursos naturais e à necessidade de destinação adequada de resíduos sólidos. Nesse contexto, a incorporação de materiais reciclados tem sido estudada como alternativa para reduzir impactos ambientais sem comprometer o desempenho funcional dos pavimentos. Entre esses resíduos, destaca-se o fresado, do inglês (*Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP), um resíduo proveniente do pavimento anteriormente em serviço (Cliatt; Plati; Loizos, 2016; Nataadmadja; Prahara; Sumbung, 2017; Zhu; Ma; Dong, 2020).

De acordo com Sahdeo *et al.* (2021), o RAP tem sido reconhecido como uma alternativa promissora para substituir os agregados naturais e ligante em novas misturas asfálticas. A utilização desse material não só apresenta bom desempenho em pistas de rolamento (Cunha *et al.*, 2018), como também reduz a quantidade de resíduos a serem descartados em aterros (Mariyappan; Palammal; Balu, 2023), pátios ou margens de rodovias. Além disso, há evidências de que a incorporação do RAP em misturas asfálticas porosas melhora as propriedades de adesão entre o ligante e os agregados na presença de água (Frigio *et al.*, 2015).

Outro resíduo que tem sido utilizado como material de enchimento em misturas asfálticas densas é a Cinza da Incineração de Resíduos de Serviço de Saúde (CIRSS) (Jaber *et al.*, 2022; Chowdhury *et al.*, 2023). De acordo com as descobertas, pode ser viável a aplicação dessas cinzas em pavimentos.

Luo *et al.* (2017) investigaram a aplicabilidade de cinzas de fundo de incinerador de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em substituição parcial de agregados finos em uma mistura asfáltica porosa e observaram que a resistência à tração e sua relação com os danos causados pela umidade foram positivas, resultados atribuídos à força adesiva proporcionada pelos elevados teores de Óxidos de Cálcio (CaO) presentes na composição das cinzas. Esse achado é atrativo para adição das CIRSS em misturas asfálticas porosas, uma vez que, o Óxido de Cálcio é o principal constituinte da composição dessas cinzas. Entretanto, até onde se sabe, nenhum estudo avaliou a incorporação de CIRSS em pavimentos porosos.

Diante do exposto, busca-se mitigar os impactos ambientais associados ao descarte desses resíduos, ao mesmo tempo, em que se desenvolvem soluções alternativas para atender a infraestrutura moderna, utilizando materiais amplamente disponíveis, como o fresado e as CIRSS. A reciclagem desses materiais na composição de novas camadas de asfalto poroso surge como uma estratégia para melhorar o desempenho mecânico dos pavimentos, além de oferecer condições de tráfego segura, devido às características funcionais desse tipo de revestimento.

1.1 Justificativa

A indústria da pavimentação enfrenta muitos desafios ambientais devido à demanda por matérias-primas e à geração de resíduos resultantes das constantes intervenções no pavimento, como demolições, reformas e recapeamentos de rodovias. Esse cenário tem levado à busca por soluções sustentáveis na construção de pavimentos, impulsionada pelas regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas (Frigio; Canestrari, 2018; Hu; Shu; Huang, 2019).

Nesse contexto, pesquisadores têm direcionado esforços para investigar o uso de materiais reciclados na construção de rodovias, com o intuito de promover a conservação de recursos naturais e a gestão adequada dos resíduos (Bamigboye *et al.*, 2021), bem como otimizar as propriedades mecânicas dos pavimentos com o uso desses materiais. Entre os resíduos comumente utilizados, destaca-se o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP).

O uso do RAP em misturas porosas fundamenta-se na melhoria da coesão entre o agregado e o asfalto, proporcionada pela maior viscosidade do ligante envelhecido presente no RAP, além de estar alinhado aos princípios da sustentabilidade de baixo carbono (Wang *et al.*,

2024). Estudos têm demonstrado que a incorporação de RAP em misturas asfálticas porosas pode melhorar a resistência aos danos causados pela umidade (Frigio *et al.*, 2015; Siala *et al.*, 2021; De Pascale *et al.*, 2023). Uma característica particularmente importante dos pavimentos porosos, uma vez que há desagregação causada pela ação da umidade, sendo esta um dos principais mecanismos de falha nesses revestimentos.

Nas últimas décadas, o Brasil tem passado por um processo intensivo de urbanização, com 84% da população vivendo em áreas urbanas (Hammes; Thives; Ghisiy, 2018). Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), as áreas impermeabilizadas com sistema viário e estacionamentos podem representar até 30% da área da bacia de drenagem (ABCP, 2013). O elevado grau de impermeabilização do solo acentua o escoamento superficial, aumentando o risco de enchentes e catástrofes ambientais. Apesar do uso da CPA não ser comum na pavimentação urbana no Brasil, observa-se uma recente adesão a essa prática na cidade de Fortaleza–CE, como uma medida corretiva nos projetos geométricos das vias urbanas da capital cearense (Maia *et al.*, 2019).

A produção de misturas asfálticas com RAP, cinzas de resíduos de serviço de saúde e ligantes modificados (Asfalto-Borracha e HiMA) pode contribuir para várias metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), sendo: ODS 9 (indústria, inovação e infraestrutura); ODS 11 (cidades e comunidades sustentáveis); ODS 12 (consumo e produção responsáveis); ODS 13 (ação contra a mudança global do clima); e ODS 15 (vida terrestre).

Assim, a utilização de materiais reciclados em misturas asfálticas contribui com a destinação adequada dos resíduos e reduz o consumo de recursos naturais, promovendo um modelo de produção mais responsável.

Nessa perspectiva, a justificativa para buscar soluções alternativas e utilizar materiais residuais, como RAP, ligantes modificados e cinzas (CIRSS), nos revestimentos porosos é baseada na necessidade de superar as limitações dessas camadas, especialmente no que se refere à falha de adesividade provocada pela maior exposição às condições climáticas adversas.

Os revestimentos porosos tradicionais apresentam restrições em termos de desempenho e durabilidade, sendo a adesividade um fator determinante na durabilidade dos pavimentos asfálticos e pode ser explicada por quatro teorias principais: (i) adesão mecânica, (ii) orientação molecular, (iii) energia superficial e (iv) reação química (Hicks, 1991). A presença de agregados ricos em óxidos de ferro e cálcio tende a melhorar a adesividade da mistura asfáltica (Lucas Júnior, 2018).

Para mitigar a perda de adesividade e reduzir os efeitos da umidade nos pavimentos, diversas estratégias têm sido adotadas, incluindo o uso de polímeros como estireno-butadieno-estireno (SBS) e polietileno, aditivos químicos como ácido polifosfórico, agentes *anti-stripping* à base de aminas e nanocal hidratada (Lucas Júnior *et al.*, 2021). Além disso, a modificação do ligante com cimento Portland ou aditivos específicos pode melhorar a resistência à degradação e prolongar a vida útil da mistura (Abohamer *et al.*, 2023). Tais abordagens fortalecem a resistência e a longevidade dos pavimentos porosos, mas também abrem espaço para a incorporação de materiais residuais em novos pavimentos.

Ao adotar materiais residuais em pavimentos asfálticos, contribui-se com o avanço da reciclagem dos resíduos que, de outra forma, seriam descartados de maneira inadequada ou destinados a aterros sanitários. Além disso, essa abordagem mitiga a dependência de recursos naturais não renováveis, como agregados virgens e ligantes asfálticos.

A incorporação de resíduos em pavimentos porosos ainda é pouco abordada na literatura científica. Assim, esta pesquisa visa preencher parte dessa lacuna, fornecendo dados sobre a viabilidade técnica e ambiental. Além disso, com a divulgação dos resultados, espera-se incentivar práticas mais responsáveis na construção e manutenção da infraestrutura viária urbana, em Fortaleza e outras regiões.

Adicionalmente, este estudo buscou contribuir com quatro projetos: “Desenvolvimento de produtos inovadores e sustentáveis para a infraestrutura (CNPq/FNDCT/MCTI)”, “Caracterização do comportamento mecânico e do ciclo de vida de materiais asfálticos e de outros compósitos produzidos com fíleres sustentáveis (CNPq/MCTI/FNDCT)”, “Representatividade feminina no uso de tecnologias para a caracterização avançada de compósitos com incorporação de fíleres de resíduos sólidos (IFCE)” e “Avaliação de técnicas compensatórias de baixo impacto para o manejo de águas pluviais urbanas (CNPq/MCTI)”.

1.2 Questões de Pesquisa

Para a condução desse trabalho, foram estabelecidas as seguintes questões de pesquisas acerca da temática estudada:

- i. Como a combinação do RAP e do Asfalto-Borracha pode influenciar nas propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas asfálticas porosas?

- ii. As abordagens para determinar as propriedades de rigidez, Módulo de Resiliência (MR), módulo complexo $|E^*|$ e Ressonância por Impacto (RI) permitem analisar adequadamente CPAs produzidas com Asfalto-Borracha?
- iii. Como a adição de RAP e Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviço de Saúde (CIRSS) pode influenciar nas propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas asfálticas porosas produzidas com ligante altamente modificado - HiMA?
- iv. Qual é o potencial da lixiviação dos resíduos utilizados em CPA?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento mecânico, hidráulico e ambiental de misturas asfálticas porosas contendo ligantes modificados (asfalto-borracha e HiMA) e materiais reciclados, incluindo RAP e cinzas (CIRSS).

2.2 Objetivos Específicos

- i. Avaliar as propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas asfálticas porosas recicladas comparativamente a uma mistura de referência produzida com Asfalto-Borracha;
- ii. Avaliar a adequação das metodologias utilizadas para determinar a rigidez das misturas produzidas com asfalto-borracha, por meio dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR), Módulo Complexo ($|E|$) e Ressonância por Impacto (RI);
- iii. Avaliar o comportamento mecânico e hidráulico de misturas asfálticas porosas produzidas com RAP, cinzas (CIRSS) e ligante altamente modificado – HiMA;
- iv. Analisar a qualidade e classificar os lixiviados provenientes dos ensaios de lixiviação e solubilização diante da norma ABNT 10.004 (ABNT, 2004).

2.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado em seis sessões. A seção 1 aborda a contextualização do estudo, justificativa e questões de pesquisas. A seção 2 é composta pelos objetivos. A seção 3 é composta pela revisão de literatura, onde são apresentados conteúdos relativos ao histórico de uso de CPAs e suas características mecânicas, funcionais e patológicas. Essa sessão ainda contempla um levantamento da geração e destinações dos resíduos RAP, borracha de pneu inservíveis e cinzas (CIRSS). Também são destacados resultados de pesquisas com uso de RAP em misturas asfálticas porosas, desafios relacionados a incorporação do RAP em novas misturas, além de experiências com pesquisas envolvendo materiais residuais para pavimentação. A seção 4 se refere aos materiais e métodos da pesquisa, onde descrevem os procedimentos realizados, iniciando pela caracterização dos materiais utilizados, planejamento experimental e descrição dos ensaios da pesquisa. A seção 5 é constituída pelos resultados da

pesquisa e na seção 6 são apresentadas as principais conclusões da dissertação, incluindo as contribuições do estudo e desafios encontrados, além de sugestões para pesquisas futuras.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Esta sessão visa fornecer uma base teórica para a temática abordada nesta pesquisa, englobando tópicos específicos como o histórico de uso da Camada Porosa de Atrito (CPA), aspectos funcionais e estruturais, bem como os desafios associados. Além disso, o capítulo aborda as fontes de geração e destinação dos materiais utilizados na pesquisa em questão, com destaque para os desafios relacionados ao uso do RAP, asfalto-borracha e cinzas provenientes da incineração de resíduos de serviços de saúde. Adicionalmente, enfatiza-se a análise do comportamento mecânico, hidráulico e ambiental de misturas asfálticas porosas produzidas com materiais residuais.

3.1 Histórico de Uso da Camada Porosa de Atrito (CPA)

A Camada Porosa de Atrito (CPA), conhecida internacionalmente como *Open Graded Friction Course* (OGFC) ou *Porous Friction Course*, (PFC), nos Estados Unidos e *Porous European Mixes* (PEMs) ou ainda *Porous Asphalt* (PA) na Europa, tem sido amplamente utilizado nos países europeus (Holanda, França e Alemanha), Ásia (China, Japão e Coreia) e Estados Unidos (Alvarez; Matin; Estakhri, 2011).

A literatura reporta que a CPA surgiu nos Estados Unidos a partir de um tratamento de vedação para evitar derrapagem em pavimento molhado na década de 1930, mas foi a partir da década de 1970 que este tipo de pavimento começou a ser aplicado em rodovias e aeroportos na América (Nielsen, 2006). No entanto, devido a desafios como baixa resistência e durabilidade prematura, a viabilidade técnica desse tipo de revestimento não foi efetivamente estabelecida (Zhang *et al.*, 2020). Foi na Europa que houve avanços em seu desempenho levando à popularidade da CPA em diversos países, como Alemanha, Holanda, França, Itália, Reino Unido, Bélgica, Espanha, Suíça e Áustria, impulsionada pelos seus benefícios funcionais como, melhor resistência ao atrito, redução da aquaplanagem, minimização de respingos, melhor visibilidade noturna e diminuição dos níveis de ruído pneu/pavimento (Gu *et al.*, 2018; Anusha; Jagadeesh; Sunil, 2019, Chen; Yang, 2020).

Em 1998, a CPA se consolidou como um material de superfície padrão nas vias expressas japonesas com 67% das ruas pavimentadas com revestimento drenante, demonstrando um desempenho satisfatório após 15 anos de serviço e uma significativa diminuição (85%) no número de acidentes de trânsito com superfícies molhadas (Takahashi, 2013). A segurança é uma das principais razões para que alguns departamentos utilizem os

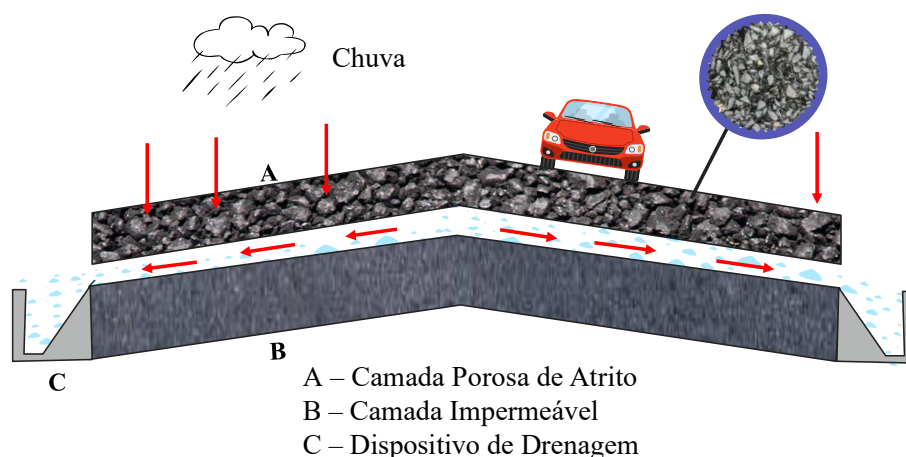
pavimentos porosos, principalmente na França e nos Estados Unidos (Hernández-Saenz *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2020). Na Europa, esse pavimento tem sido aplicado para redução de ruído (Gu *et al.*, 2018).

Os primeiros registros de aplicação da CPA no Brasil datam de 1998 na Rodovia dos Imigrantes, ligando São Paulo a Santos; em 1999 no aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro; Rodovia Presidente Dutra, próximo a São Paulo em 1998, Rodoanel Mario Covas, Aeroporto de Congonhas em São Paulo, com a restauração de toda a pista de pouso e decolagem, com execução de nova camada densa intermediária e CPA como camada de rolamento (Bernucci *et al.*, 2022). Em Fortaleza, a CPA já foi aplicada em algumas avenidas, como Senador Virgílio Távora, Dom Luís e Santos Dumont, nos anos de 2018 e 2019 (Gurjão, 2020).

3.2 Características Gerais da Camada Porosa de Atrito (CPA)

A Camada Porosa de Atrito (CPA) é descrita como uma camada de asfalto poroso aplicada com espessuras que variam de 25 a 50 mm, situada acima de um pavimento convencional impermeável (Figura 1), pertencendo à categoria de pavimentos permeáveis, porém, sua principal função é promover a remoção da água da superfície do pavimento em direção aos sistemas de drenagem (Eck *et al.*, 2012).

Figura 1 — Esquema de funcionamento da CPA



Fonte: Adaptado de Roseno (2005)

Esse tipo de revestimento é caracterizado por uma elevada porosidade, resultado do esqueleto granular graúdo da mistura e da proporção de vazios interconectados que facilita a

drenagem das águas superficiais (Suresha; Varghese; Shankar, 2009). Essa característica proporciona muitos benefícios em termos de segurança, conforto e meio ambiente (Zhang *et al.*, 2020).

Em relação à segurança, a camada superficial porosa é eficaz para melhorar a resistência ao atrito durante condições de chuva, minimizando as derrapagens ao mesmo tempo em que reduz o brilho dos faróis dos veículos que se aproximam, contribuindo para a otimização da visibilidade (Gu *et al.*, 2018).

No que diz respeito ao conforto, a CPA reduz respingos e borrifos (Gu *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2018). Em termos de benefícios ambientais, esta é eficaz na redução do ruído dos pneus/pavimento, minimização do efeito da ilha de calor (Quan; Xu; Sun, 2022) e na melhoria da qualidade do escoamento de águas pluviais (Hernández-Saenz *et al.*, 2016; Gu *et al.*, 2018).

Estudos têm demonstrado que a redução de sólidos suspensos totais e do chumbo da água escoada de pavimentos drenantes pode atingir uma diminuição superior a 90% em comparação com pavimentos convencionais, além de outros elementos, como cobre, zinco e fósforo, também apresentam um alto percentual de remoção (Eck *et al.*, 2012; Jayakaran *et al.*, 2019).

Antunes; Thives; Ghisi (2016) investigaram a capacidade de filtração e retenção de poluentes em camadas porosas de atrito produzidas com asfalto-borracha e um ligante modificado por polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS). Os resultados mostraram que o uso desses dois tipos de ligantes não afetou a capacidade de filtração das misturas, que apresentaram valores médios entre 85,0% e 85,8%, respectivamente. No entanto, observou-se um aumento na concentração de fósforo em ambas as misturas, enquanto a retenção de amônia foi reduzida na mistura produzida com borracha de pneu. A concentração de fósforo foi atribuída à composição química dos ligantes utilizados.

Embora a CPA proporcione uma série de benefícios, é importante ressaltar que esse tipo de revestimento enfrenta desafios em relação à sua durabilidade, com uma vida útil média estimada entre 11 e 12 anos (Mo *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2021). Em particular, a desagregação e a colmatção surgem como principais fatores que impactam a vida útil das misturas porosas (Mo *et al.*, 2010; Caro; Sanchez; Kim, 2021).

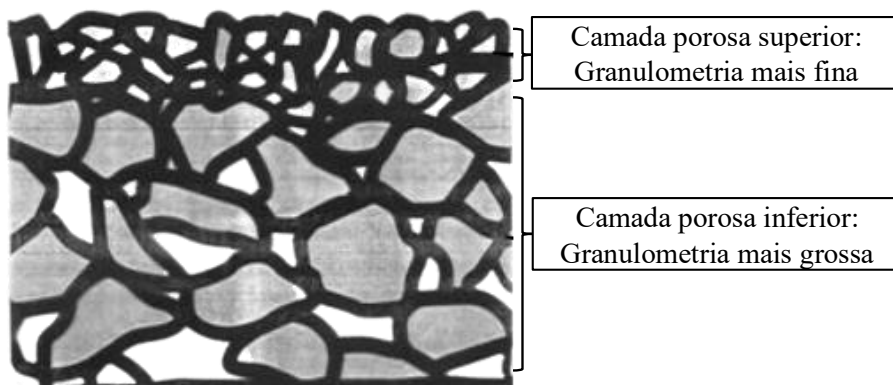
A desagregação é um tipo de patologia que ocorre devido à elevada quantidade de vazios da CPA que compromete a sua resistência estrutural (Gargia *et al.*, 2020), favorecendo uma maior exposição de área superficial do ligante aos efeitos oxidativos do ar e à ação prejudicial da água, particularmente devido ao aumento do teor de umidade interfacial, levando ao envelhecimento prematuro do ligante (Poulikakos; Partl, 2009; Hammes; Thives; Ghisi, 2018).

Por esse motivo, as misturas asfálticas porosas requerem ligantes modificados de alta viscosidade para melhorar essas propriedades mecânicas (Hu *et al.*, 2021). Já a colmatção dos vazios é outro gargalo identificado na literatura que tem obstruído o uso generalizado da CPA (Lin *et al.*, 2018).

De acordo com Alvarez *et al.* (2006), a vida funcional estimada da CPA pode variar de 5 a 8 anos, sendo que, em camada de rolamento de alta velocidade, a obstrução dos poros é retardada devido à sucção dos pneus que contribui para a autolimpeza da camada. Os autores também destacam que algumas estratégias têm sido adotadas nos Estados Unidos e na Europa para mitigar o efeito da colmatção em misturas asfálticas porosas, como o aumento da granulometria dos agregados. No entanto, essas estratégias não tiveram impacto significativo para manter funcionalidade do pavimento a longo prazo.

Na Holanda, por exemplo, uma forma de mitigar a colmatção consiste na aplicação de pavimentos porosos de dupla camada, como esquematicamente na Figura 2.

Figura 2 — Diagrama esquemático de uma CPA de camada dupla



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

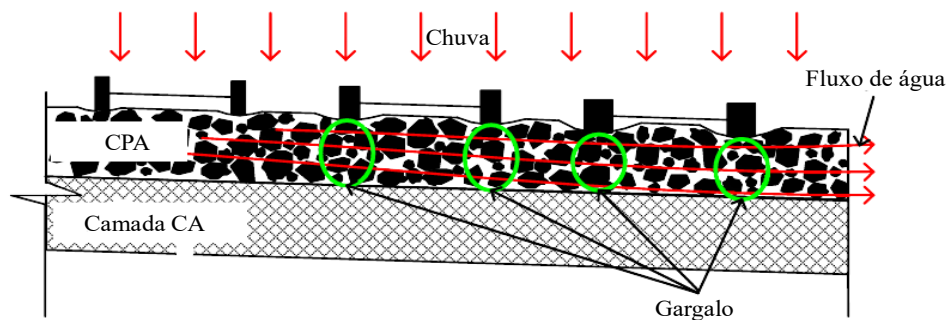
Nessa configuração, a camada superior é composta por agregados mais finos com menor teor de vazios de ar, enquanto a camada inferior incorpora agregados mais graúdos com maior volume de vazios, favorecendo a drenagem e reduzindo a obstrução dos vazios e a perda de concreto asfáltico (Hu *et al.*, 2021).

De acordo com Queiroz (2016), a camada mais fina atua como uma espécie de filtro, evitando que os sedimentos depositados sobre o revestimento atinjam a camada imediatamente inferior. Esse processo de filtragem faz com que apenas a camada do topo sofra colmatção, sendo facilmente removida pelas técnicas de limpeza em campo, garantindo as características

requeridas para um revestimento poroso, além de aumentar o potencial de redução de ruído da CPA de camada dupla para todas as velocidades de tráfego (Hamzah e Hardiman, 2005).

Ainda em relação ao processo de obstrução dos poros (colmatação) em misturas do tipo CPA, Chen *et al.* (2015), chamam atenção para dois tipos de colmatação mais comum nesse tipo de pavimento, dentre elas, a colmatação por acúmulo de partículas finas provenientes do ambiente (poeira, detritos, poluentes) e pela deformação da estrutura por esforços repetitivos do tráfego, o que altera a conectividade dos vazios e reduz a permeabilidade, Figura 3.

Figura 3 — Tipo de colmatação



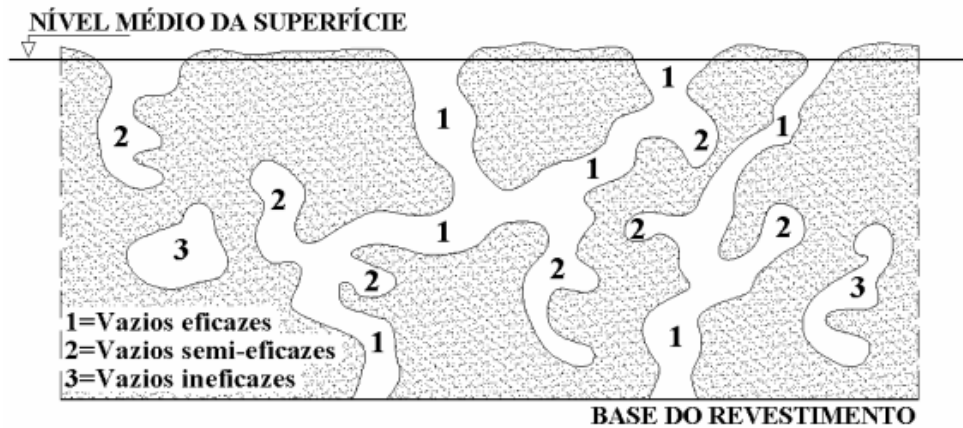
Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2015)

3.2.1 Permeabilidade de Misturas Asfálticas Porosas

A principal característica de uma mistura asfáltica porosa é sua elevada permeabilidade, que é diretamente proporcional à presença de vazios conectados. Os fatores que determinam essa permeabilidade incluem a proporção de vazios comunicantes, as propriedades do ligante, o tamanho máximo dos agregados e a espessura da camada de revestimento (Kolodziej, 2016; Alves, 2019). De acordo com o Projeto Diretriz da Tecnologia de Pavimentação Drenante da Associação das Rodovias do Japão, descrita por Dumke (2005), os vazios de uma mistura asfáltica porosa podem ser classificados em três formas, como (Figura 4).

- 1) Vazios eficazes: poros que contribuem para a passagem e armazenagem de água;
- 2) Vazios semi-eficazes: poros que não contribuem para a passagem, mas permitem o armazenamento da água; e,
- 3) Vazios ineficazes: poros que não contribuem para a passagem de água nem armazenamento da água.

Figura 4 — Distribuição dos vazios em uma mistura porosa

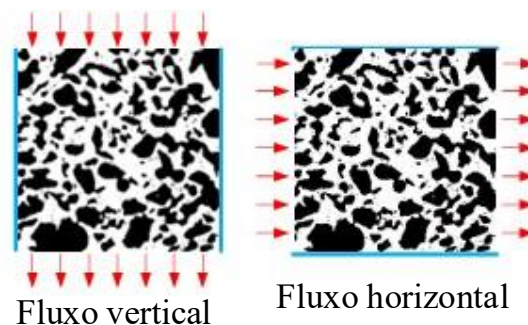


Fonte: Rushmoor Borough Council (1998) *apud* Dumke (2005)

Nesse contexto, uma quantidade maior de vazios não garante a permeabilidade ideal de uma mistura asfáltica porosa; o fator determinante é como esses vazios estão distribuídos internamente, o que pode ser de difícil previsão (Garcia, 2017).

Pesquisa tem demonstrado o uso de técnicas de processamento de imagens, especialmente a Tomografia Computadorizada de Raios-X, para analisar as características microestruturais das misturas asfálticas, com foco na distribuição dos vazios internos (Chen *et al.*, 2020). O referido estudo constatou que a porosidade e o número de vazios ao longo da direção horizontal eram superiores, com tamanhos mais uniformes, em comparação com a direção vertical, Figura 5. Os autores concluíram que o fluxo da água é determinado pela distribuição e pelos tamanhos dos vazios, tanto horizontais quanto verticais, sendo influenciado pela gradação da mistura e pelo método de compactação utilizado.

Figura 5 — Vazio vertical e horizontal



Fonte: Chen *et al.* (2020)

Nesse contexto, Chen; Tang; Zhang (2017) e Hernando *et al.* (2021) destacam que a determinação do coeficiente hidráulico em uma única direção não reflete com precisão a

permeabilidade das misturas asfálticas porosas. Os autores corroboram com essa afirmação ao investigarem a permeabilidade multidirecional de oito misturas de asfalto poroso, utilizando um permeâmetro multidirecional. Os resultados demonstraram que a permeabilidade das misturas é dependente da direção, sendo que a permeabilidade mínima ocorre na direção vertical, enquanto a máxima ocorre na direção horizontal. Da mesma forma, Elkhateeb *et al.* (2022) identificaram esse fenômeno em suas investigações.

Apesar desses achados, a permeabilidade das misturas asfálticas porosas é frequentemente considerada independente da direção nos testes realizados em laboratório ou em campo (Chen; Tang; Zhang, 2017). Poucos estudos avaliam o efeito do fluxo direcional nas respostas hidráulicas do pavimento poroso (Sui *et al.*, 2020). Isso se deve à limitação de equipamentos experimentais e métodos de teste adequados para medir a permeabilidade das misturas asfálticas em diferentes direções (Chen; Wang; Zhu, 2017).

No Brasil, não existem normatizações que especifiquem o coeficiente mínimo de permeabilidade para misturas asfálticas porosas, nem metodologias padronizadas para sua determinação. No entanto, a norma NBR 16.416 (2015) de concreto permeável exige coeficientes mínimos de permeabilidade da ordem de 1×10^{-3} m/s para pavimentos recém-construídos.

A norma norte-americana ASTM D7064 (*Standard Practice for Open-Graded Friction Course-OGFC Mix Design*) recomenda um valor mínimo de permeabilidade de 100 m/dia (0,12 cm/s) para misturas asfálticas porosas. Já a norma europeia BS EN 13108-7: 2006 (*Bituminous mixtures. Material specifications. Porous Asphalt*) exige um valor mínimo de 0,01 a 0,4 cm/s para a permeabilidade vertical ou horizontal determinada em laboratório em permeâmetros de carga constante (Ongel; Harvey; Kohler, 2007).

O engenheiro francês Henry Darcy, em 1856, formulou a teoria fundamental da permeabilidade dos solos, conhecida como lei de Darcy. De acordo com essa lei, a vazão de um fluido (como a água), representada por Q que atravessa uma amostra de areia com área de seção transversal A , é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico i e à área da seção transversal da amostra (Umiliaco e Benedetto, 2013; Vardanega, 2014). Essa relação é expressa matematicamente pela Equação 1, que representa a lei de Darcy.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (1)$$

Onde:

Q : taxa de escoamento do fluido;

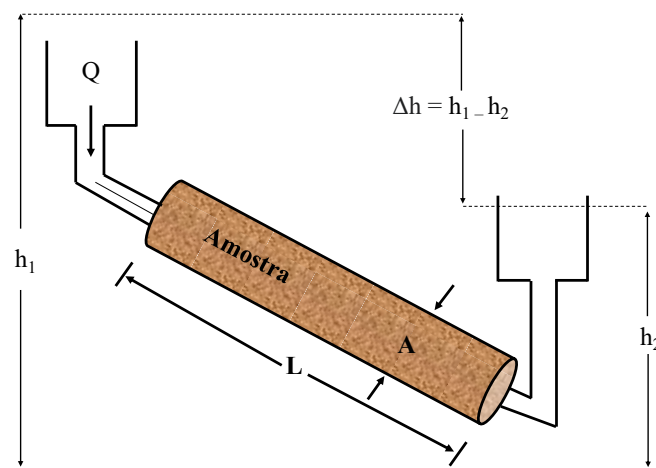
k : coeficiente de permeabilidade;

i : gradiente hidráulico;

A : área da seção transversal da amostra.

O gradiente hidráulico (i) corresponde à razão entre a diferença de pressão hidráulica (Δh) e o comprimento da amostra testada (L). De acordo com Cooley (1999), essa relação pode ser interpretada como a perda de carga por unidade de comprimento. A razão entre a vazão e a área da seção transversal da amostra fornece a velocidade média de escoamento do fluido (V). Já o coeficiente de permeabilidade representa essa velocidade para uma dada carga hidráulica, sendo expresso em unidades de velocidade (Umiliaco e Benedetto, 2013). A Figura 6 ilustra o diagrama experimental que deu origem à lei de Darcy.

Figura 6 — Esquema do experimento de Darcy



Fonte: Adaptado de Umiliaco e Benedetto (2013)

Várias literaturas nacionais (Dresch, 2016; Garcia, 2017; Alves, 2019) têm utilizado a classificação padrão de solos definida por Lambe e Whitman (1974) (Tabela 1) para classificar o grau de permeabilidade de misturas asfálticas porosas.

Tabela 1 — Classificação dos solos segundo grau de permeabilidade

Grau de Permeabilidade	Valor de k (cm/s)
Elevada	Superior a 10^{-1}
Média	10^{-1} a 10^{-3}
Baixa	10^{-3} a 10^{-5}
Muito Baixa	10^{-5} a 10^{-7}
Praticamente Impermeável	Menor de 10^{-7}

Fonte: Dresch (2016) *apud* Lambe; Witman (1974)

É importante destacar que existe uma variação nos valores de coeficiente de permeabilidade reportados na literatura, tanto em relação aos resultados obtidos em cada estudo quanto aos valores mínimos adotados como referência (Queiroz, 2016). Segundo Goh; You (2012), coeficientes de permeabilidade superiores a 0,01 cm/s são atribuídos a revestimentos porosos que apresentam uma boa drenagem.

3.3 Resíduos Gerados e Destinações

O RAP, resíduo de obras rodoviárias, é classificado, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), como um resíduo da construção civil. Esta classificação é baseada na origem dos resíduos, que incluem atividades de construção, reformas, reparos e demolições (BRASIL, 2010).

A produção do RAP tem crescido mundialmente e sua aplicação em novos projetos da construção rodoviária tem se destacado, principalmente em países europeus e nos Estados Unidos. Levantamentos de 2021 realizados pela *European Asphalt Pavement Association* (EAPA), apontam que, dentre as 91 milhões de toneladas de RAP geradas nos Estados Unidos, 95% são incorporadas para produção de misturas asfálticas usinadas a quente e morna. Na Europa, a Hungria lidera a utilização do RAP, com 98% do material sendo usado em misturas asfálticas a quente e morna. Em seguida, encontram-se a Alemanha e a Áustria, que também se destacam, reciclando 85% do RAP disponível em novas misturas asfálticas, além de outros países como a França, Dinamarca, Eslováquia e Espanha fazem o uso do RAP para pavimentação (EAPA, 2021).

No Brasil, a indisponibilidade de um banco de dados sobre RAP, dificulta a aquisição de informações sobre a geração e o reaproveitamento desse material, uma vez que esses dados geralmente são mantidos por concessionárias privadas de rodovias e prefeituras (Monteiro;

Silva; Resende, 2023). Apesar disso, existem experiências bem-sucedidas com a reciclagem desse material (Gaspar, 2019; Suzuki, 2019; Pinheiro, 2021; Frota, 2023; Braga, 2024).

Uma análise prospectiva da produção de RAP no período compreendido entre 2017 e 2021 foi apresentada por Suzuki (2019), tendo como alvo sete concessionárias brasileiras. A autora revelou um quantitativo de 1.087.000 toneladas de material fresado gerado ao longo desses cinco anos.

Em Fortaleza, uma empresa que oferece serviços de pavimentação asfáltica recebe cerca de 252 mil toneladas/ano de material fresado de rodovias estaduais, municipais e de outras construções rodoviárias. No entanto, apenas 5% desse material é usado na construção de novas rodovias¹. Um mapeamento realizado por Braga (2024) no estado, com base em dados do DNIT, revelou um acúmulo de 646,5 mil toneladas de RAP ao longo dos últimos 10 anos.

De acordo com um levantamento realizado por Lopes *et al.* (2024), com base em dados de concessionárias de rodovias e obras do DNIT entre os anos de 2019 e 2021, o Brasil gerou, em média, 2,1 milhões de toneladas de RAP, com destaque para a região Sudeste e o estado de São Paulo como os maiores produtores. Em contrapartida, o estado do Ceará registrou uma produção de 30.096 toneladas. O estudo também revelou que o teor médio de RAP nas misturas asfálticas a quente e morna é de 15%. A maioria desse material (53,2%) é destinada à doação para prefeituras e pequenas entidades, sendo utilizado na regularização de pátios e vias não pavimentadas.

Quanto aos pneus usados, cada ano, aproximadamente 17 milhões de toneladas são geradas globalmente (Ding *et al.*, 2019). Estima-se que todos os anos, quase 1 bilhão de pneus acabam sua vida útil e, desse total, mais de 50% são descartados em aterros sanitários e lixões, sem qualquer tratamento (Thomas; Gupta, 2016). Ainda conforme os referidos autores, a quantidade de pneus gerada anualmente poderá chegar a 5 bilhões até 2030. Este número representa uma quantidade significativa de resíduos que inevitavelmente terão que ser descartados no final da sua vida útil. Isso destaca a necessidade de encontrar soluções sustentáveis para o gerenciamento desses materiais. Além disso, é obrigatório que as empresas fabricantes e os importadores brasileiros devem realizar a logística reversa dos pneus conforme o artigo 33 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

De acordo com os dados da *U.S. Tire Manufacturers Association* (2022), aproximadamente 28% de todos os pneus descartados nos Estados Unidos foram processados para produzir cerca de 1,4 milhão de toneladas de borracha reciclada em 2021. Destas, cerca de

¹ Informação disponibilizada pela empresa à pesquisadora, em outubro de 2023.

10% (140.000 toneladas) foram usadas na pavimentação e tratamentos superficiais, como revestimentos de selagem, e os 90% restantes foram usados em aplicações como moldagens, *mulch* (cobertura orgânica), campos esportivos e outras aplicações não relacionadas a pavimentos em 2021 (USTMA, 2022).

Conforme os dados apresentados no Relatório do IBAMA sobre Pneumáticos (Sousa; Aranha, 2022), a meta de destinação de 571 mil toneladas de pneus inservíveis foi efetivamente alcançada. Ainda de acordo com os referidos autores, a região Nordeste desempenhou um papel importante nesse resultado, contribuindo com a destinação de 51 mil toneladas (cerca de 9%), sendo que o estado do Ceará também contribuiu com uma parcela de 1,3 mil toneladas (0,2%). Além disso, segundo informações fornecidas pela Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), os fabricantes nacionais de pneus destinaram de forma ambientalmente correta 441 mil toneladas de pneus inservíveis em 2022, sendo observado um somatório de mais de 5,9 milhões de toneladas de pneus destinados corretamente entre os anos de 2001 e 2022. Dados levantados pelo IBAMA (2022) mostram que 81,08% de pneus inservíveis foram destinados adequadamente em 2021.

Uma das formas de destinar esse resíduo de serviço de transporte (BRASIL, 2010) é a utilização em misturas asfálticas. No Brasil, uma alternativa bastante utilizada é o coprocessamento dos pneus inservíveis como fonte energética em fornos de cimento. Em 2022, mais de 340 mil toneladas de pneus inservíveis foram coprocessadas, o equivalente a 68 milhões de pneus (ABCP, 2023).

Outros resíduos que têm se destacado com potencial para aproveitamento em projetos construtivos são as cinzas provenientes da incineração de resíduos de serviço de saúde e/ou industriais.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010), esses resíduos são classificados quanto a sua origem como resíduos de serviços de saúde e industriais, respectivamente.

Na Alemanha, por exemplo, 50% das cinzas produzidas a partir de resíduos médicos incinerados são utilizadas para a fabricação de paredes de isolamento acústico, em rodovias nacionais, bem como subcamadas de pavimento; enquanto na Holanda, 60% das cinzas geradas são utilizadas na construção de asfalto e como subcamada das rodovias (Gidakos *et al.*, 2009; Anastasiadou *et al.*, 2012; Rajor *et al.*, 2012).

No Brasil, uma parte dos resíduos de serviço de saúde é encaminhada para unidades de tratamento, como incineração, autoclave, tratamento por micro-ondas e aterros industriais,

enquanto outra parte é destinada ao coprocessamento em cimenteiras, aterros sanitários de Classe IIA ou outras formas de disposição no solo (Bastos *et al.*, 2021).

Com base em informações fornecidas pela equipe de gerenciamento do incinerador localizado em Fortaleza – CE, uma quantidade de 9 toneladas/dia de resíduos de serviço de saúde é submetida ao tratamento por incineração. Como resultado desse processo, é gerado um resíduo conhecido como cinzas de fundo/cinzas pesadas, que corresponde a 10% do volume total de resíduos tratados², ou seja, 900 kg/dia de cinzas.

De acordo com Bastos *et al.* (2021), essas cinzas são submetidas a destinos diferentes: uma parte é destinada ao Aterro Sanitário de Caucaia, enquanto a outra parcela é misturada com outros que chegam ao Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP) e é posteriormente reintroduzida no interior do incinerador.

Em Fortaleza – CE, algumas pesquisas vêm estudando esse material: Bastos *et al.* (2021) e Lino (2022) determinaram as características físicas e químicas dessas cinzas; Correia (2022) estudou o comportamento de pisos intertravados de concreto elaborados com frações dessas cinzas; Moura (2023) aplicou tais cinzas como elemento de filtração de lixiviados do Aterro Sanitário de Caucaia.

3.4 *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*

A prática da reciclagem de misturas asfálticas é realizada no Brasil desde meados da década de 1980, sobretudo após a implementação das máquinas fresadoras no país (Silva; Farias, 2018). O material resultante desse processo é composto por agregados e um ligante envelhecido, conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement – RAP*, ou ainda “material fresado”, (Figura 7) (Monteiro; Silva; Resende, 2023).

Figura 7 — *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*



Fonte: Autora (2023)

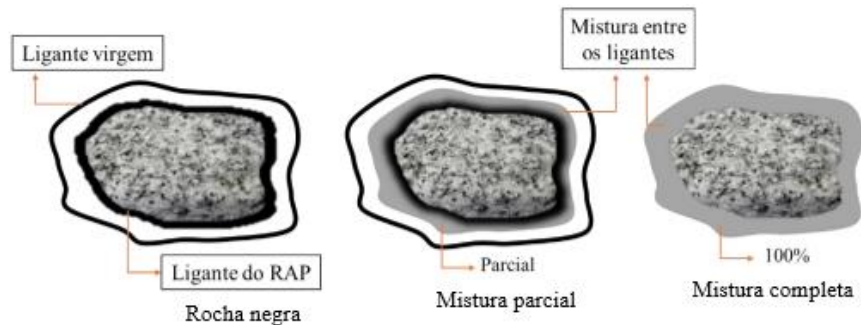
² Informações obtidas pela pesquisadora disponibilizada perante a empresa em outubro de 2023.

Essa técnica ganhou impulso devido à escassez de materiais asfálticos provenientes do petróleo na década de 1970, mobilizando profissionais da área rodoviária e organismos de fomento internacional a passarem a direcionar esforços para reciclar materiais oriundos de pavimentos deteriorados, visando restaurar as condições de tráfego das vias para níveis satisfatórios, levando em consideração aspectos técnicos e financeiros (Bonfim, 2007; Goh; You, 2012). Pesquisas recentes demonstraram que o RAP é o material mais comumente empregado para substituir agregados naturais em aplicações de pavimentos (Rodríguez-Fernández *et al.*, 2020; De Pascale *et al.*, 2023).

Segundo Pinheiro (2021), as técnicas de reciclagem com uso de RAP podem ser a quente (HMA, do inglês *Hot Mix Asphalt*), a frio ou morna (WMA, do inglês *Warm Mix Asphalt*), em usinas adaptadas ou mesmo *in situ*, cujas taxas de incorporação, no geral, limitam-se entre 10 e 30% para os casos a quente, variando em função das características do RAP, da capacidade das usinas e da legislação vigente de cada região. As limitações dos teores de RAP em novas misturas asfálticas é reportada em várias literaturas (Bernucci *et al.*, 2022; Pinheiro, 2021; Suzuki, 2019) e as justificativas para tal, concentram-se na variabilidade de suas características, desinformação a respeito da procedência desse material, incerteza do desempenho do concreto asfáltico reciclado e a falta de conhecimento dos mecanismos de ativação e interação envolvidos durante o processo da mistura com os outros componentes da reciclagem.

Chaves (2023) acrescenta que as diferentes condições de envelhecimento, variações granulométricas e diversidade de ligantes presentes no RAP são os principais desafios para a reformulação de misturas asfálticas com quantidades substanciais desse resíduo. Essa complexidade é inerente ao fato de que o RAP provém da fresagem de pavimentos variados, com a prática ocasional de combinar esses materiais fresados em uma mesma pilha para otimizar o armazenamento (Praticò; Vaiana, 2012; Chaves, 2023). Outro aspecto salientado por Chaves (2023) é a necessidade de estimar o grau de interação entre o ligante presente no RAP e o novo ligante virgem. Dentro desse contexto, a pesquisadora identifica três cenários possíveis de interação entre os ligantes, abrangendo uma variação de 0% a 100%, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 — Interação dos ligantes na mistura asfáltica reciclada



Fonte: Adaptado de Chaves (2023)

O primeiro cenário, denominado como (i) rocha negra, considera-se que o fresado age como um agregado, contribuindo para a estrutura sólida da mistura final. O ligante presente no material fresado não interage com o ligante virgem adicionado, demandando a adição de ligante asfáltico virgem para assegurar a aderência e coesão da mistura.

O segundo cenário, conhecido como (ii) mistura parcial, assume-se que o ligante envelhecido presente no RAP interage completamente com o novo ligante asfáltico adicionado à mistura. Nesse contexto, ocorre uma interação completa entre ambas as partes, resultando em uma redução significativa no uso de ligante asfáltico virgem.

O terceiro cenário, que é mais próximo da realidade, chamado (iii) mistura parcial, envolve uma interação intermediária dos ligantes, residindo em um ponto intermediário entre os cenários extremos rocha negra e mistura completa, ou seja, uma interação parcial.

O reaproveitamento do RAP tem sido objeto de discussão de vários estudos com o propósito de estabelecer quantidades adequadas para substituir parcialmente os agregados naturais por agregados reciclados (Ranieri *et al.*, 2022). É sabido que o RAP contém ligantes envelhecidos em sua composição, e a incorporação de quantidades substanciais em novas misturas asfálticas pode resultar em misturas de maior rigidez em comparação com aquelas desprovidas de RAP (Frota, 2023). Nesse sentido, Hu; Shu; Huang (2019) afirmam que até 15% de RAP pode ser incorporado em novas misturas sem comprometer o desempenho de fadiga, enquanto teores acima desse valor requer a inclusão de agentes rejuvenescedores (Bernucci *et al.*, 2022). Esses agentes têm a finalidade de restabelecer as propriedades viscoelásticas do material, com o objetivo de controlar a rigidez e a consistência das misturas asfálticas recicladas (Oliveira; Farias, 2022).

De acordo com Abdo (2016), algumas agências rodoviárias permitem a utilização de até 15% de RAP em misturas asfálticas, enquanto outras permitem maiores quantidades com modificações no projeto da mistura e na seleção do ligante. Pesquisas complementares, como a

de Mariyappan; Palammal; Balu (2023), também destacam que teores de RAP acima de 30% em misturas asfálticas requerem o emprego de aditivos suplementares para atender os requisitos de projeto das misturas. Entretanto, os autores constataram que a incorporação do RAP nas misturas aumentou a rigidez das misturas asfálticas e melhoraram a resistência à deformação permanente em altas temperaturas.

3.5 Incorporação de RAP em CPAs

A utilização do RAP em novas misturas asfálticas é considerada uma técnica promissora, uma vez que a substituição parcial dos agregados naturais por materiais reciclados promove a economia de recursos naturais, a redução de custos, a preservação ambiental e a minimização de resíduos de pavimentação, contribuindo para sustentabilidade nas construções rodoviárias (Ameli; Babagoli; Aghapour, 2016; Frigio; Canestrari, 2018).

A utilização do RAP é bastante difundida no campo de aplicações de misturas asfálticas densas, porém, a exploração dessa prática em misturas asfálticas porosas é escassa de estudos, especialmente em âmbito nacional. No entanto, na literatura internacional, diversas pesquisas têm abordado o uso do RAP proveniente de misturas asfálticas porosas antigas na composição de novas misturas CPAs (Praticò; Vaiana, 2012; Liu; Ven; Bergh, 2013; Frigio *et al.*, 2013, 2015, Holleran *et al.*, 2023). Apesar de não ser uma prática comum, em alguns casos específicos e limitados é possível incorporar até 30% de material fresado de camadas porosas pré-existentes em novas composições asfálticas porosas (Qiu *et al.*, 2018). Contudo, Frigio *et al.* (2015) ressaltam que alguns países ainda não permitem a utilização de materiais reciclados em camadas asfálticas superficiais porosas, devido à sua baixa durabilidade associada ao alto teor de vazios das misturas. Não obstante, os autores encorajam a investigação de soluções que possibilitem a incorporação segura do RAP em misturas asfálticas porosas, visando ampliar as opções sustentáveis na construção e manutenção de pavimentos.

Nessa perspectiva, Rad *et al.* (2022) buscaram avaliar a resistência à fadiga de uma mistura asfáltica porosa utilizando RAP, aplicando nanotecnologia para modificar o ligante com compostos de óxido de zinco (ZnO). Essa abordagem visou mitigar a baixa resistência à fadiga inerente às misturas porosas e, conseqüentemente, explorar o potencial da reciclagem nesse tipo de mistura. Os resultados demonstraram aumento na resistência à fadiga das misturas modificadas (ZnO) com e sem RAP.

Brum *et al.* (2018) investigaram o desempenho de misturas porosas produzidas com teores de 15% e 25% de RAP e ligantes modificados (asfalto-borracha e HiMA). A maioria das

misturas atendeu aos parâmetros analisados, incluindo permeabilidade, resistência à abrasão, resistência à fadiga, deformação e resistência aos danos causados pela umidade. No entanto, duas misturas contendo o ligante controle e o asfalto-borracha, com a incorporação de 25% de RAP, não alcançaram a permeabilidade de 0,045 cm/s exigida pelas especificações MassDOT's OGFC-AR. Apesar dessa limitação funcional, os autores concluíram que até 15% de RAP combinado com asfalto-borracha ou HiMA pode proporcionar um bom desempenho em CPAs. Além disso, uma análise do custo do ciclo de vida das misturas investigadas revelou que a mistura com RAP era mais econômica do que as convencionais, pois ambas as misturas (convencionais e recicladas) apresentaram vida útil semelhante, o que é atribuído ao uso dos ligantes modificados.

De Pascale *et al.* (2023) reforçam que a utilização do RAP em misturas asfálticas porosas é uma boa opção para novos pavimentos rodoviários, uma vez que o desempenho mecânico permanece quase inalterado e os benefícios ambientais associados são consideráveis, desde a redução de agregados virgens, economia de ligante e redução de materiais descartados em aterros.

Goh; You (2012) avaliaram o módulo dinâmico $|E^*|$, índice de compactação, permeabilidade e resistência à tração e investigaram a inclusão de 15% de RAP, com e sem aditivo, em misturas asfálticas porosas. Os resultados mostraram que o módulo dinâmico foi maior nas misturas contendo RAP em comparação com as misturas virgens, porém com a introdução do aditivo para mistura morna, observou-se uma leve redução no $|E^*|$, já a permeabilidade teve uma redução, contudo, manteve o coeficiente mínimo de drenagem, enquanto a resistência à tração aumentou. Portanto, a reciclagem do RAP em misturas asfálticas porosas pode potencializar o atendimento dos pavimentos em relação aos requisitos de sustentabilidade, que abrangem aspectos ambientais, econômicos e sociais (Alecrim, 2021).

3.6 Uso de Asfalto-Borracha em Pavimentos

O ligante asfáltico modificado por borracha, proveniente do resíduo de pneus usados, é uma tecnologia que transforma um resíduo em um material com características mecânicas como resistência à fadiga e à fratura, deformação permanente e redução da propagação de fissuras quando comparado a outros ligantes (Fontes *et al.*, 2010; Peralta *et al.*, 2010).

Muitos estudos foram conduzidos para desenvolver ligantes apropriados para asfalto poroso (Ren *et al.*, 2021). Nos Estados Unidos, por exemplo, tem sido adotado o uso do ligante

modificados com polímero ou borracha para garantir um desempenho satisfatório em termos de durabilidade em misturas asfálticas do tipo CPA (Ren *et al.*, 2020).

Os estudos conduzidos por Sangiorgi *et al.* (2017) e Wang *et al.* (2020) revelaram resultados consistentes em relação ao asfalto poroso modificado por borracha. Ambos os trabalhos destacaram melhoria nas propriedades do asfalto poroso em comparação com o asfalto não modificado.

Sangiorgi *et al.* (2017) identificaram que o asfalto poroso modificado demonstrou uma melhor afinidade entre o ligante e os agregados, menor suscetibilidade a trincas térmicas e maior durabilidade. Por sua vez, Wang *et al.* (2020) corroboraram com os achados anteriores ao enfatizarem as excelentes propriedades do asfalto poroso modificado por borracha em condições de alta e baixa temperatura, e a resistência à fadiga também apresentou um bom comportamento em comparação com o asfalto puro.

De acordo com Nataadmadja; Prahara; Sumbung (2017), o látex proveniente da borracha pode desempenhar papel importante na correção do problema de rigidez enfrentado pelos materiais reciclados de asfalto (RAP), além de contribuir para a melhoria da interação entre o ligante virgem e os materiais reciclados, proporcionando benefícios para a qualidade e desempenho das misturas asfálticas recicladas.

Estudos como o de Wang *et al.* (2018) evidenciam que o concreto asfáltico emborrachado possui uma resistência aprimorada ao envelhecimento e à oxidação, além de apresentar maior resistência a trincas causadas por fadiga/reflexão e deformações. Outro benefício destacado na referida pesquisa é a redução na geração de ruído durante a circulação de veículos e uma alta resistência à derrapagem.

Suresha; Varghese; Shankar (2009) relataram maior resistência à perda por abrasão em condições envelhecidas e ao dano por umidade para misturas porosas produzidas com ligante modificado por borracha. Da mesma forma, Partl *et al.* (2010), concluíram que as misturas porosas fabricadas com asfalto-borracha apresentaram menor sensibilidade à umidade e maior resistência à fadiga em comparação com aquelas modificadas com polímero de Estireno Butadieno Estireno (SBS).

A incorporação da borracha se dá por meio de dois processos: úmido e seco. No processo úmido, esquematizado na Figura 9, a borracha triturada é introduzida no ligante asfáltico, atuando como um modificador de suas características, buscando produzir um ligante melhorado para misturas asfálticas (Picado Santos; Capitão; Neves, 2020). Já no processo seco, a borracha triturada é incorporada na mistura asfáltica como agregado. Ambas as técnicas têm revelado resultados positivos na otimização das propriedades das misturas asfálticas quando comparadas

às misturas convencionais (Shirini; Imaninasab, 2016; Sangiorgi *et al.*, 2017). No entanto, estudos têm investigado o impacto potencial em termos de emissões de poluentes decorrentes da adição de borracha de pneu ao ligante e ao processo de mistura. Constatou-se que a incorporação de migalhas de borracha de pneu ao ligante pode resultar em emissões de poluentes, principalmente xileno e tolueno, que pode ser maior que o ligante sem borracha (Yang *et al.*, 2019).

No processo úmido, o pó de pneus representa, em geral, 15 a 20% da massa de ligante ou menos que 1,5% da massa total da mistura (Bernucci *et al.*, 2022).

Figura 9 — Esquema de fabricação do AB via úmido pelo processo de mistura estocável



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2022)

3.7 Histórico de Uso e Características Químicas e Mineralógicas das Cinzas da Incineração de Resíduos de Serviços de Saúde

De acordo com Allawzi; Al-harashsheh; Allaboun, (2018), as cinzas resultantes da incineração de resíduos médicos apresentam propriedades físicas e química variadas, devido a alguns fatores como, a natureza do resíduo, processo de incineração empregado, reações químicas e temperatura alcançada durante a incineração. Entretanto, estudos conduzidos em diferentes países, apresentados na Tabela 2, identificaram similaridades quanto aos tipos de óxidos presentes na composição das cinzas. A maioria das pesquisas constatou predomínio de dióxido de silício (SiO_2), óxido de cálcio (CaO) e óxido de alumínio (Al_2O_3) como componentes principais na composição elementar das cinzas.

Tabela 2 — Composição química dos principais óxidos das CIRSS da literatura

Bibliografia	Óxidos (%)										Países
	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	ZnO	MgO	
Zhao <i>et al.</i> (2010)	30,5	26,1	6,0	10,0	8,8	4,4	8,8	8,8	8,8	6,0	China
Kougemitrou <i>et al.</i> (2011)	19,3	50,8	5,0	12,1	4,5	0,6	0,4	1,8	-	2,1	Grécia
Anastasiadou <i>et al.</i> (2012)	27,8	39,7	4,5	5,2	9,1	-	0,5	2,2	-	2,9	Grécia
El Bakkali <i>et al.</i> (2013)	14,0	17,0	3,0	8,0	16,0	18,0	3,0	1,0	-	3,0	Marrocos
Akyıldız											
Kose e Yildiz (2017)	38,5	7,9	1,1	6,9	1,5	1,1	3,2	3,2	0,2	2,3	Turquia
Tsakalou <i>et al.</i> (2018)	19,3	57,5	1,2	7,3	6,5	-	0,9	0,6	-	1,8	Grécia
Kaur											
Siddique e Rajor (2019)	56,7	25,9	4,9	5,0	0,2	0,12	2,0	0,33	-	2,2	Índia
Kumar <i>et al.</i> (2021)	39,0	14,0	3,0	6,0	13,0	1,0	1,0	3,0	-	4,0	Índia
Debrah e Dinis (2023)	28,0	-	0,4	2,0	-	1,1	1,0	0,8	-	2,9	Portugal
Moura <i>et al.</i> (2023)	57,4	7,8	16,4	8,3	-	-	-	7,9	-	-	Brasil
Carvalho <i>et al.</i> (2022)	26,6	4,3	0,9	1,7	-	-	0,3	4,1	1,2	-	Brasil
Mendonça (2018)	34,9	5,9	1,4	6,6	-	0,5	0,8	4,7	1,8	-	Brasil

Fonte: Autora (2024)

Quanto aos componentes mineralógicos são observadas na literatura concentrações de calcita, halita, silvita, anidrita, hematita, hidroclorborita, cristobalita, melanterita e clormaßenita (Allawzi; Al-harabsheh; Allaboun, 2018); halita, maïenita, rondorfita cloreto de titânio e anortita (Akyıldız; Kose; Yildiz, 2017), entre outros. Também são identificadas concentrações de metais pesados, incluindo Zn, Pb, Cu, Sr, Mn, Cr e Ni (Allawzi; Al-harabsheh; Allaboun,

2018); Cu, Ba e Ni (Azni *et al.*, 2005); Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn e Pb (Debrah; Dinis, 2023); arsênico, cádmio, crômio, níquel, chumbo, estanho e zinco (El Bakkali *et al.*, 2013). Contudo, El Bakkali *et al.* (2013) ressaltam que esses metais são pouco solúveis e poucas proporções das concentrações totais são lixiviadas, minimizando o potencial de contaminação das águas subterrâneas.

Gidarakos *et al.* (2009) constataram que as cinzas de resíduos hospitalares apresentaram elevadas concentrações de Al_2O_3 , CaO e TiO_2 , cujos teores variaram entre (56,52 – 64,1%), (53,16 – 54,78%) e (48,96–51,84%), respectivamente. Além disso, os autores destacaram o predomínio de TiO_2 e CaO nas partículas finas das cinzas pesadas. Tais características revelam o potencial de uso desse resíduo em substituição parcial de agregados na produção do concreto (El-Amaireha; Al-Zoubi; Al-Khashmanb, 2023). Várias pesquisas têm sido desenvolvidas para a utilização das cinzas de incineradores de resíduos de serviço de saúde na produção de concreto (Akyildiz; Kose; Yildiz, 2017; Kaur; Siddique; Rajor, 2019; Matalkah, 2023).

Sadeghnejad; Shafabakhsh (2017) conduziram uma pesquisa sobre a incorporação de nanomateriais (SiO_2 e TiO_2) como aditivos modificadores de ligante em uma mistura asfáltica do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) e observaram melhorias no comportamento mecânico das misturas, especialmente em relação à resistência à fadiga, ao adicionar 1,2% e 0,9% de nanopartículas de SiO_2 e TiO_2 , respectivamente. Adicionalmente, o dióxido de titânio (TiO_2) tem sido objeto de investigação como um material semicondutor com potencial catalítico para a degradação de poluentes, funcionando como um agente autolimpante, capaz de remover óleos e graxas da superfície do pavimento, contribuindo assim para a promoção de rodovias mais seguras e para a melhoria da qualidade do ar (Rocha Segundo *et al.*, 2018). Esses achados sugerem a incorporação das cinzas de resíduos de serviço de saúde em misturas asfálticas porosas, tendo em vista a presença desses óxidos em sua composição.

Nos países europeus, grandes volumes de cinzas de resíduos médicos são utilizados para fabricação de pavimentos e como subcamada na construção de autoestradas e como cobertura de aterros sanitários (Rajor *et al.*, 2012; Anastasiadou *et al.*, 2012). Apesar do interesse dos EUA e no Canadá em explorar o potencial dessas cinzas em materiais de construção, esta não é uma prática comum (Anastasiadou *et al.*, 2012). Em contrapartida, Azni *et al.* (2005) verificaram que a escória de resíduos hospitalares após processo de fusão a 1200°C mostrou-se adequada para substituir agregados convencionais para construção de estradas, atendendo aos requisitos de lixiviabilidade por metais pesados.

Chowdhury *et al.* (2023) estudaram cinzas volantes da incineração de resíduos médicos como agregado alternativo em substituição ao pó de pedra convencional em misturas asfálticas

densas e observaram que as misturas apresentaram resistência aos efeitos de umidade (tornando-as duráveis), com destaque para o teor de 5,5% de cinzas que obteve maior desempenho. Além disso, os autores afirmam que os testes de lixiviação não mostraram nenhuma restrição ambiental para o uso das cinzas em misturas asfálticas, pois a mobilidade dos metais pesados (As, Pb, Cu, Cr, Ni, Cd, Hg e Zn) foi insignificante.

Jaber *et al.* (2022) examinaram a viabilidade da utilização de cinzas residuais de resíduos médicos em camada de base do pavimento, e concluíram que uma proporção de 25% das cinzas poderia ser adequada com base nas propriedades Marshall.

Li *et al.* (2022) investigaram o potencial de utilização das cinzas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) como agregado alternativo em materiais de construção e pavimentação. De acordo com Ibáñez *et al.* (2000), as cinzas provenientes de resíduos médicos têm demonstrado composições químicas similares às cinzas de RSU. Assim, os autores incentivam a reutilização das cinzas médicas na construção civil e rodoviária, embora enfatizem a necessidade de precauções devido à presença de elementos tóxicos ou compostos orgânicos que podem restringir sua utilização.

Luo *et al.* (2017) investigaram a aplicabilidade de cinzas de fundo de incinerador de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em substituição parcial de agregados finos em uma mistura asfáltica porosa e detectaram que a resistência à tração e a relação resistência à tração retida (danos causados pela umidade) aumentaram, devido à força adesiva proporcionada pelos elevados teores de cálcio presentes nas partículas das cinzas. Por outro lado, quando aumentou a proporção das cinzas na mistura, houve um acréscimo no teor de asfalto e uma diminuição da permeabilidade. Ainda assim, os autores concluem viabilidade do uso das cinzas de RSU em misturas asfálticas porosas.

3.8 Revisão das Normas e Estudos Relacionados à Classificação e Impactos Ambientais dos Resíduos em Pavimentação

A norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos com base nos potenciais riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Conforme essa norma, os resíduos são divididos em dois grupos principais: Perigosos (Classe I) e Não Perigosos (Classe II). A Classe II é subdividida em Não Inertes (Classe II A) e Inertes (Classe II B).

Resíduos Perigosos (Classe I) são caracterizados por propriedades como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade, toxicidade, teratogenicidade, carcinogenicidade e mutagenicidade. Resíduos Não Perigosos (Classe II A – Não Inertes)

podem apresentar biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Já os Resíduos Inertes (Classe II B) não têm constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspectos como turbidez, dureza e sabor, conforme descrito no anexo G da norma.

Nos últimos anos, pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento de novas tecnologias e materiais voltados para a reciclagem de resíduos na indústria de pavimentação. Entretanto, existem preocupações ambientais associadas a possível lixiviação de contaminantes para as camadas de solo subjacentes e aquíferos subterrâneos (Azadgoleh *et al.*, 2022).

Quando se trata do *Reclaimed Asphalt Paviment* (RAP), os constituintes comumente investigados nas análises de lixiviados são os metais pesados e os Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAPs) (Spreadbury *et al.*, 2021). Com base no levantamento de 41 estudos, os autores ressaltam que o lixiviado do RAP excedeu os limites estabelecidos para risco metálico, incluindo arsênico, chumbo, antimônio e manganês. Já para HAPs, foram relatados níveis acima das especificações de triagem regional da EPA para naftaleno, dibenzo (a,h) antraceno, benzo (a) antraceno, benzo (a) pireno.

No estudo de Brantley; Townsend (1999), analisou-se a presença de HPAs e metais em amostras contendo RAP e descobriram que as amostras de RAP não eram resíduos perigosos e não lixiviam produtos químicos superiores aos padrões típicos de águas subterrâneas. Além disso, o lixiviado não apresentou níveis de HAPs, Composto Orgânicos Voláteis (COVs) ou metais pesados selecionados (Ba, Ca, Cr, Ni e Zn) acima das concentrações das águas subterrâneas, exceto para o chumbo que foi detectado concentrações acima do padrão da água potável (15 µg/L) para uma mostra de RAP mais antigo. Entretanto, a concentração diminuiu ao longo do tempo do ensaio de lixiviação em coluna. Da mesma forma, Yang *et al.* (2020) avaliaram o nível de lixiviação de amostras contendo RAP e constataram, nos experimentos de extração solúvel em água, que, em geral, os elementos não excederam os níveis máximos de contaminantes da água potável estabelecidos pela USEPA, com exceção do chumbo (Pb) que apresentou (16,1 µg/L) em uma amostra e (50,1 µg/L) em outra.

Huang *et al.* (2006) investigaram o uso de cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos como agregados finos em misturas asfálticas. Os autores identificaram que as concentrações de metais pesados (Cd, Cr, Cu e Pb) estavam abaixo das limitações do *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP). Este resultado foi atribuído ao efeito de encapsulamento proporcionado pelo ligante asfáltico, embora este não tenha apresentado efeito na redução do pH. Da mesma forma, Xue *et al.* (2009) e Li *et al.* (2022), ao investigarem o impacto ambiental do uso de cinzas de RSU como carga mineral em uma mistura do tipo SMA,

verificaram que o asfalto funcionou como agente estabilizante para os metais pesados presentes nas cinzas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

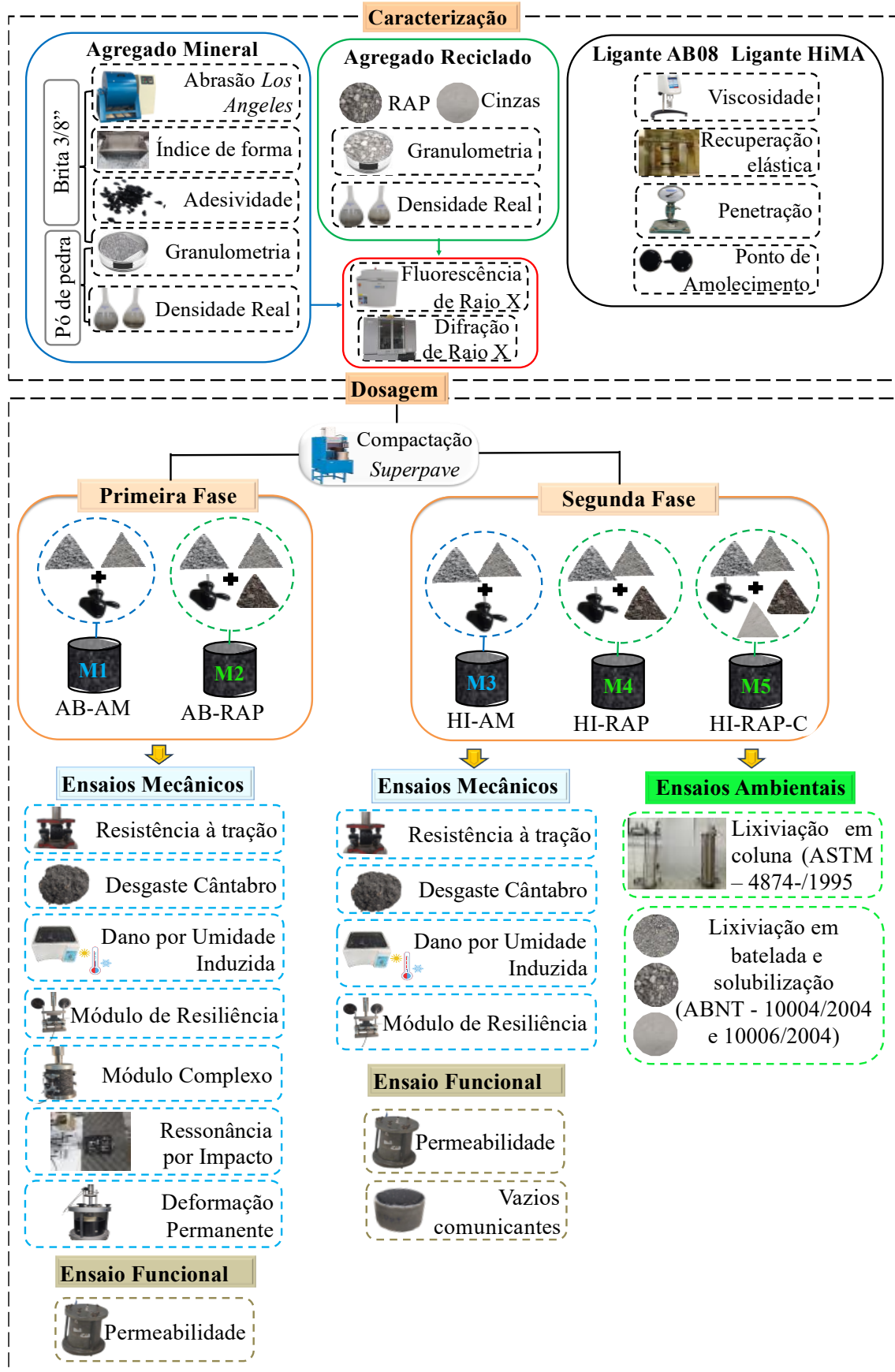
Nesta sessão, detalham-se todas as etapas metodológicas empregadas para atender os objetivos específicos desta dissertação. Além disso, são apresentados os materiais utilizados para a produção das misturas. Também são descritas as caracterizações realizadas com os agregados, assim como a caracterização dos ligantes empregados no estudo.

Adicionalmente, são destacados os métodos utilizados, incluindo os procedimentos para determinar os ensaios mecânicos, funcionais, de lixiviação em batelada, coluna, e a solubilização.

O programa experimental envolveu a avaliação da viabilidade técnica, funcional e ambiental de cinco misturas asfálticas porosas produzidas com materiais reciclados, incluindo RAP, Asfalto-Borracha (AB08), ligante altamente modificado - HiMA e cinzas da incineração de resíduos de serviço de saúde. Para isso, o estudo foi estruturado em duas fases principais. Na primeira fase, foram produzidas duas misturas asfálticas porosas utilizando Asfalto-Borracha AB08: uma mistura de referência (AB-AM) e uma mistura reciclada (AB-RAP), composta por 10% de RAP e 4,5% de ligante AB. Essas misturas foram submetidas a vários ensaios mecânicos e de condutividade hidráulica (funcional).

Na segunda fase, foram produzidas três misturas com ligante altamente modificado – HiMA, sendo uma mistura de referência (HI-AM), uma mistura com 10% de RAP (HI-RAP) e uma mistura com 10% de RAP e 1% de cinzas de resíduos de serviço de saúde (HI-RAP-C). Ambas as misturas foram produzidas com um teor de ligante de 4,5%, conforme definido no teor de projeto, e submetidas a ensaios mecânicos, funcionais e ambientais, conforme ilustrado no fluxograma a seguir (Figura 10).

Figura 10 — Fluxograma experimental



Fonte: Autora (2024)

Na fase inicial, foram definidos diversos ensaios mecânicos com o objetivo de explorar novas abordagens para a caracterização de misturas asfálticas do tipo CPA. Esses ensaios incluíram testes mais comuns utilizados pelas especificações técnicas de vários países, como desgaste Cântabro, que avalia a durabilidade por meio da resistência à perda de agregados (desagregação), resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade para verificar a resistência a condições de variações térmicas, o módulo de resiliência para investigar a rigidez das misturas (capacidade estrutural), e a permeabilidade, que é uma característica funcional fundamental dos revestimentos porosos. Além desses, foram realizados ensaios mais avançados, como a determinação do módulo complexo, a avaliação da deformação permanente e a ressonância por impacto, sendo este último considerado um ensaio complementar, utilizado para fins de comparação entre duas metodologias de caracterização estrutural de misturas asfálticas.

Na segunda fase, o foco foi direcionado para questões específicas relacionadas aos principais desafios desse tipo de mistura, como a baixa resistência, a suscetibilidade à desagregação e os efeitos prejudiciais causados por condições climáticas, como variações de temperatura e umidade. Questões funcionais também foram aprofundadas, incluindo a análise da distribuição do volume de vazios comunicantes, complementando os ensaios de permeabilidade. Essa etapa contou com um tratamento estatístico dos dados, onde foram produzidas 6 (seis) amostras (CPs) para cada ensaio realizado. Adicionalmente, foram realizadas avaliações ambientais para compreender o comportamento do lixiviado (metais pesados) de todos os constituintes utilizados nesse estudo (agregado mineral, RAP e cinzas). Além disso, foi realizada a lixiviação em coluna nas três misturas, produzidas com ligante altamente modificado (HiMA), visando avaliar o mecanismo de imobilização de possíveis contaminantes.

4.1 Material

Os agregados minerais, brita 3/8” e pó de pedra (Figura 11) utilizados nessa pesquisa são oriundos da Pedreira OCS Mineradora, localizada no município de Eusébio, a cerca de 30 km de Fortaleza – CE. Esses materiais foram devidamente coletados e caracterizados e estavam disponíveis para utilização no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Figura 11 — Pilha de brita 3/8" - OCS



Fonte: Autora (2024)

O RAP utilizado foi o mesmo de Chaves (2023) e estava caracterizado e disponível no referido laboratório. Na Figura 12 é ilustrada a disposição do RAP, de onde foi realizada a coleta de cerca de 300 kg de material. A pesquisadora enfatiza que informações detalhadas sobre as misturas asfálticas que deram origem ao RAP não foram acessíveis devido à prática de armazenar todo o material fresado proveniente de várias rodovias em uma única pilha.

Figura 12 — Pilha de RAP



Fonte: Chaves (2023)

As cinzas empregadas nesta investigação são provenientes da incineração de resíduos de serviço de saúde de um incinerador do município de Fortaleza – CE (Figura 13). Este incinerador recebe resíduos oriundos de estabelecimentos de saúde humana e animal, tanto públicos quanto privados, mediante contratação do serviço. Atualmente, são processadas 9.000 toneladas de resíduo por dia, das quais cerca de 10% resultam em cinzas. Isso corresponde cerca de 27 toneladas de cinzas mensalmente.

A estrutura da planta incineradora é caracterizada como um leito móvel, compreendendo duas câmaras, e tem uma eficiência de combustão notável (98%). De maneira geral, os resíduos hospitalares são submetidos à combustão na câmara primária, enquanto os gases resultantes desse processo são tratados na câmara secundária. Apesar da capacidade térmica do equipamento variar entre 950 e 1200 °C, é mantida uma temperatura constante entre 1000 e 1050 °C em ambas as câmaras, visando à otimização da eficiência operacional.

Figura 13 — Resíduos (a) Cinzas (b) e Planta-Incinerador (c)



Fonte: Autora (2023)

Os ligantes asfálticos utilizados nesta pesquisa foram o asfalto-borracha do tipo Ecoflex-AB08, fornecido pela Greca Distribuidora de Asfalto S/A, localizada em Minas Gerais – MG, e o ligante altamente modificado (HiMA) foi disponibilizado pela Greca Asfalto de Maracanaú – CE.

4.1.1 Caracterização dos Materiais Utilizados

Com o objetivo de garantir a conformidade com as normas estabelecidas pelo DNIT, foram realizados ensaios para caracterizar os agregados e avaliar sua adequação para uso no projeto de mistura asfáltica. Os ensaios foram conduzidos conforme os procedimentos estabelecidos nas normas destacadas na Tabela 3.

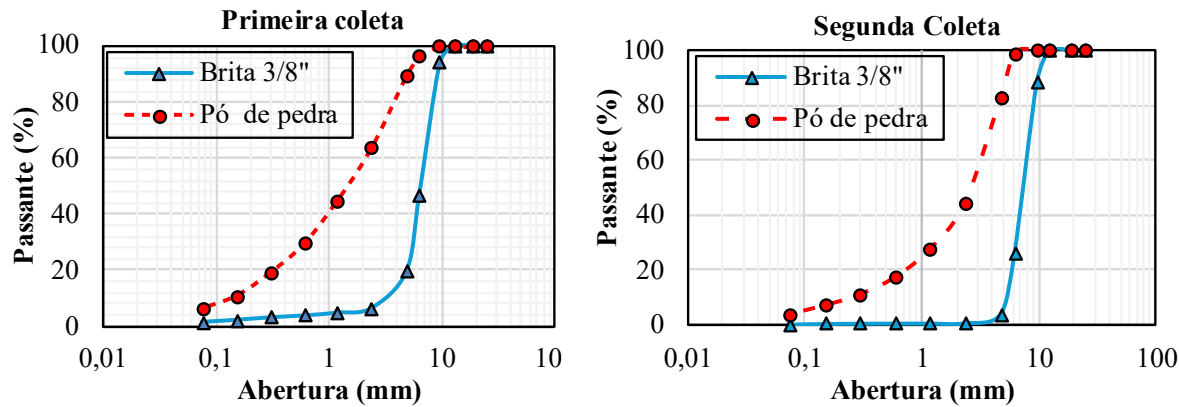
Tabela 3 — Ensaio e normas para caracterização geotécnica dos agregados

Ensaio	Norma
Análise granulométrica por peneiramento dos agregados minerais e reciclado	DNER-ME 412/2019
Densidade real dos agregados minerais graúdos e RAP	DNER-ME 413/2021
Densidade real – agregado mineral miúdo	DNER-ME 411/2021
Agregados minerais - Abrasão " <i>Los Angeles</i> "	DNER-ME 035/1998
Agregado mineral - Índice de forma	DNIT-ME 424/2020
Massa específica real das cinzas	DNER-ME 085/1994

Fonte: Autora (2023)

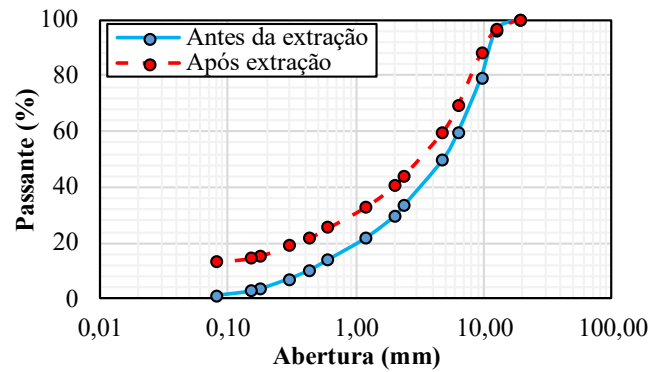
As curvas granulométricas dos agregados minerais e reciclados foram determinadas para garantir a conformidade com os padrões estabelecidos para a produção de misturas asfálticas, conforme as Figuras 14 e 15, respectivamente. Vale destacar que foram utilizados agregados minerais de duas coletas para essa pesquisa.

Figura 14 — Curvas granulométricas dos agregados naturais primeira e segunda coleta



Fonte: Autora (2023)

Figura 15 — Curvas granulométricas do RAP

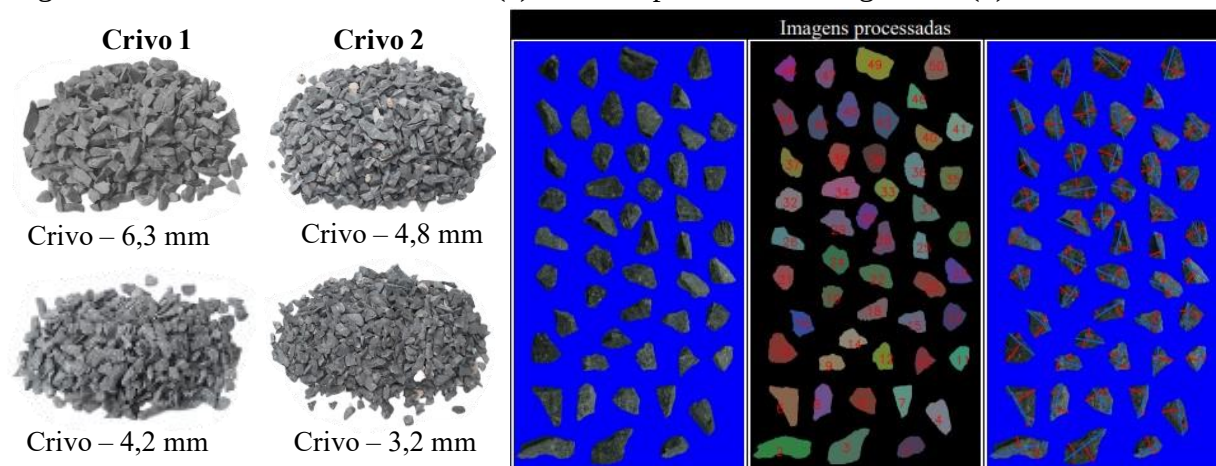


Fonte: Chaves (2023)

As curvas granulométricas do fresado foram obtidas antes e após a extração do ligante, Figura 15, como um procedimento padrão, quando se trata desse tipo de material. A extração foi realizada por meio de dois equipamentos (*Rotarex e Soxhlet*) e o teor médio de ligante extraído do fresado foi de 4,3% (Chaves, 2023).

Um parâmetro importante de caracterização dos agregados empregados em aplicações rodoviárias é o índice de forma, tendo preferência por materiais com uma geometria mais próxima da forma cúbica. Isso se justifica devido à sua tendência a resistir à fragmentação sob as tensões provocadas pela compactação e pelo tráfego. A avaliação da geometria do agregado natural dessa pesquisa foi realizada seguindo as diretrizes da norma DNIT-ME 424/2020, pelo método dos crivos redutores, Figura 16 (a) e, como parte complementar, utilizou-se de um aplicativo de leitura de imagem (Forma 2D ou angularidade) desenvolvido por Gomes (2021), Figura 16 (b).

Figura 16 — Forma crivos redutores (a), Forma aplicativo de imagem 2D (b)



Fonte: Autora (2024) e Gomes (2021)

4.1.2 Caracterização dos Ligantes

Os ligantes utilizados nesta pesquisa passaram por vários ensaios de caracterização para garantir a qualidade na produção das misturas asfálticas. As propriedades do ligante asfalto-borracha estão detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4 — Características do ligante Asfalto-Borracha

Características	Método	Especificação	Resultado
Penetração (100g, 5s, 25°C), (0,1 mm)	NBR 6576	30-70	51
Ponto de amolecimento, mín, (°C)	NBR 6560	55	58
Viscosidade Brookfield (175°C, 20 rpm, spindle 3) (cP)	NBR 15529	800-2000	1655
Ponto de Fulgor, mín, (°C)	NBR 11341	235	> 240
Recuperação Elástica Ductilômetro (25°C, 10 min) mín., (%)	NBR 15086	50	80
Teste no Resíduo do RTFOT a 163°C, 85 minutos			
Variação de massa, máx., (%)	NBR 15235	1	0,14
Aumento do Ponto de amolecimento, máx., (°C)	NBR 6560	10	3,9
Penetração Original, mín., (%)	NBR 6576	55	76
Recuperação elástica Original, mín., (%)	NBR 15086	100	106

Fonte: Nepomuceno (2019)

Já o ligante altamente modificado - HiMA foi caracterizado no Laboratório de Ligantes da UFC. Suas propriedades podem ser observadas na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 — Características do ligante altamente modificado - HiMA

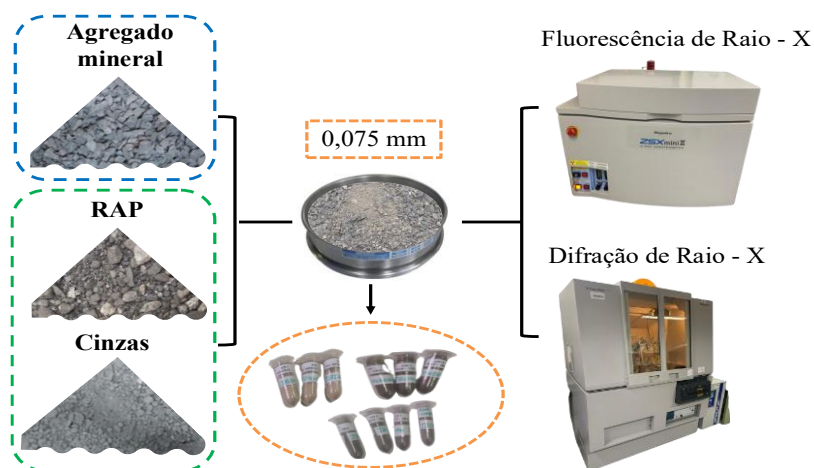
Características	Método	Especificação	Resultado
Ponto de amolecimento °C	NBR-6560	Mín. 65	91
Penetração a 25 °C, 100 g, 5s, 01mm	NBR-6576	40 - 70	42
Recuperação Elástica, 20 cm, 25°C	NBR-15086	Mín. 90	94
Performace Grade (PG)	-	-	76
Viscosidade Brookfield a 135°C, <i>spindle</i> 27, 20 rpm	NBR-15184	Máx. 3000	2241
Viscosidade Brookfield a 150°C, <i>spindle</i> 27, 20 rpm	NBR-15184	Máx. 2000	825
Viscosidade Brookfield a 177°C, <i>spindle</i> 27, 20 rpm	NBR-15184	Máx. 1000	288
Viscosidade Brookfield a 190°C, <i>spindle</i> 27, 20 rpm	-	-	188
Teste no resíduo RTFOT			
Variação de massa, máx., (%)	NBR-15235	1	0,736

Fonte: Autora (2024)

4.1.3 Caracterização Química

Os agregados minerais e reciclados foram submetidos aos ensaios de Fluorescência de Raio-X (FRX) e Difração de Raios-X (DRX), objetivando-se conhecer os componentes químicos presentes na constituição deles. Para tanto, foram preparadas três amostras de cada agregado das misturas e foram enviadas ao Laboratório de Raio – X (LRX) da UFC para análise, Figura 17.

Figura 17 — Preparo das amostras para análises químicas



Fonte: Autora (2024)

4.1.4 Projeto de Misturas

O projeto de mistura seguiu a metodologia *Superpave*. O processo de moldagem dos CPs consistiu na aplicação de 100 e 125 giros para as misturas produzidas com asfalto-borracha. Já as misturas com ligante HiMA fixou-se o número de giros em 125, compactação adequada para que se atingisse a volumetria necessária da CPA (18 a 25% de vazios).

As composições das misturas asfálticas utilizadas foram enquadradas dentro da Faixa II da Norma brasileira da CPA DNER-ES 386/1999 (Tabela 6) e o teor de ligante para todas as misturas foi fixado em 4,5%, sendo que para a mistura AB-RAP foi baseada no parâmetro RBR (RAP *Binder Ratio*), ou seja, proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura (Frota, 2023), a fim de utilizar a menor quantidade de ligante virgem possível.

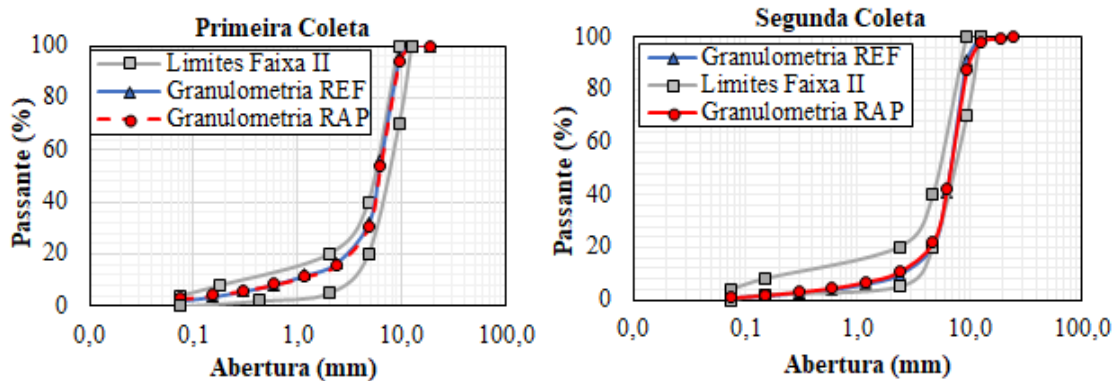
Tabela 6 — Requisitos de projeto da CPA

Peneira de malha quadrada		Percentagem passando em peso (faixas)					Tolerância na curva de projeto (%)
ABNT	Abertura mm	I	II	III	IV	V	
3/4"	19,0	-	-	-	-	100	-
1/2"	12,5	100	100	100	100	70-100	± 7
3/8"	9,5	80-100	70-100	80-90	70-90	50-80	± 7
Nº 4	4,8	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	± 5
Nº 10	2,0	12-20	5-20	10-18	10-22	10-22	± 5
Nº 40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	± 5
Nº 80	0,18	-	2-8	-	-	-	± 3
Nº 200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	± 2
Variação do teor de ligante (%)		4,0 - 6,0					± 0,3
Características							Camada porosa
Percentual de Vazios (%)							18 a 25
Desgaste à abrasão <i>Los Angeles</i> - Cântabro, máximo (%)							25
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)							Mínimo 0,55

Fonte: DNER – ES 386 (1999)

A Figura 18 mostra as curvas granulométricas de projeto das misturas, sendo que o projeto de agregados foi realizado de forma que as misturas incluindo 10% de agregados RAP tivessem praticamente a mesma curva de classificação da mistura asfáltica de referência. Na Tabela 7, são apresentadas as composições das misturas avaliadas, considerando, para as misturas recicladas, a interação total do ligante proveniente do RAP (0,43%).

Figura 18 — Curvas granulométricas de projeto das misturas



Fonte: Autora (2023)

Tabela 7 — Composição (%) das misturas

Misturas	Brita 3/8” (%)	Pó de Pedra (%)	RAP (%)	Cinzas (%)	Ligante (%)	Total (%)
AB-AM	78,31	17,19	-	-	4,50	100
AB-RAP	76,74	9,59	9,59	-	4,07+0,43 RAP	100
HI-AM	75,45	20,06	-	-	4,50	100
HI-RAP	66,19	20,15	9,59	-	4,07+0,43 RAP	100
HI-RAP-C	66,19	19,19	9,59	0,96	4,07+0,43 RAP	100

Fonte Autora (2024)

4.1.4.1 Determinação do Volume de Vazios (Vv)

A determinação da porcentagem do volume de vazios das misturas compactadas foi obtida de acordo com a norma do DNIT 428 (2022). O volume de vazios (Vv) foi calculado a partir da relação entre a massa específica máxima medida (Gmm) e a massa específica aparente (Gmb), através da Equação 2.

$$Vv = \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

Vv = volume de vazios (%),

Gmm = massa específica máxima medida (g/cm³), e

Gmb = massa específica aparente (g/cm³).

A determinação da Gmb seguiu a norma DNIT 428 (2022), a qual estabelece um procedimento padrão para misturas porosas com volumes de vazios $\geq 10\%$. A metodologia utilizada baseou-se no método de análise dimensional, onde o volume de vazios é calculado geometricamente a partir das dimensões, altura, diâmetro e peso do corpo de prova, conforme especificado nas equações 3, 4 e 5 a seguir.

$$V = H \times \pi \times \frac{D^2}{4} \quad (3)$$

Onde:

V = volume do corpo de prova (cm³);

H = média aritmética de quatro leituras da altura do CP (cm);

D = média aritmética de quatro leituras do diâmetro do CP (cm).

$$MEa = \frac{A}{V} \quad (4)$$

Onde:

MEa = massa específica aparente do corpo de prova (g/cm³);

A = massa do corpo de prova seco ao ar (g);

V = volume do corpo de prova (cm³).

$$Gmb = \frac{MEa}{0,9971} \quad (5)$$

Onde:

Gmb = densidade relativa aparente do CP (adimensional).

MEa = massa específica aparente do corpo de prova (g/cm³).

4.1.5 Caracterização Mecânica

Os ensaios de caracterização mecânica seguiram uma série de procedimentos padronizados por normas brasileiras e internacionais, conforme detalhado na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 — Ensaios mecânicos e normas para avaliação das misturas

Ensaios Mecânicos	Norma
Resistência à tração (RT)	DNIT 136/2018 – ME
Módulo de Resiliência (MR)	DNIT 135/2018 – ME
Módulo Complexo (MC)	DNIT 416/2019 – ME /AASHTO T 342-2011
Desgaste Cântabro (DC)	DNER-ME 383/1999 /DNER-ES 386/1999
DP (<i>Stress Sweep Rutting</i> -SSR)	AASHTO TP 134-19
Dano por umidade induzida	DNIT 180/2018 – ME /ASTM D7064/2021

Fonte: Autora (2023)

4.1.5.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)

O ensaio de RT é regulamentado pela norma DNIT 136/2018 – ME. Esse ensaio envolve a aplicação de uma carga de compressão em planos que são paralelos e diametralmente opostos em um corpo de prova cilíndrico, conforme ilustrado na Figura 19. As forças aplicadas criam tensões de tração uniformes ao longo do diâmetro. A Resistência à Tração (RT) do corpo de prova é equivalente a essa tensão de tração, equação 6.

$$RT = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (6)$$

Onde:

RT = resistência à tração, à temperatura do ensaio, em MPa;

F = carga de ruptura, em N;

D = diâmetro de corpo de prova, em mm;

H = altura do corpo de prova (espessura), em mm.

Figura 19 — Ensaio de RT



Fonte: Autora (2023)

4.1.5.2 Desgaste Cântabro (DC)

Conforme especificado na norma DNER-ME 383/99, o ensaio de desgaste Cântabro deve ser conduzido utilizando o mesmo equipamento empregado no ensaio de abrasão *Los Angeles*, porém sem a inclusão da carga abrasiva (esferas de aço). O corpo de prova (CP) é inserido no tambor *Los Angeles*, após seu condicionamento a 25 °C, e a máquina é configurada para executar 300 revoluções a uma velocidade entre 30 rpm e 33 rpm. Antes e após a realização do ensaio, o CP é pesado, Figura 20. O desgaste da mistura asfáltica é determinado utilizando a Equação 7.

$$A = \frac{P - P'}{P} \quad (7)$$

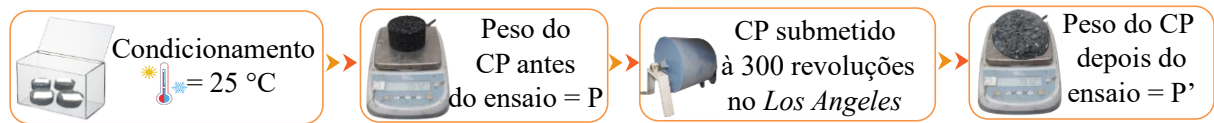
Onde:

A = desgaste da mistura (%);

P = peso do CP, antes do ensaio;

P' = peso do CP após o ensaio.

Figura 20 — Representação do ensaio de desgaste cântabro



Fonte: Autora (2024)

4.1.5.3 Dano por Umidade Induzida (DUI)

O ensaio de dano por umidade foi realizado seguindo os procedimentos da norma DNIT 180 (DNIT, 2018) e em conformidade com o requisito de projeto estabelecido na norma ASTM D7064 (ASTM, 2021), a qual permite determinar uma resistência à tração retida de 80%. O ensaio é realizado com 6 CPs, divididos em subgrupos de 3 CPs com e sem condicionamento. O subgrupo condicionado é submetido a ciclos de congelamento e descongelamento de 16 h a -18 °C e $24 \pm 1\text{ h}$ a 60 °C , respectivamente, Figura 21. Ao final dos ciclos, as amostras são ensaiadas para determinação da resistência à tração retida, conforme a equação 8.

$$RRT = \frac{RTc}{RT} \times 100 \quad (8)$$

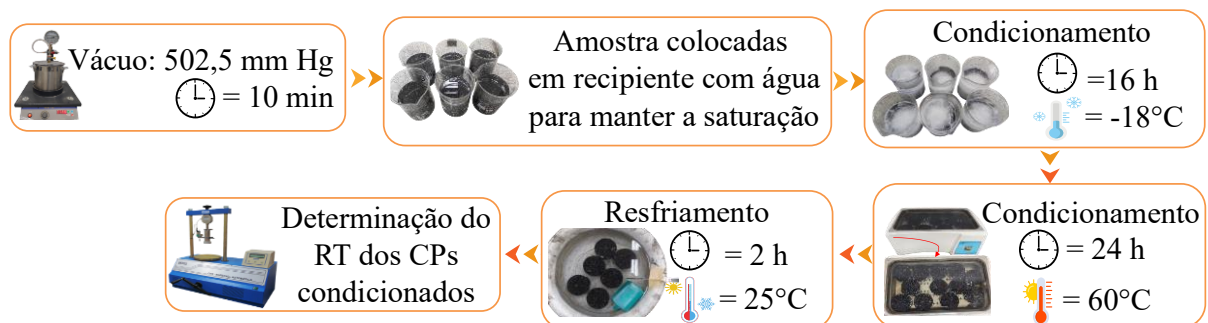
Onde:

RRT = Razão de resistência à tração retida (%)

RTc = média da resistência à tração dos CPs que sofreram condicionamento (MPa);

RT = média da resistência à tração por compressão dos CPs que não sofreram condicionamento (MPa).

Figura 21 — Representação do ensaio de dano por umidade induzida



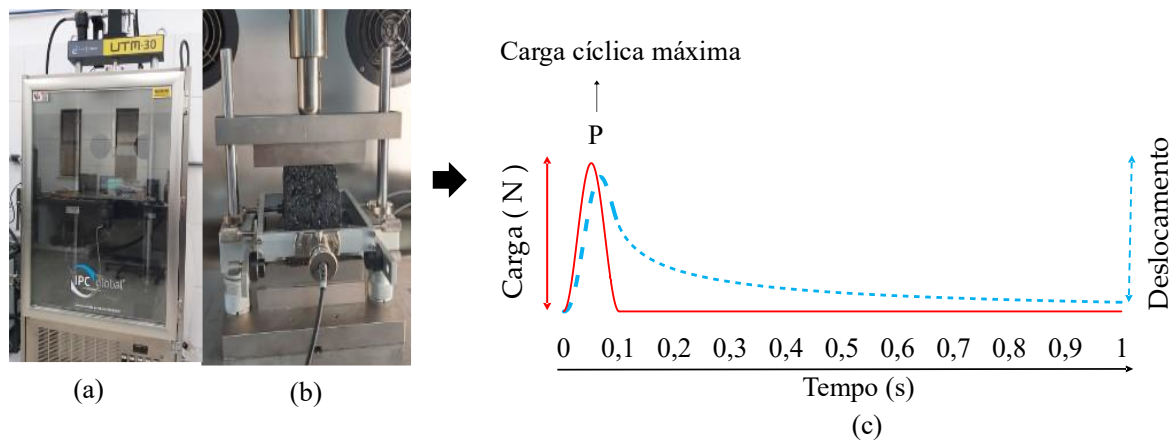
Fonte: Autora (2024)

4.1.5.4 Módulo de Resiliência (MR)

O ensaio de MR envolve a aplicação de cargas repetidas verticalmente que atuam diametralmente em um corpo de prova cilíndrico, resultando em uma tensão de tração que age perpendicularmente ao plano da carga aplicada. O deslocamento horizontal recuperável é medido por sensores denominados *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs) e registrado por um sistema de aquisição de dados.

A norma brasileira que regulamenta os procedimentos dos ensaios é a DNIT 135/2018. A determinação do MR de misturas asfálticas é geralmente realizada à temperatura de 25 °C. Cada ciclo de carga tem uma duração de 1,0 s (frequência de 1 Hz), durante o qual é aplicado um pulso de carga que segue uma forma de onda aproximadamente semi-senoidal, com duração de 0,1 s, seguido por 0,9 s de repouso, Figura 22.

Figura 22 — UTM (a), Ensaio em andamento (b) Duração dos tempos de descanso (c)



Fonte: Adaptado de DNIT 135/2018

A norma estabelece a necessidade de condicionamento do corpo de prova (CP) por um período mínimo de 4 horas, mantendo-o a uma temperatura de $25 \pm 0,5$ °C. A carga aplicada no ensaio deve situar-se entre 5% e 25% da RT. Para esse estudo, foi aplicada uma carga de 10% do RT das amostras. O valor de MR é obtido pela equação 9.

$$MR = \frac{P}{|\Delta H| t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (9)$$

Onde:

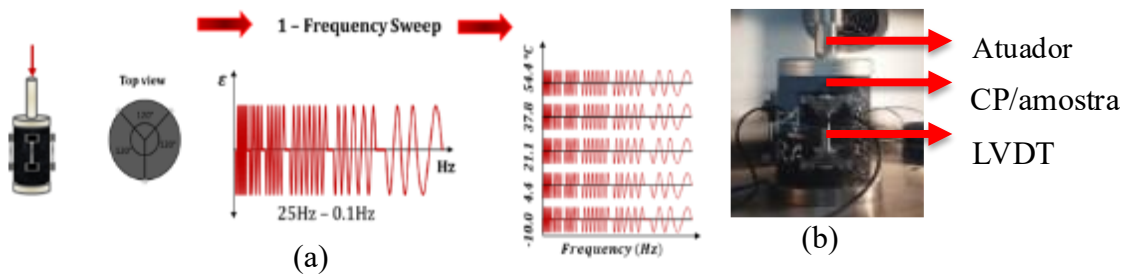
MR = módulo de resiliência (MPa);

P = carga cíclica (N);
 ΔH = deslocamento horizontal (mm),
 t = altura do CP (mm);
 μ_i = coeficiente de Poisson.

4.1.5.5 Módulo Complexo $|E^*|$

O parâmetro de rigidez das misturas foi determinado seguindo as diretrizes da norma AASHTO T 342 (2011). As amostras foram submetidas às temperaturas de -10; 4,4; 21,1 e 37,8 °C e frequências de carregamento senoidal (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz) no intervalo linear viscoelástico entre 50 e 75 $\mu\text{m/m}$, Figura 23 (a).

Figura 23 — Frequências de carregamento (a) e ensaio em execução (b)



Fonte: Autora (2024)

O ensaio foi realizado na UTM-30 (*Universal Testing Machine*), com os deslocamentos avaliados por meio de 3 LVDTs, Figura 23 (b). O valor do módulo complexo foi obtido a partir da interpretação e das expressões matemáticas do modelo 2S2P1D. A Equação 10 representa a principal equação desse modelo, a qual descreve o módulo complexo.

$$E^*(i\omega\tau) = E_\infty + \frac{E_0 - E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (10)$$

Onde:

E_∞ = módulo assintótico quando a frequência tende a zero;
 E_0 = módulo assintótico quando a frequência tende ao infinito;
 δ, β = constantes adimensionais;
 k, h = expoentes associados aos amortecedores parabólicos;
 ω = frequência angular;

τ = tempo característico determinado usando fatores de deslocamento tempo-temperatura a uma dada temperatura, calibrado usando τ_0 como tempo característico de referência.

4.1.5.6 Deformação Permanente (DP)

A deformação permanente das misturas foi determinada seguindo as diretrizes da norma AASHTO TP 134 (2019). Os ensaios foram realizados em uma UTM-25 em duas temperaturas de 17 e 47 °C, sob tensão confinante constante de 69 kPa, Figura 24. O ensaio considera a aplicação de 600 ciclos, divididos em três blocos de 200 ciclos e três níveis de tensões verticais de 483, 689 e 896 kPa. Na temperatura de 17 °C o período de aplicação da carga é de 0,4 s com repouso de 1,6 s. Já na temperatura alta (47 °C) é aplicada uma carga de 0,4 s seguida por um período de descanso de 3,6 s. Os dados obtidos do ensaio baseiam-se nas três principais equações 11, 12 e 13, Frota *et al.* (2022), descritas a seguir.

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\varepsilon_0 \times N_{red}}{(N_1 + N_{red})^\beta} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{vp} = A\xi_p = p_1 \log \log (\xi_p) + p_2 \quad (12)$$

$$\varepsilon_{vp} = \frac{d_1 (\sigma_v) \times d_2}{(p\alpha)} \quad (13)$$

Onde:

ε_{vp} = deformação viscoelástica (permanente),

ε_0 , N_1 , β = coeficientes do modelo,

N_{red} = número de ciclos reduzidos na condição de carregamento de referência,

$\alpha\xi_p$ = fator de ajuste de redução do tempo de aplicação de carga,

ξ_p = tempo de carregamento reduzido,

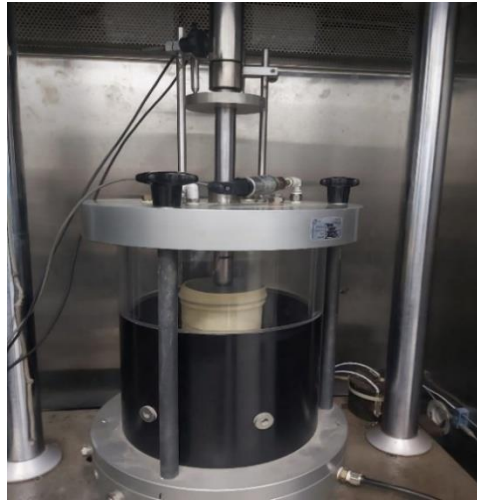
p_1 e p_2 = coeficientes do fator de ajuste de redução do tempo de aplicação de carga,

$\alpha\sigma_v$ = fator de ajuste de tensão vertical,

σ_v = tensão vertical,

d_1 e d_2 = coeficientes do fator de ajuste de tensão aplicada

Figura 24 — Ensaio de deformação permanente SSR



Fonte: Autora (2024)

4.1.6 Caracterização Funcional

Para determinar as características de drenagem de misturas asfálticas porosas, é necessário avaliar suas propriedades hidráulicas. Nesse contexto, dois ensaios são fundamentais: a determinação dos vazios comunicantes e a medição da permeabilidade.

4.1.6.1 Vazios Comunicantes (VC)

A quantidade de vazios comunicantes presentes em uma mistura asfáltica porosa influencia diretamente na permeabilidade da mistura. Nesta pesquisa, esse parâmetro foi determinado de acordo com a norma francesa AFNOR NF P98-254-2 (1993).

O ensaio consiste em medir a quantidade de água armazenada no corpo de prova através de sua face superior, estando as demais faces impermeabilizadas com fita plástica extraforte (do tipo Silvertape) e parafina, e mantendo uma película de água constante sobre o corpo de prova durante dez minutos, Figura 25.

Figura 25 — Procedimento do ensaio de vazios comunicantes



Fonte: Autora (2024)

O volume de vazios comunicantes foi calculado pela equação 14.

$$V_c = \left(\frac{P_{ab}}{A_f \times h_{red}} \right) \times 100 \quad (14)$$

Onde:

V_c : é volume de vazios comunicantes (%),

P_{ab} : o peso de água absorvida (g);

A_f : a área da face do CP (cm²) e

h_{red} : é altura reduzida (cm)

Com a finalidade de definir-se a altura reduzida utiliza-se a equação 15:

$$h_{red} = h_m \left(\frac{d_{máx}}{20} \right) \times 100 \quad (15)$$

Em que h_m é altura média do corpo de prova, (cm) e $d_{máx}$ é diâmetro máximo do agregado (cm).

4.1.6.2 Permeabilidade (k)

A determinação do coeficiente de permeabilidade (k) foi conduzida utilizando um permeâmetro de carga constante, conforme as recomendações do método de ensaio da norma

brasileira NBR 13.292 (2021), Figura 26. Este método é recomendado para materiais com alta permeabilidade, tais como solos granulares e misturas de granulometria aberta (Garcia *et al.* 2020). Além disso, foram considerados os valores de referência para o coeficiente de permeabilidade (k), conforme estabelecido pela norma ASTM D7064 (2021).

Figura 26 — Permeâmetro de carga constante



Fonte: Autora (2023)

O coeficiente de permeabilidade foi calculado conforme a equação 16.

$$K = \frac{Q \times L}{h \times A \times t} \quad (16)$$

Onde:

K = Coeficiente de permeabilidade (cm/s)

Q = Volume de água que atravessa o CP (cm³)

H = Carga hidráulica (cm)

L = Altura do CP (cm)

A = Área da seção do CP (cm²)

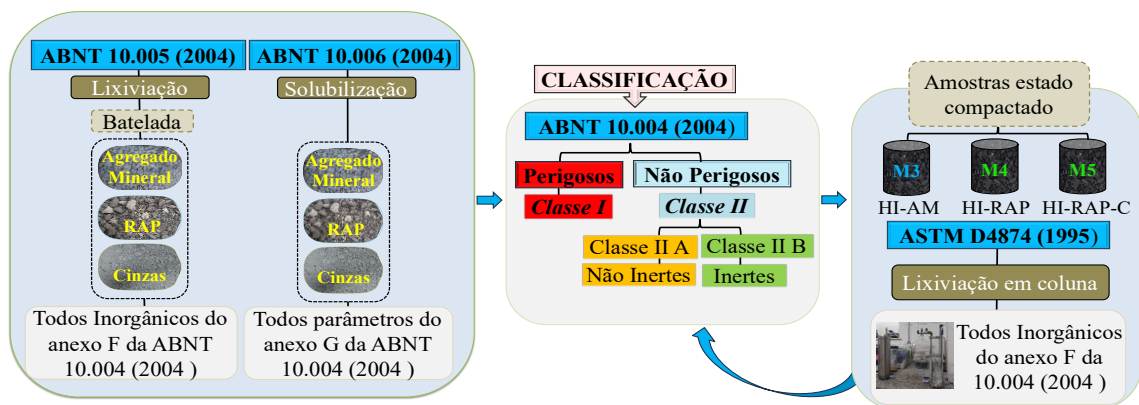
t = Tempo decorrido da percolação da água (s)

4.1.7 Caracterização Ambiental

4.1.7.1 Ensaios de Lixiviação e Solubilização

Quando se trata da utilização de resíduos para a fabricação de novos produtos, é necessário conferir a caracterização desses materiais, especialmente no que diz respeito à lixiviação, visando garantir que não sejam utilizados materiais potencialmente nocivos ao meio ambiente (Farina *et al.*, 2024). Nesse contexto, esse estudo fundamentou-se na realização de ensaios para a determinação dos lixiviados dos agregados minerais e reciclados (RAP e cinzas da incineração de resíduos de serviço de saúde) e a análise da solubilização destes resíduos. A condução destes ensaios pautou-se nas diretrizes das normas brasileiras e de uma norma internacional, iniciando com as análises dos lixiviados das amostras no estado solto e solubilizados e, por fim, a lixiviação em coluna, conforme detalhado no fluxograma a seguir, Figura 27.

Figura 27 — Fluxograma das análises ambientais



Fonte: Adaptado ABNT 10004, 10005 e 10006 (2004); ASTM D4874 (1995)

4.2 Etapas Metodológicas

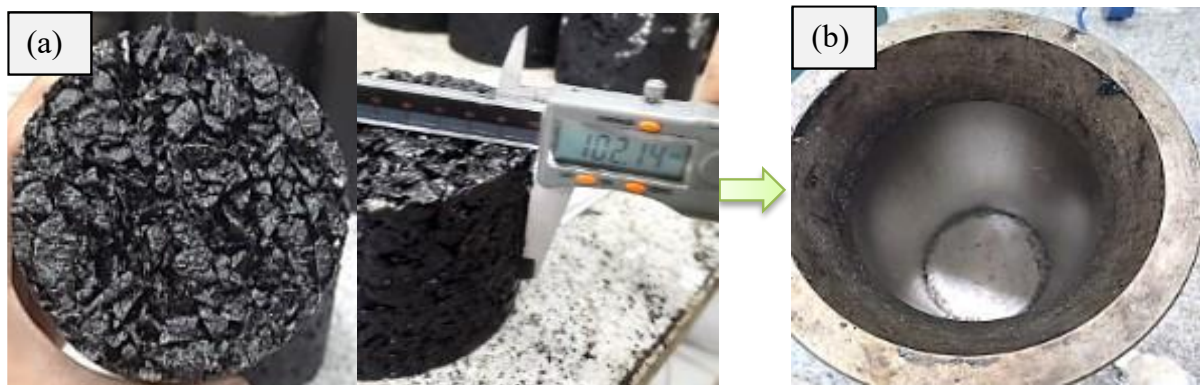
4.2.1 Avaliação das Propriedades Mecânicas e Hidráulicas das Misturas Produzidas com Asfalto-Borracha

Para atingir o primeiro objetivo específico desta pesquisa, foram produzidas duas misturas asfálticas porosas, sendo uma mistura de referência (AB-AM) e uma mistura reciclada contendo 10% de RAP (AB-RAP) e 4,5% de ligante (asfalto-borracha). Para a execução desta fase, foram realizadas as caracterizações dos agregados e dos ligantes, conforme detalhado no item 4.1.1 e 4.1.2, respectivamente.

Os agregados minerais foram pré-aquecidos a 180 °C por 2 h. O RAP foi aquecido separadamente a 140 °C por 30 min para conservar as características do ligante. As temperaturas indicadas para usinagem e compactação foram de 170 °C e 152 °C, respectivamente. As amostras foram então submetidas a um processo de envelhecimento por 2 h antes de prosseguir com a moldagem dos CPs.

A dosagem das misturas asfálticas seguiu a metodologia *Superpave*, uma vez que esta representa de forma mais precisa a compactação em campo (Cavalcanti *et al.*, 2024). Entretanto, ao remover os CPs do cilindro metálico de compactação, os CPs tendiam a desagregar, além de se expandir horizontalmente ao resfriarem, Figura 28 (a). Desta forma, foi necessário aguardar um período de 30 minutos para que os CPs fossem desenformados do cilindro de compactação, Figura 28 (b). Esse procedimento foi estabelecido para assegurar a integridade das amostras.

Figura 28 — (a) CP submetido à expansão (b) CP em espera para desenformar



Fonte: Autora (2023)

As misturas foram produzidas com o teor de ligante de 4,5%, sendo que para a mistura AB-RAP o teor foi baseado no parâmetro RBR (RAP *Binder Ratio*), ou seja, proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura (Frota, 2023).

O volume de vazios alvo foi definido como a média do intervalo permitido para as misturas do tipo CPA, o qual pode variar entre 18% e 25%. Nessa fase, as misturas produzidas foram alocadas para realizar quatro tipos de ensaios, conforme Figura 29.

Figura 29 — Fluxograma das misturas e ensaios com AB



Fonte: Autora (2024)

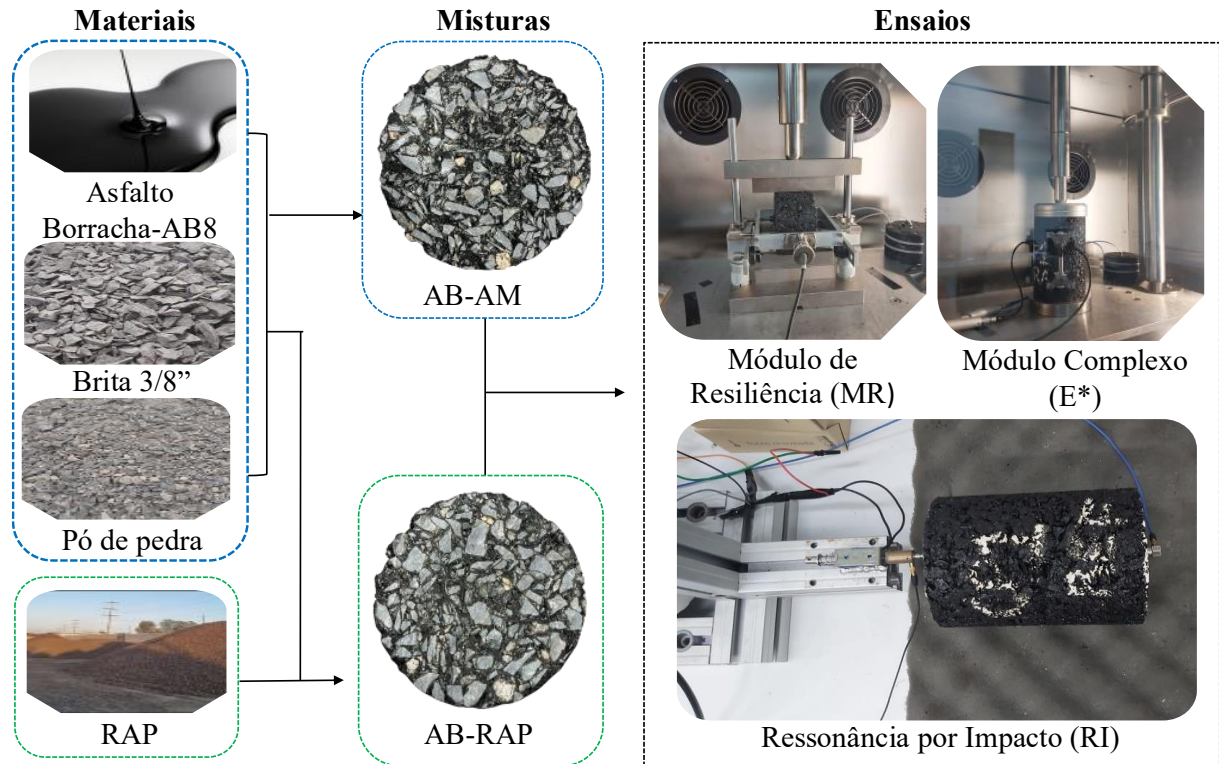
4.2.2 Avaliação da Adequação das Abordagens para Determinar a Rigidez das Misturas Produzidas com Asfalto-Borracha

Nesta etapa, foram produzidas duas misturas: uma de referência (AB-AM) e outra contendo 10% de RAP (AB-RAP). Os materiais utilizados foram: agregados de brita de 3/8", pó de pedra, RAP, e 4,5% de ligante asfáltico do tipo Ecoflex-AB8 (Asfalto Modificado com Borracha).

As misturas foram produzidas seguindo a metodologia *Superpave*, com compactações que variaram entre 100 e 125.

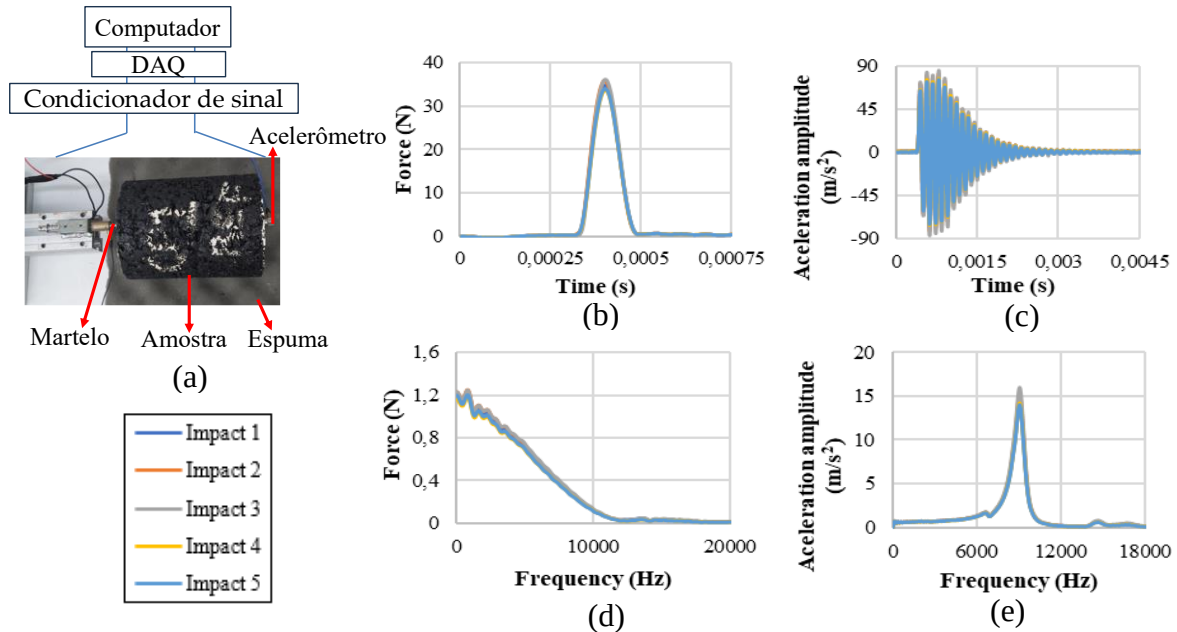
As misturas de referência (AB-AM) e outra contendo 10% de RAP (AB-RAP) foram avaliadas por meio de três tipos de ensaios que caracterizam o comportamento viscoelástico dos materiais asfálticos, entre eles, Módulo de Resiliência (MR), módulo complexo $|E^*|$ e Ressonância por Impacto (RI). Na Figura 30 apresenta-se um fluxograma que ilustra os materiais utilizados, as misturas e os respectivos ensaios realizados.

Figura 30 — Fluxograma experimental dos ensaios não destrutivos



O ensaio de ressonância por impacto foi realizado colocando as amostras sobre espuma, Figura 31, com suas faces retificadas para melhor posicionamento do acelerômetro e do impacto do martelo. A ação mecânica do martelo envolve cinco impactos que excitam a amostra na direção longitudinal em direção ao acelerômetro. Cada impacto dura aproximadamente 300 ms e os resultados do sinal de saída do acelerômetro são medidos no domínio do tempo e da frequência. É importante ressaltar também que o ensaio de ressonância por impacto foi realizado em três temperaturas (4,4 °C, 20 °C e 37,8 °C), semelhantes às temperaturas utilizadas no módulo complexo.

Figura 31 — Representação e exemplo de resultados do ensaio de ressonância por impacto



Fonte: Autora 2024

Legenda: Representação e exemplo de resultados do ensaio de ressonância de impacto: (a) Ensaio de Ressonância por Impacto; (b) resultados da célula de carga de martelo de impacto no domínio do tempo; (c) resultados do acelerômetro no domínio do tempo; (d) resultados da célula de carga de martelo de impacto no domínio da frequência; (e) resultados do acelerômetro no domínio da frequência.

A obtenção da curva mestre de misturas asfálticas porosas também exigiu o auxílio de um software de elementos finitos para realizar a modelagem a fim de obter a Função de Resposta em Frequência (FRF) otimizada variando os parâmetros viscoelásticos lineares do material (Carret *et al.*, 2018; Bezerra *et al.*, 2022). Em outras palavras, através de um processo iterativo, são determinados parâmetros que caracterizam o comportamento de rigidez do material viscoelástico para qualquer frequência e temperatura. O processo de interação utiliza o valor do erro calculado entre as respostas experimentais e otimizadas e, em seguida, determina os valores das variáveis do modelo viscoelástico que representa o material para minimizar o erro.

4.2.3 Avaliação do Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas Asfálticas Porosas Produzidas com RAP, Cinzas de Resíduos de Serviço de Saúde e Ligante Altamente Modificado – HiMA

Nesta fase, foram produzidos três tipos de misturas: uma de referência (HI-AM) e duas misturas recicladas (HI-RAP e HI-RAP-C). A mistura HI-RAP foi formulada com 10% de

RAP, enquanto a mistura HI-RAP-C incluiu 10% de RAP e 1% de cinzas (CIRSS). Os agregados minerais (Brita 3/8" e pó de pedra) e reciclados, foram caracterizados, conforme descrito no item 4.1.1. Além disso, foi realizada a caracterização química dos três tipos de agregados (Agregado Mineral – AM, RAP e cinzas) por meio da técnica de Fluorescência de Raios X (FRX) e Difração de Raio X (DRX), item 4.1.3.

Para a confecção das misturas, os agregados minerais foram aquecidos a 190 °C por 2 h. O RAP foi aquecido separadamente a 140 °C por 30 min para conservar as características do ligante. As temperaturas indicadas para usinagem e compactação foram de 180 °C e 171 °C, respectivamente de acordo com a viscosidade Brookfield do ligante. As amostras foram então submetidas a um processo de envelhecimento por 2 h antes de prosseguir com a moldagem dos CPs.

As misturas foram compactadas utilizando o método de compactação *Superpave*, com 125 giros. De forma similar às misturas produzidas com asfalto-borracha, as misturas produzidas com ligante HiMA apresentaram problemas de expansividade horizontal, exigindo um tempo de espera de 15 minutos para serem removidas do cilindro de compactação.

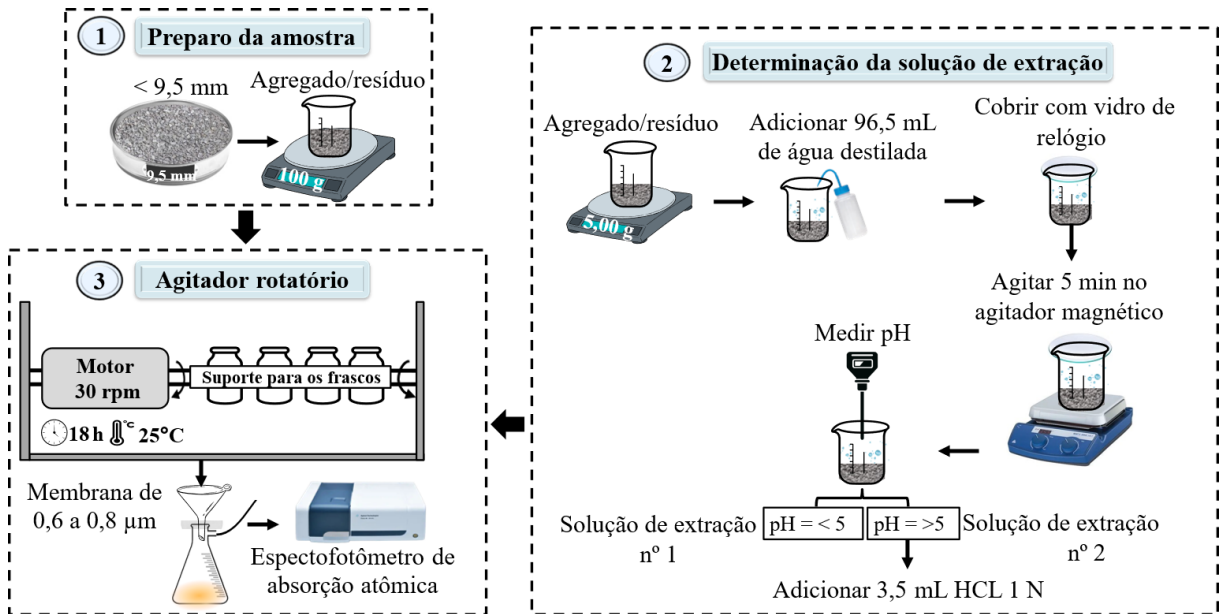
Nesta etapa, as misturas foram submetidas a tratamento estatístico dos resultados mecânicos e funcionais, empregando-se ANOVA e testes post-hoc para os dados paramétricos, enquanto o teste de Kruskal-Wallis foi utilizado para os dados não paramétricos.

4.2.4 Caracterização Química dos Efluentes após Ensaios de Lixiviação e Solubilização e Classificação conforme a Norma ABNT 10.004/2004

Nesta etapa, foram realizados ensaios de caracterização ambiental (lixiviação em batelada, coluna e solubilização). O objetivo principal foi classificar os materiais de acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), a qual estabelece a classificação dos resíduos com base em seus potenciais riscos de contaminação ambiental.

No Brasil, o ensaio de lixiviação em batelada segue as diretrizes da norma NBR 10.005 (ABNT, 2004). De acordo com essa norma, utiliza-se água destilada como meio lixiviante, e o pH é ajustado por meio de soluções de ácido acético. Durante o ensaio, a amostra é continuamente agitada por um período de 18 horas por meio de um motor rotatório a 30 rpm, Figura 32.

Figura 32 — Procedimento de extração do lixiviado em batelada

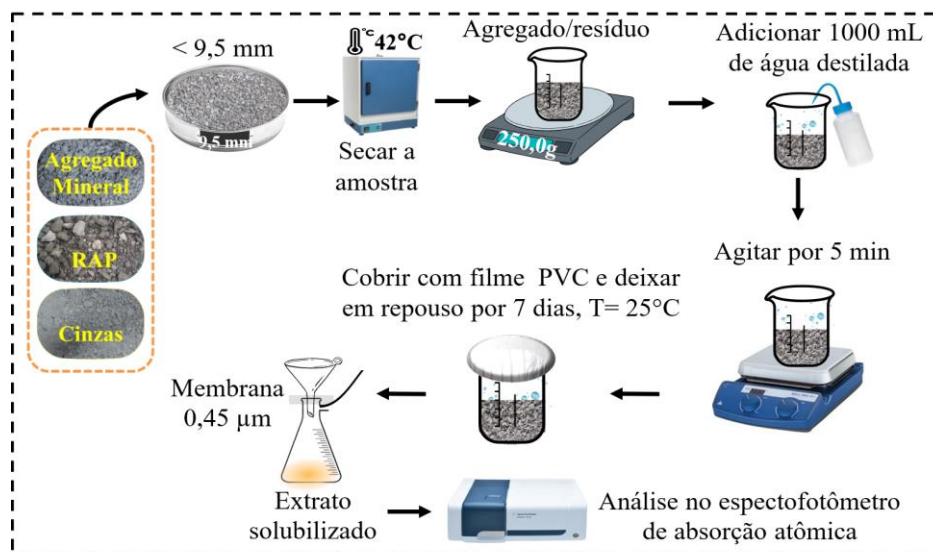


Fonte: Adaptado ABNT 10.005 (2004)

Para obtenção do extrato do lixiviado e solubilizado seguiu-se o procedimento de ensaio para materiais não voláteis e 100% sólidos. Devido à ausência de equipamentos adequados para a realização dessa análise, foi enviada uma amostra de cada material (agregado mineral, RAP e cinzas - CIRSS) a um laboratório terceirizado, onde foram realizadas as análises necessárias.

O extrato do solubilizado foi obtido seguindo as diretrizes da NBR 10.006 (ABNT, 2004), conforme os procedimentos de ensaio na Figura 33 a seguir.

Figura 33 — Procedimento de extração do extrato solubilizado

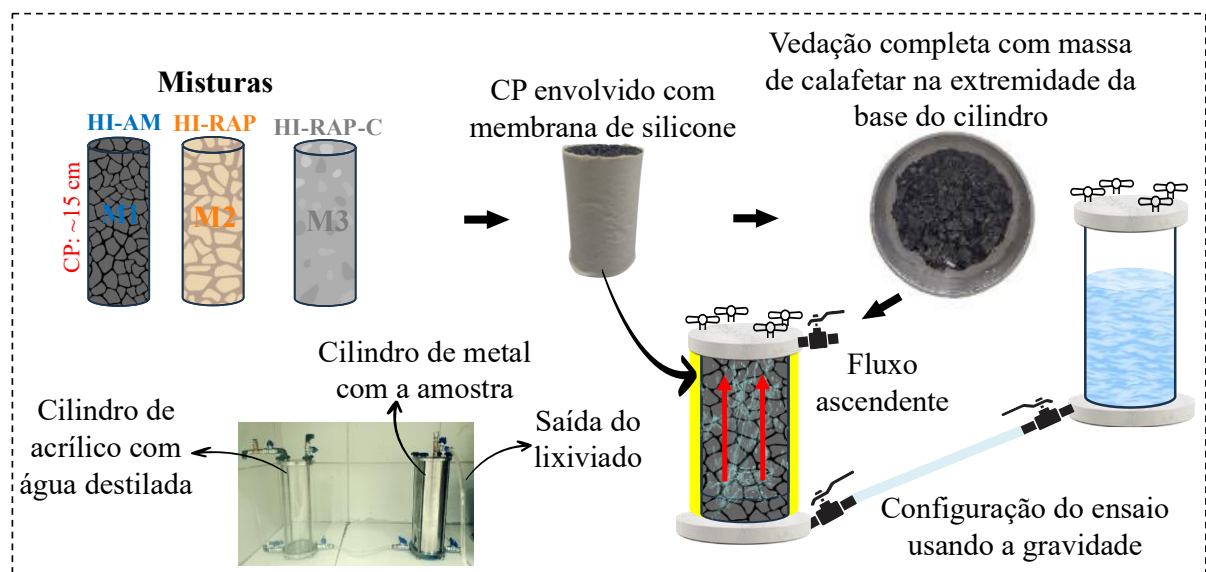


Fonte: Adaptado ABNT 10.006 (2004)

Para avaliar a mobilidade dos contaminantes em condições mais próximas da realidade, foram realizados ensaios de lixiviação em coluna, conforme a norma ASTM D 4874/1995. As misturas produzidas com 10% de RAP, 1% de cinza (CIRSS) e 4,5% de ligante, denominadas HI-AM, HI-RAP e HI-RAP-C, foram compactadas com aproximadamente 15 cm de altura e 100 mm de diâmetro. Subsequentemente, foi realizado o ensaio de lixiviação em coluna, utilizando como solução extratora água destilada, a qual percolou sobre as amostras em fluxo ascendente, conforme descrito na Figura 34. O lixiviado obtido de cada uma das três amostras foi encaminhado ao laboratório de análise, onde foram avaliados os parâmetros inorgânicos especificado no anexo F da NBR 10.004/2004.

Como no Brasil, o ensaio de lixiviação em coluna não é normatizado, a classificação ambiental das misturas foi realizada de acordo com os parâmetros e limites estabelecidos pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Figura 34 — Configuração do ensaio de lixiviação em coluna



Fonte: Autora (2024)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados de desempenho mecânico, hidráulico (funcional) e ambiental das misturas asfálticas porosas produzidas em laboratório da primeira e segunda fase dessa pesquisa.

Os resultados incluem uma série de ensaios mecânicos realizados na primeira fase da pesquisa com as misturas produzidas com asfalto-borracha, assim como testes de condutividade hidráulica. Na segunda fase, foram analisados os resultados mecânicos, funcionais e ambientais das misturas produzidas com ligante altamente modificado (HiMA).

5.1 Avaliação do Comportamento Mecânico e Hidráulico entre as Misturas AB-AM e AB-RAP

Neste tópico, são apresentados os resultados do desempenho mecânico e hidráulico das misturas produzidas com ligante Asfalto-Borracha. Além disso, são apresentados os resultados da caracterização dos agregados utilizados nesta pesquisa juntamente com a densidade específica máxima medida (Gmm), densidade aparente e do volume de vazios.

5.1.1 Caracterização Física dos Constituintes

Os parâmetros de caracterização dos agregados podem ser observados na Tabela 9. Os resultados de perda de massa e índice de forma foram atendidos estando em conformidade com os padrões estabelecidos (DNER 389/1999) para garantir a qualidade e o desempenho das misturas como desgaste abrasivo inferior a 30% e forma superior a 0,5.

Tabela 9 — Parâmetros da caracterização dos agregados utilizados

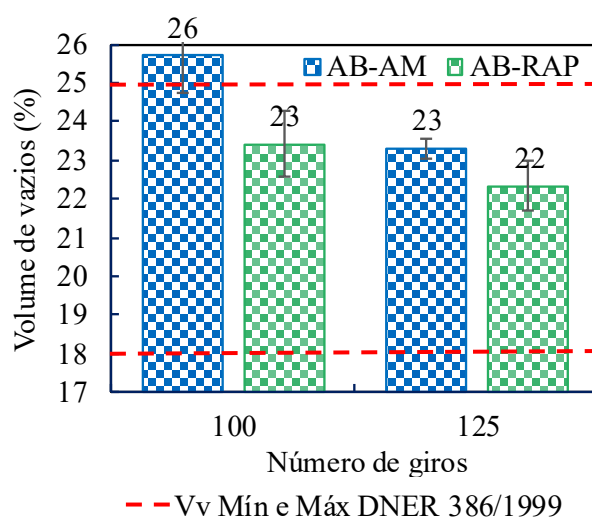
Agregados	Gsa	Gsb	Mesa	Mesb	Absorção	Abrasão Los Angeles	Forma	
			(g/cm ³)	(g/cm)	(%)	(%)	Crivos	Imagem 2D
Brita 3/8"	2,530	2,484	2,523	2,476	0,74	23,28	0,66	0,71
Pó de Pedra	2,536	2,371	2,528	2,365	2,73	-	-	-
RAP	2,499	2,418	2,491	2,411	1,34	-	-	-
Cinzas (fíler)	2,667	-	2,667	-	-	-	-	-

Fonte: Autora (2024)

5.1.2 Volume de Vazios

A Figura 35 apresenta a variação do volume de vazios em função do número de giros nas misturas produzidas com asfalto-borracha compactadas no compactador giratório *Superpave*.

Figura 35 — Variação do Vv e números de giros das misturas AB

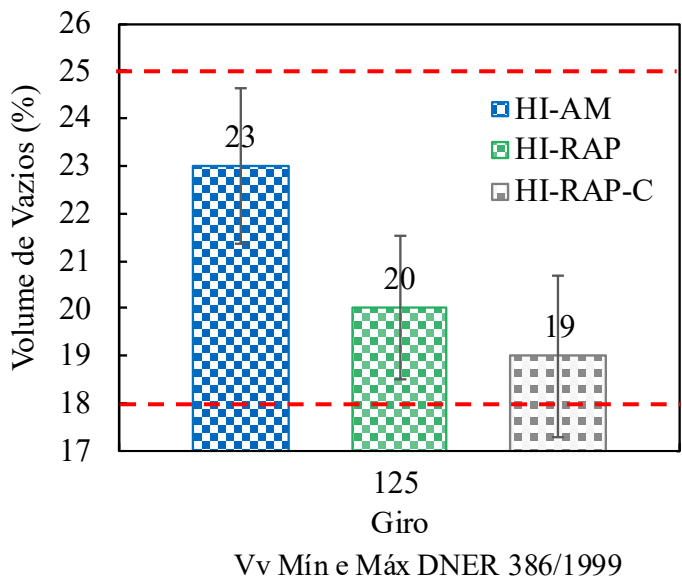


Fonte: Autora (2024)

Observou-se que a mistura de referência (AB-AM) apresentou volume de vazios superior em comparação com as misturas recicladas, independentemente do número de giros aplicados. Destaca-se que, para 100 giros, a mistura AB-AM situou-se fora da faixa normativa

permitida, enquanto as misturas contendo RAP exibiram volume de vazios (Vv) dentro do intervalo estipulado de 18 a 25%. Tal comportamento pode ser atribuído à maior variabilidade do RAP, o qual foi incorporado à mistura sem fracionamento prévio. Já as misturas produzidas com ligante altamente modificado (HiMA) apresentaram uma maior variabilidade no volume de vazios, no entanto, mantiveram-se dentro da faixa permitida, Figura 36. A mistura de referência ficou mais aberta, assim como as misturas com asfalto-borracha.

Figura 36 — Volume de vazio médio das misturas com HiMA



Fonte: Autora (2024)

A seguir tem-se os resultados das densidades específica máxima medida (Gmm) e a densidade aparente (Gmb) para o teor de ligante 4,5%, Tabela 10.

Tabela 10 — Valor médio das densidades de massa específica máxima e aparente

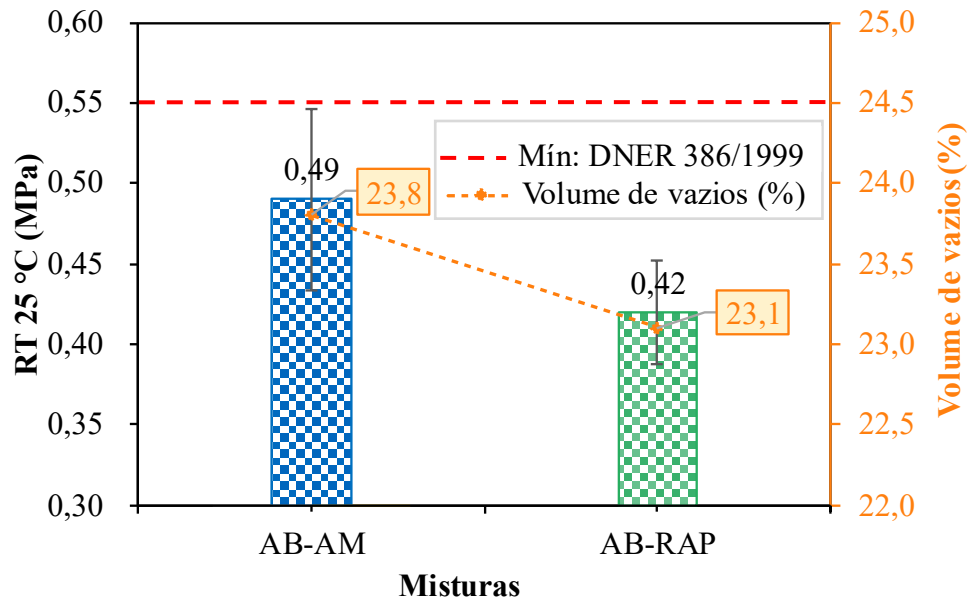
Densidades	AB-AM	AB-RAP	HI-AM	HI-RAP	HI-RAP-C	Teor de ligante
Gmm	2,339	2,331	2,349	2,363	2,329	4,50%
Gmb	1,789	1,797	1,793	1,881	1,883	

Fonte: Autora (2024)

5.1.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Em relação à resistência à tração, nenhuma das misturas produzidas com asfalto-borracha apresentou o valor mínimo de 0,55 MPa exigido pela norma brasileira DNER-ES 386/1999 para CPA, conforme Figura 37.

Figura 37 — RT das misturas AB-AM e AB-RAP



Fonte: Autora (2024)

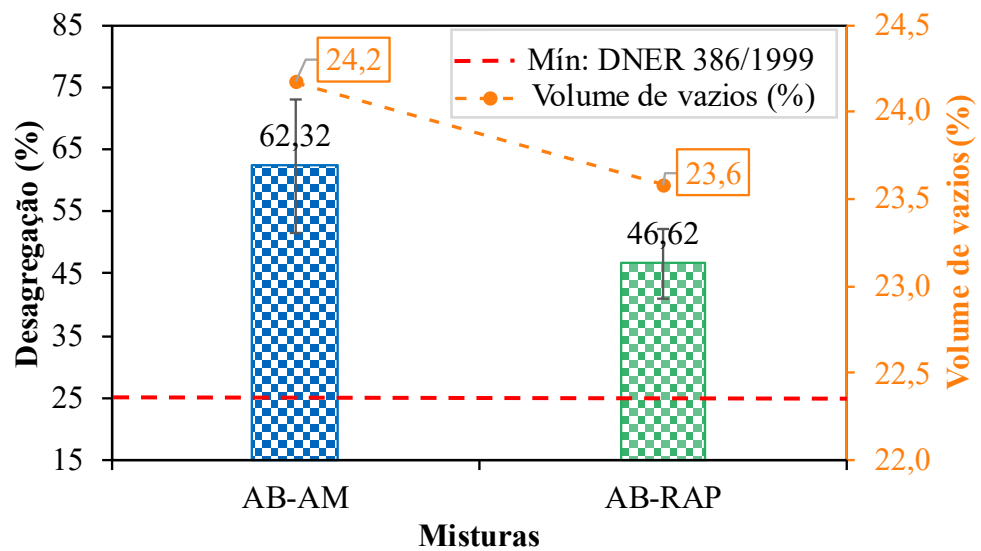
Para a AB-AM, foi obtida uma média de 0,49 MPa, enquanto a AB-RAP apresentou uma resistência da ordem de 0,42 MPa. Esses valores são comparáveis aos encontrados por Alecrim (2021), que investigou misturas asfálticas porosas contendo 15% de RAP e ligante modificado por polímero, obtendo resistências de 0,42 MPa e 0,46 MPa para as misturas de referência e reciclada, respectivamente.

Frigio *et al.* (2015), por sua vez utilizando 15% de RAP graúdo de CPAs antigas em misturas asfálticas misturas porosas, juntamente com 5 e 5,25% de ligante modificado por polímero obtiveram resultados de resistência à tração da ordem de 0,55 MPa para misturas produzidas em laboratório. Dumke (2005) utilizou 4,5% de asfalto-borracha em misturas asfálticas porosas com um tamanho máximo nominal de agregado de 9,5 mm, obtendo uma resistência de 0,67 MPa e um volume de vazios em torno de 21%. Esses resultados, no entanto, diferem dos obtidos nesta pesquisa, onde a mistura de referência (AB-AM) apresentou um volume de vazios médio de 23,88%, o que pode justificar a menor resistência observada.

5.1.4 Desgaste Cântabro

As misturas asfálticas porosas têm como principal falha a desagregação proporcionada pela quantidade de vazios da mistura. Desta forma, o ensaio de desgaste Cântabro (DC) avalia esse critério mecânico, onde se determina a fragmentação da mistura ao ser submetida à 300 revoluções no equipamento de abrasão *Los Angeles*. Na Figura 38, observa-se o DC das duas misturas analisadas com asfalto-borracha nessa pesquisa.

Figura 38 — Desgaste cântabro das misturas AB



Fonte: Autora (2024)

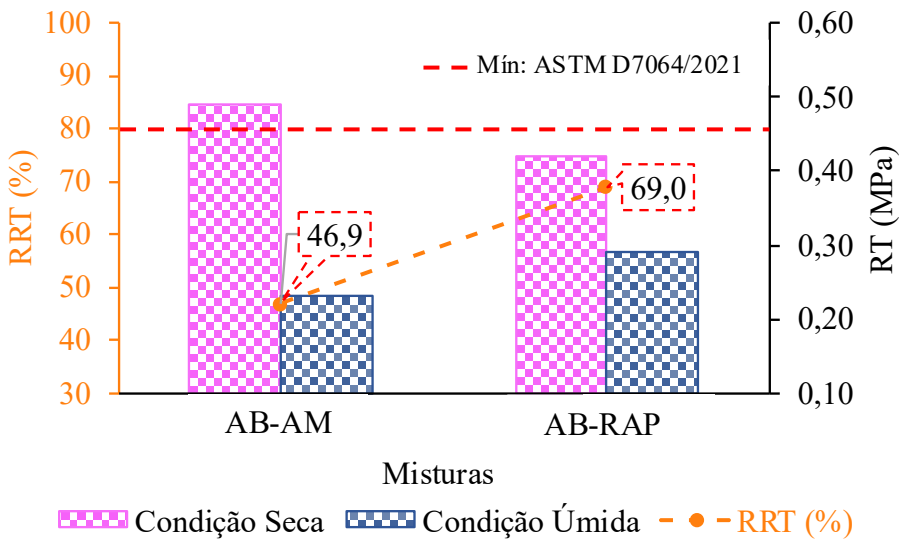
Todas as misturas excederam o limite máximo (25%) estipulado pela norma DNER-ES 386/99. Esses resultados convergem com as constatações da literatura Hu *et al.* (2021), a qual destaca que misturas asfálticas porosas produzidas com asfalto de maior viscosidade tendem a melhorar as características de adesão com os agregados, prevenindo assim a fragmentação da mistura asfáltica. É importante ressaltar que houve variabilidade entre as amostras analisadas nesse ensaio. Em contrapartida, Guimarães (2012) identificou que misturas asfálticas porosas produzidas com asfalto-borracha e polímero SBS apresentaram resultados divergentes com base nos teores de ligantes utilizados, sendo constatado valores de desgaste superiores a 25% para a mistura asfáltica com teor de 4,5% de ligante asfáltico de borracha.

5.1.5 Dano por Umidade Induzida

No que diz respeito a resistência à tração retida obtida no ensaio de dano por umidade induzida, verificou-se que todas as misturas apresentaram resultados inferiores ao valor mínimo exigido de (80%) pela ASTM D7064, com destaque para a mistura de referência (46,94%) que

apresentou uma resistência ainda menor em comparação com a mistura reciclada (69,05%). O aumento de resistência da mistura com RAP pode ser atribuído ao agregado reciclado, assim como observado por De Pascale *et al.* (2023), ao estudar uma mistura asfáltica porosa contendo RAP. A Figura 39 mostra os resultados médios da razão da resistência à tração retida (RRT) para ambas as misturas analisadas.

Figura 39 — Dano por umidade induzida



Fonte: Autora (2024)

Esses resultados já eram esperados devido às misturas não atingirem a resistência à tração mínima de 0,55 MPa exigida para os CPs não condicionados.

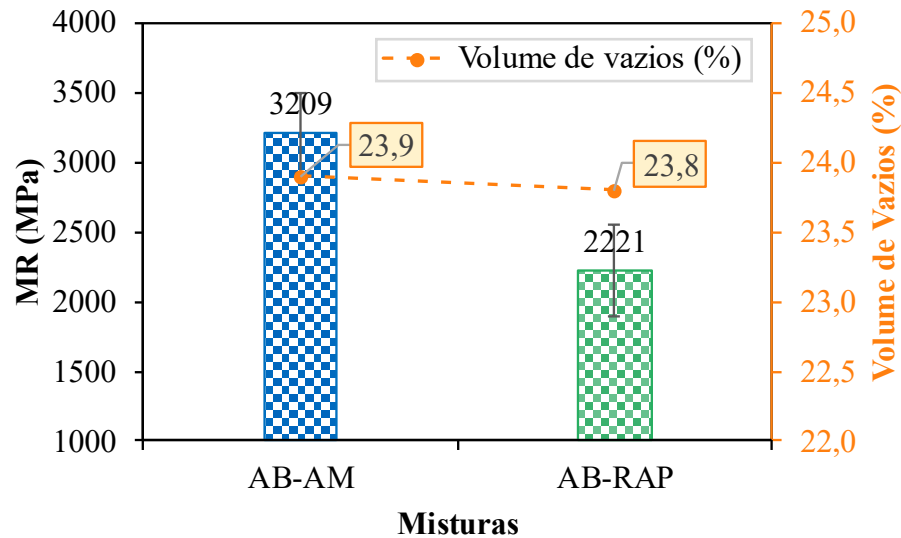
5.2 Avaliação da Adequação das Abordagens Utilizadas para Determinar as Propriedades de Rigidez, Módulo de Resiliência (MR), Módulo Complexo $|E^*|$ e Ressonância por Impacto (RI) em Camadas Porosas de Atrito (CPA)

5.2.1 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência (MR) foi realizado com a finalidade de avaliar o comportamento das misturas quando submetidas a níveis de tensões do tráfego, avaliando a capacidade das misturas armazenar energia elástica durante a aplicação de cargas e, posteriormente, recuperar sua forma original após a remoção dessas cargas. Nesse contexto, a

mistura AB-AM apresentou rigidez superior, com uma média de 3.209 MPa, em comparação à mistura AB-RAP, com MR de 2.221 MPa, Figura 40.

Figura 40 — Módulo de resiliência das misturas AB



Fonte: Autora (2024)

Esses resultados são consistentes com os obtidos por Alecrim (2021), que investigou uma mistura asfáltica porosa contendo 15% de RAP e 4,5% de ligante modificado por polímero, alcançando valores de módulo de resiliência (MR) de aproximadamente 2.914,5 MPa para a mistura de referência e 2.721,5 MPa para a mistura reciclada. Em contraste, estudos realizados por Dresch (2016), Kolodziej (2016) e Alves (2019) com misturas asfálticas porosas apresentaram resultados superiores aos encontrados neste estudo da ordem de 4.000, 3.256 e 5.700 MPa, respectivamente. Os autores ainda destacam que o teor de ligante e a quantidade de vazio presente na mistura contribui para a redução da rigidez.

De acordo com Anusha; Jagadeesh; Sunil (2019), a rigidez das misturas asfálticas porosas é geralmente cerca da metade de dois terços da rigidez das misturas densas. Essa redução é esperada para esse tipo de mistura, uma vez que contém poucos agregados miúdos e ligantes (Alvarez *et al.*, 2006). Os referidos autores destacam que testes laboratoriais na Argentina indicaram MR de 2.200 MPa para misturas porosas, valor correspondente a 60% das misturas densas.

Bernucci *et al.* (2022) destacam que os valores de MR para misturas densas podem situar-se em uma faixa de variação de 2.000 a 12.000 MPa, sendo encontrados resultados menores em misturas produzidas com asfaltos modificados por polímeros ou por borracha, e os maiores valores são obtidos para asfaltos de consistência mais dura. Essas constatações

corroboram com os resultados obtidos para o MR das misturas investigadas, considerando que foram produzidas com asfalto-borracha e apresentam elevados volumes de vazios, os quais influenciam nesse parâmetro.

5.2.2 *Módulo Complexo*

Os resultados experimentais foram analisados e modelados utilizando o modelo 2S2P1D para construção de representações, incluindo as curvas mestras do módulo complexo (Figuras 41 e 42), espaço de Cole-Cole (Figura 43), diagrama de Black (Figura 44) e curva mestra do ângulo de fase com a modelagem 2S2P1D (Figura 45). Os valores obtidos do modelo e das constantes C1 e C2 do modelo William, Landel e Ferry (WLF), utilizados para translação das propriedades em diferentes temperaturas e para montagem de curvas mestras, foram compilados na Tabela 11.

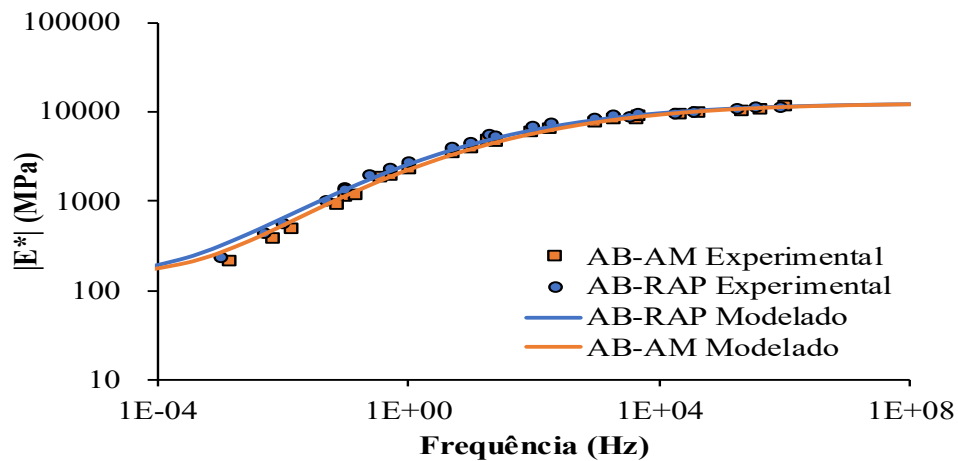
Tabela 11 — Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2

Misturas	E*						WFL		
	E00 (MPa)	E0 (MPa)	k	H	Δ	tE (s)	β	C1	C2
AB-AM	150	12.700	0,25	0,56	3,24	0.085	250	20,31	167,02
AB-RAP	160	12.650	0,24	0,51	2,45	0.080	150	29,44	231,76

Fonte: Autora (2024)

Com base no Princípio da Superposição Tempo Temperatura (PSTT), é possível estabelecer uma relação entre o aumento da temperatura dos materiais asfálticos e a diminuição da frequência de aplicação da carga, e vice-versa. Isto permite a construção das curvas mestras, que ilustram o comportamento das misturas a partir de uma temperatura de referência (Tref =21,1 °C), prevendo a rigidez do material em diversas Frequências Reduzidas. Assim, observa-se para as misturas analisadas que o módulo complexo cresce com o aumento da frequência para ambas as misturas avaliadas, conforme ilustrado na Figura 41.

Figura 41 — Comparação das curvas mestras das misturas à 21,1 °C



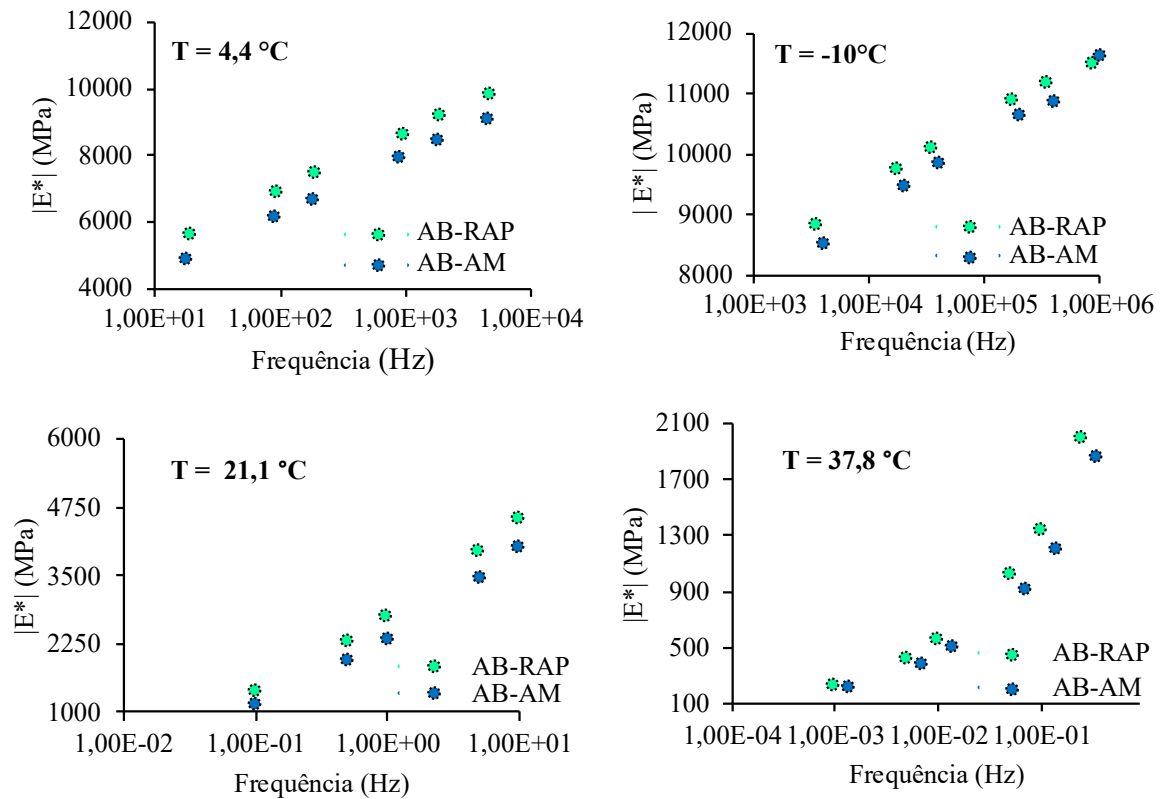
Fonte: Autora (2024)

Tais resultados são atribuídos ao tempo de carregamento reduzido, no qual predominam deformações elásticas no material (Alves, 2019; Frota, 2023). Esses achados são consistentes com as conclusões de Li *et al.* (2021) ao investigarem o comportamento viscoelástico de misturas asfálticas porosas, que observaram uma diminuição do módulo complexo em temperaturas mais alta e em menores frequências de carregamento.

Considerando os módulos complexos obtidos para as misturas, é possível observar que elas possuem função estrutural. Os valores encontrados são comparáveis aos reportados por Manrique-Sanchez; Caro, (2019), os quais corresponderam a 50 a 66% dos módulos típicos para misturas densas (3.000 a 4.000 MPa).

Na Figura 42 é possível observar as curvas mestras individuais segmentadas por temperaturas para todas as misturas analisadas, onde se verifica maior rigidez para a mistura com RAP em todas as temperaturas, ratificando o comportamento já observado nas curvas mestras.

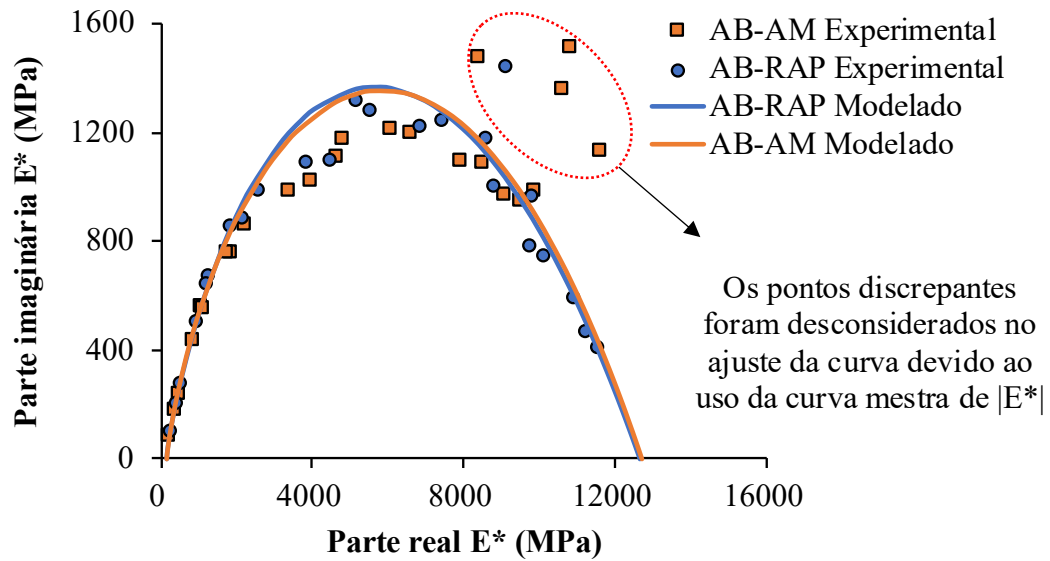
Figura 42 — Curvas mestras do módulo complexo segmentadas das temperaturas



Fonte: Autora (2024)

Ao analisar o espaço Cole-Cole, observou-se que a mistura reciclada (AB-RAP) apresentou uma parcela elástica (E^* Real) menor em comparação com a mistura de referência (AB-AM), Figura 43. No entanto, essa diferença não foi significativa. Esse fenômeno pode ser atribuído ao ligante (asfalto-borracha), que tende a diminuir a rigidez das misturas asfálticas (Bernucci *et al.*, 2022). Embora o RAP tenha exercido pouca influência na rigidez das misturas, ainda assim foi observado um ligeiro aumento de rigidez para AB-RAP, o que era esperado devido à presença do ligante oxidado do RAP (Centaforte, 2018; Eskandarsefat *et al.*, 2018).

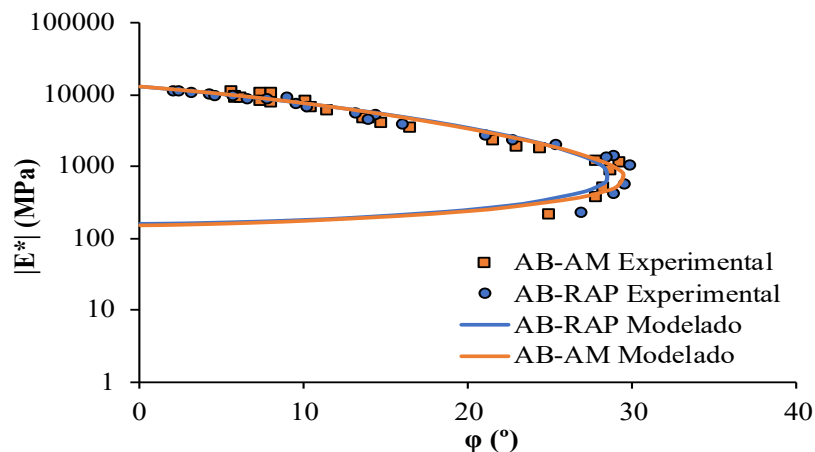
Figura 43 — Módulo complexo nas curvas Cole-Cole



Fonte: Autora (2024)

O Diagrama Black é uma representação gráfica do módulo complexo $|E^*|$, em uma escala logarítmica, em função do ângulo de fase (ϕ) para diferentes temperaturas. Analisando os resultados dessa representação, mostrados na Figura 44, obteve-se um maior ângulo de fase para a mistura de RAP em altas temperaturas, enquanto a mistura de referência demonstrou um ângulo de fase menor, indicando um componente mais elástico em relação à mistura reciclada.

Figura 44 — Diagrama de Black com modelagem 2S2P1D

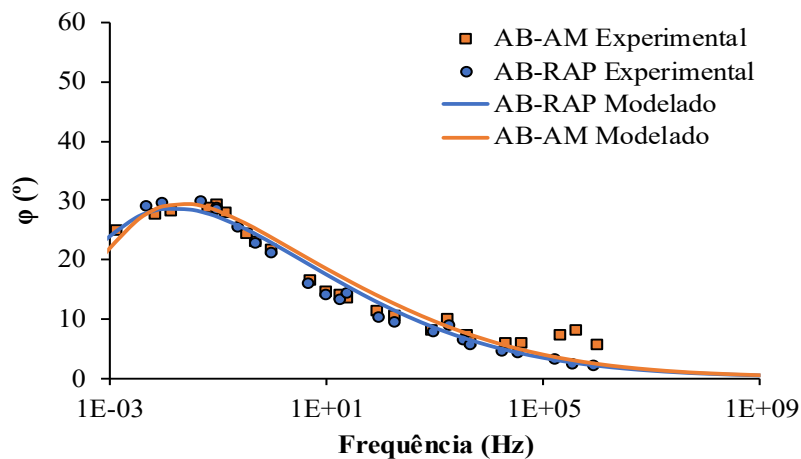


Fonte: Autora (2024)

O ângulo de fase é um parâmetro que relaciona as propriedades elásticas e viscoelásticas das misturas asfálticas. A Figura 45 mostra as curvas mestras dos ângulos de fase das misturas investigadas. Ambas as misturas exibem comportamento viscoelástico semelhante. No entanto,

a mistura de referência mostra um ângulo de fase mais alto em quase todas as frequências, exceto em frequências mais baixas, onde o RAP exibe um ângulo de fase mais alto. Este comportamento do ângulo de fase ratifica os resultados do módulo complexo, indicando maior rigidez para a mistura RAP. Os ângulos de fase das misturas a -10 °C exibiram algumas variações em comparação com os pontos experimentais do modelo 2S2P1D. No entanto, as misturas foram ajustadas ao modelo com base na curva mestra do módulo complexo, desconsiderando o ângulo de fase. De modo geral, os pontos experimentais demonstram um bom ajuste entre os dados observados e o modelo utilizado.

Figura 45 — Curvas mestras do ângulo de fase das misturas

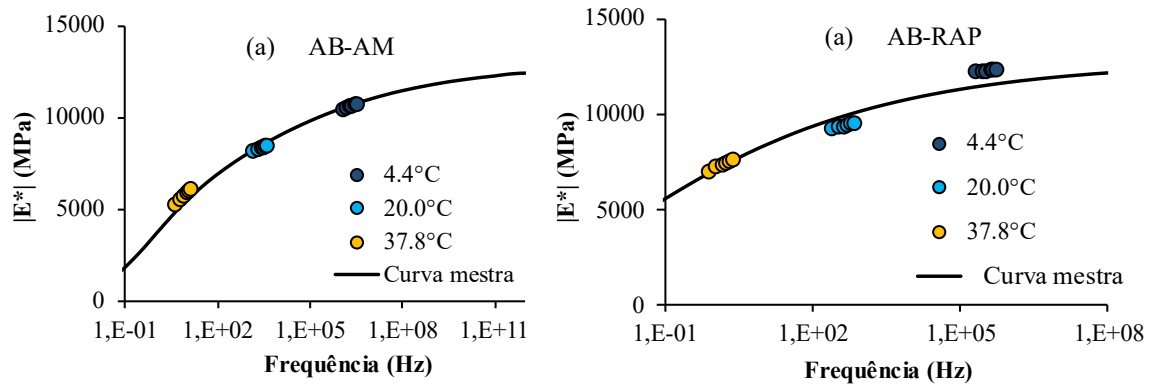


Fonte: Autora (2024)

5.2.3 Ressonância por Impacto

A análise dos resultados do ensaio de ressonância de impacto possibilitou a construção de curvas mestras para as misturas em três temperaturas distintas consideradas durante o ensaio (4,4 °C, 20 °C e 37,8 °C). A Figura 46 (a) apresenta as curvas mestras refletindo a rigidez das misturas. Percebe-se um aumento da rigidez das misturas com o aumento da frequência e diminuição da temperatura, assim como no ensaio de módulo complexo. Tais resultados se assemelham aos valores encontrados para $|E^*|$, demonstrando a precisão de ambos os ensaios para caracterização das propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas porosas.

Figura 46 — Curva mestra: (a) AB-AM e (b) AB-RAP



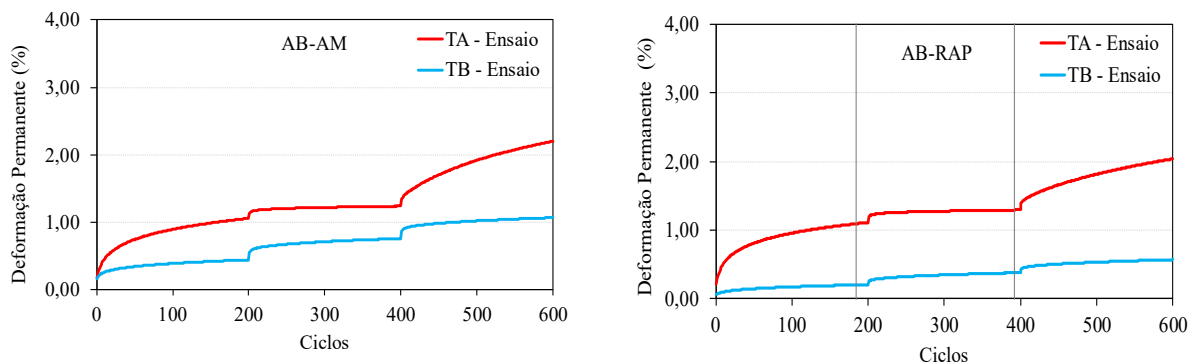
Fonte: Autora (2024)

Em relação à mistura contendo RAP, foi observado aumento de rigidez, mesmo em temperaturas elevadas, conforme mostra a Figura 46 (b). Este fenômeno pode ser atribuído à presença de ligante envelhecido no RAP. Tais achados corroboram com as descobertas de Goh; You (2012), que identificaram maior rigidez para misturas porosas contendo RAP. Por outro lado, os resultados de MR foram menores para mistura reciclada, o que pode estar associado às condições de ensaios (única temperatura e frequência de carregamento), tendo em vista os resultados similares dos demais ensaios.

5.2.4 Deformação Permanente

A deformação permanente das misturas AB-AM e AB-RAP foi avaliada por meio do ensaio triaxial *Stress Sweep Rutting* (SSR), cujos resultados são apresentados na Figura 47, para temperaturas de 47 °C (alta) e 17 °C (baixa).

Figura 47 — Deformação permanente das misturas AB-AM e AB-RAP



Fonte: Autora (2024)

Ambas as misturas demonstraram baixa deformação permanente, mesmo sob temperaturas elevadas, quando comparadas às misturas densas convencionais, que possuem um limite máximo de deformação de 5%.

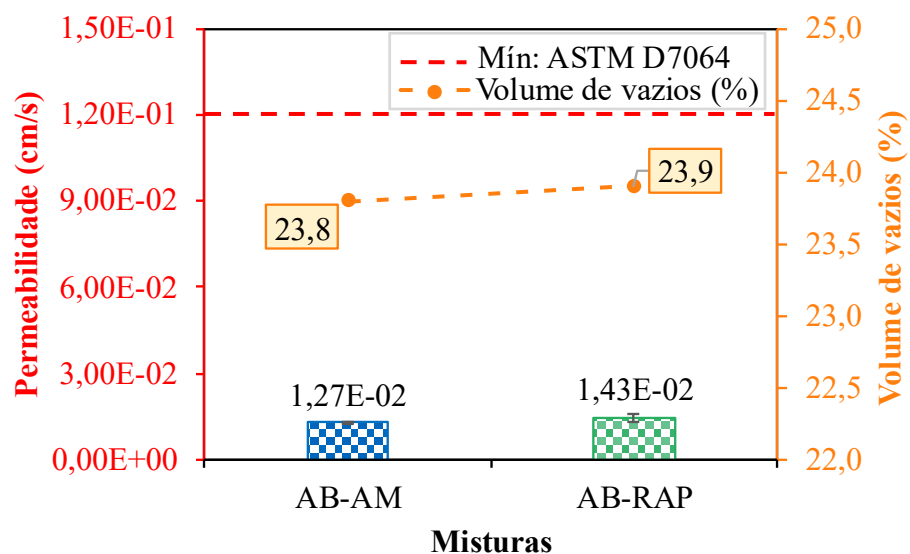
É importante destacar que as misturas do tipo CPA, não possuem padrões específicos de resistência à deformação permanente devido ao alto teor de vazios de ar e à sua espessura relativamente fina (Wu *et al.*, 2020). No entanto, quando comparadas às misturas densas tradicionais, as misturas CPA apresentaram um bom desempenho, especialmente a mistura reciclada AB-RAP ao final dos 600 ciclos.

Esse desempenho superior pode estar associado à presença do RAP, que contribui para a redução da deformação permanente. Frota *et al.* (2022) corroboram essa hipótese ao observarem uma diminuição da deformação permanente ao incorporarem 15% e 30% de RAP em misturas densas, observando diminuições da ordem de 23% e de 35% para os respectivos teores de RAP. Além disso, outro fator contribuinte para esses resultados é ligante asfalto-borracha que melhora a deformação permanente das misturas asfálticas (Fontes *et al.*, 2010).

5.2.5 Permeabilidade das Misturas

Para determinar a funcionalidade de revestimentos drenantes do tipo CPA, foi realizado o ensaio de permeabilidade a carga constante para a verificação do Coeficiente de Permeabilidade (k) das misturas investigadas, Figura 48.

Figura 48 — Permeabilidade das misturas AB-AM e AB-RAP



Fonte: Autora (2023)

Os resultados revelam uma semelhança entre os valores máximos de (k) e os teores de vazios das misturas analisadas, indicando que não há variação significativa para a permeabilidade das misturas. Desta forma, infere-se que todas as misturas apresentaram uma drenagem razoável, conforme Silva (2005), com uma média de $1,3 \times 10^{-2}$ cm/s para AB-AM e $1,4 \times 10^{-2}$ cm/s para AB-RAP. De acordo com Goh; You (2012), coeficientes de permeabilidade superiores a 0,01 cm/s são característicos de revestimentos porosos com boa drenagem. No entanto, é importante ressaltar que nenhuma das misturas atingiu a condutividade hidráulica mínima recomendada pela norma *Open-Graded Friction Course* (OGFC) da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2021), que é de 0,12 cm/s; apesar dos teores de vazios elevados para a AB-AM e AB-RAP 23,88% e 23,82%, respectivamente. Esse fenômeno pode ser atribuído às características de interconexão entre os poros, indicando que, embora, as curvas granulométricas e os teores de vazios sejam semelhantes, o nível de interligação entre os vazios segue uma tendência diferente (De Pascale *et al.*, 2023). Evidência disso é que a mistura (AB-AM) tinha maior teor de vazios e apresentou menor permeabilidade em comparação a (AB-RAP). Essas constatações também foram identificadas por Garcia *et al.* (2020) ao estudar misturas asfálticas porosas, observando-se que nem sempre maiores teores de vazios apresentam maiores coeficientes de permeabilidade.

Guan; Wang; Xiao (2021), ressaltam que as características dos poros, como estão distribuídos e a conectividade destes têm uma influência significativa nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos pavimentos porosos.

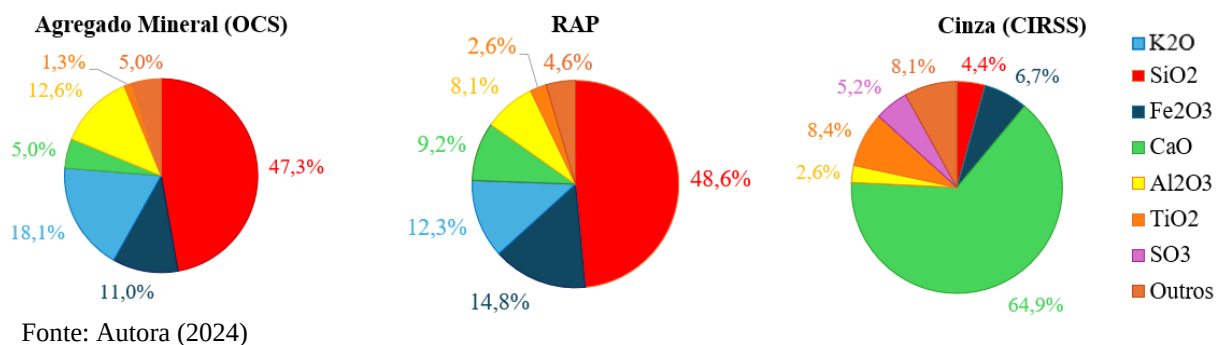
5.3 Avaliação do Comportamento Mecânico e Hidráulico das Misturas Asfálticas Porosas Produzidas com RAP, Cinzas de Resíduo de Serviço de Saúde e Ligante Altamente Modificado – HiMA

Nesta seção, são apresentados os dados de caracterização química dos agregados, obtidos por meio das técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX) e Difração de Raios X (DRX). Além disso, os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral, desgaste de Cântabro, módulo de resiliência, dano por umidade induzida, vazios comunicantes e permeabilidade, são analisados e discutidos estatisticamente.

5.3.1 Caracterização Química dos Agregados

A análise quantitativa da composição química dos agregados, obtida pelo espectrômetro de fluorescência de raios X, é mostrado na Figura 49.

Figura 49 — Composição química dos agregados

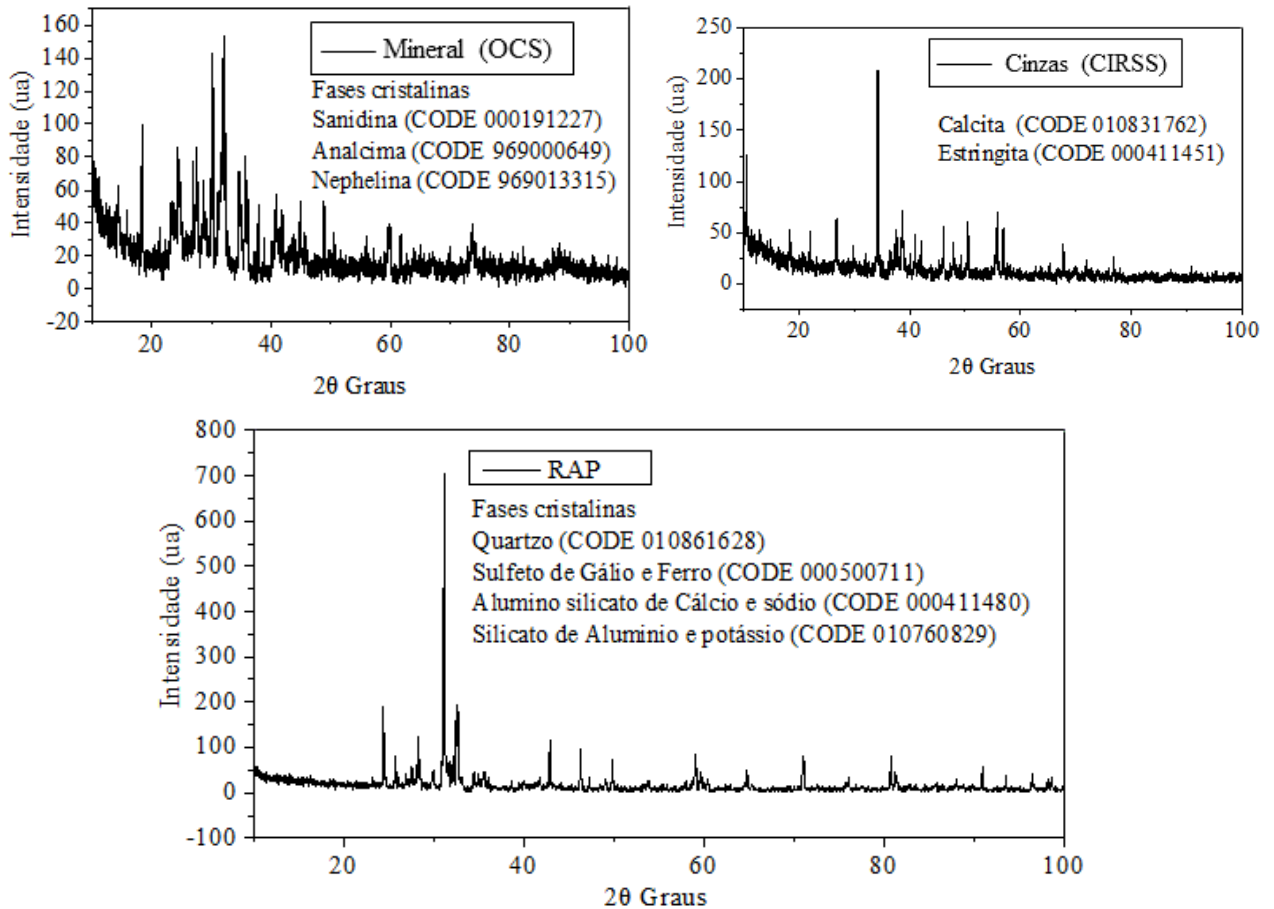


A Figura 49 mostra o predomínio de óxido de cálcio (CaO) para as cinzas de resíduos de serviço de saúde, com uma concentração de 64,9%, indicando sua relevância como componente majoritário. Comparando esses resultados com estudos anteriores (Kaur, Siddique e Rajor, 2019, Moura *et al.*, 2023; Chowdhury *et al.*, 2023), verifica-se uma forte semelhança nos teores de CaO, reportados em 56,7%, 57,4%, 62,39; respectivamente. Quanto às percentagens de SiO₂ e Al₂O₃ foram menores, assim como observado por Anastasiadou *et al.* (2012). No caso do agregado mineral e do RAP, observa-se uma predominância de dióxido de silício (SiO₂), com teores de 47,3% e 48,6%, respectivamente.

Lucas Júnior (2018), ao analisar a composição química de dois tipos de agregados minerais, encontrou resultados similares aos observados neste estudo, para concentrações de dióxido de silício (49,37% e 49,09). Vale ressaltar que a quantidade de 49,37% se refere ao mesmo agregado mineral utilizado nesta pesquisa. Além disso, outros elementos, como K₂O (14,71%), CaO (5,58%), Al₂O₃ (12,64%) e Fe₂O₃ (12,12%), também apresentaram resultados semelhantes aos dessa pesquisa, o que valida as características da composição química da rocha no decorrer das coletas e em diferentes intervalos de tempo.

Quanto à composição mineralógica dos agregados, podem ser observados na Figura 50.

Figura 50 — DRX dos agregados



Fonte: autora (2024)

No agregado mineral analisado, foram identificadas três fases cristalinas principais: sanidina ($((K,Na)AlSi_3O_8)$), analcima ($(Na,K)(AlSi_2O_6) \cdot H_2O$) e nefelina ($((Na,K)AlSiO_4)$). Esses minerais são típicos de rochas fonolíticas, que constituem a origem geológica deste agregado (Teixeira *et al.*, 2015). Essas rochas são caracterizadas por uma elevada concentração de sílica (SiO_2) e potássio (K_2O). Já o agregado RAP apresentou sílica ou quartzo (SiO_2), sulfeto de gálio e ferro, alumínio, silicato de cálcio e sódio e silicato de alumínio e potássio, compostos estes identificados no FRX. Com relação à mineralogia das cinzas, pode-se verificar que a amostra possui estrutura cristalina sem propriedades amorfas, com predomínio de calcita ($CaCO_3$) e estringita ($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$). A presença de calcita é consistente com outros estudos (Kougemitrou *et al.*, 2011; Allawzi *et al.*, 2018). Os compostos determinados por DRX estavam em estreita concordância com os resultados da análise química - FRX, Figura 49 e com estudo anterior (Moura, 2023), que avaliou as cinzas da mesma planta de incineração.

5.3.2 Análise Estatística das Misturas Produzidas com Ligante Altamente Modificado HiMA

Inicialmente, realizou-se uma análise de normalidade dos dados utilizando a ferramenta estatística (GraphPad Prism 9.0). Para selecionar o teste estatístico mais adequado ao tratamento dos dados, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk para avaliar se os dados seguiam uma distribuição normal. Nesse teste, a hipótese nula postulava que os dados apresentavam uma distribuição normal, sendo aceita quando o valor ($P = > 0,05$). A Tabela 12 apresenta os resultados da verificação de normalidade para cada ensaio e mistura.

Tabela 12 — Teste de normalidade Shapiro-Wilk por ensaios e misturas

Continua					
Ensaio	Misturas	N	Shapiro-Wilk		Teste Recomendado
			W	p	
Resistência à Tração por compressão diametral	HI-AM	6	0,932	0,593	ANOVA
	HI-RAP	6	0,919	0,495	
	HI-RAP-C	6	0,972	0,908	
Desgaste Cântabro	HI-AM	6	0,933	0,607	ANOVA
	HI-RAP	6	0,859	0,187	
	HI-RAP-C	6	0,944	0,687	
Módulo de Resiliência	HI-AM	6	0,884	0,287	Kruskal-Wallis
	HI-RAP	6	0,771	<0,032	
	HI-RAP-C	6	0,778	0,037	
Dano por umidade induzida	HI-AM	6	0,959	0,812	Kruskal-Wallis
	HI-RAP	6	0,772	<0,032	
	HI-RAP-C	6	0,974	0,916	
Vazios comunicantes	HI-AM	6	0,867	0,220	ANOVA
	HI-RAP	6	0,979	0,949	
	HI-RAP-C	6	0,949	0,091	

Tabela 12 — Teste de normalidade Shapiro-Wilk por ensaios e misturas

					Conclusão
Ensaio	Mistura	N	Shapiro-Wilk		Teste Recomendado
			W	p	
Permeabilidade	HI-AM	6	0,887	0,302	ANOVA
	HI-RAP	6	0,892	0,331	
	HI-RAP-C	6	0,943	0,682	

Fonte: Autora (2024)

Observou-se que a mistura HI-RAP não apresentou distribuição normal (valor - $P < 0,05$) para o ensaio de módulo de resiliência e dano por umidade induzida. Por esse motivo, optou-se pelo uso do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, apropriado para a análise de dados sem distribuição normal. No teste ANOVA, a hipótese nula foi rejeitada para valores de $P < 0,05$, indicando que as misturas não apresentaram homogeneidade nos resultados, e que, portanto, suas propriedades mecânicas e funcionais foram influenciadas pela presença dos resíduos.

5.3.2.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para o teste ANOVA, a resistência à tração por compressão diametral foi significativamente influenciada pelo uso do RAP e das cinzas. Essa conclusão é observada pelo valor de P inferior a 0,05 (Tabela 13), resultando na rejeição da hipótese nula.

Tabela 13 — Teste ANOVA para resistência à tração por compressão diametral

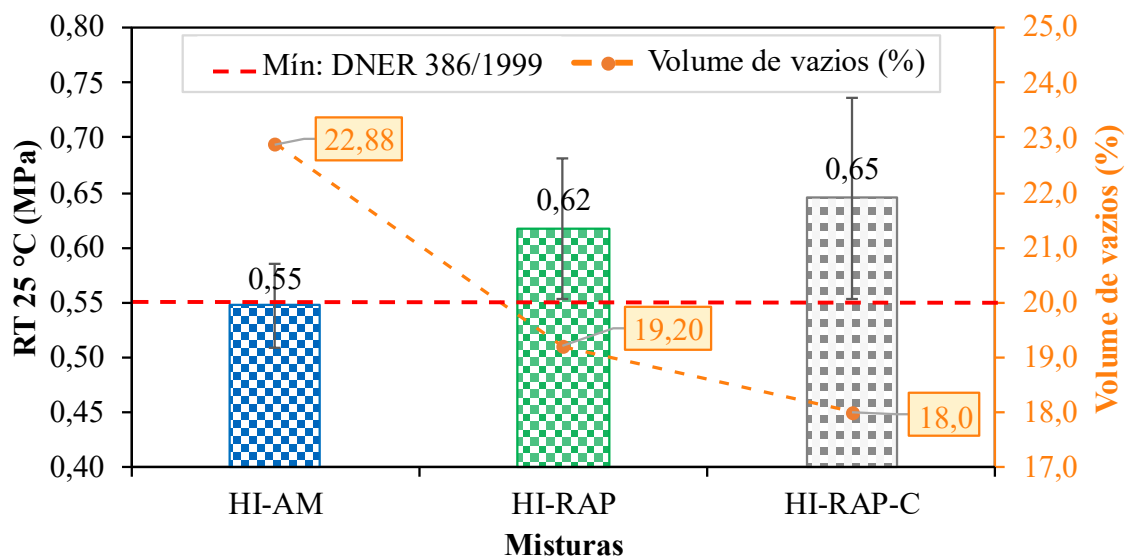
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Entre grupos	0,04488	2	0,02244	4,774	0,0249
Dentro dos grupos	0,07050	15	0,004700		
Total	0,1154	17			

Fonte: Autora (2024)

Para verificar estatisticamente o comportamento entre dois grupos de misturas, foi aplicado um teste de múltiplas comparações (Tukey). Ao comparar as misturas HI-AM e HI-RAP, não foi observada uma influência significativa para esse parâmetro. Da mesma forma, ao

comparar as misturas HI-RAP e HI-RAP-C, não se observou diferença significativa. No entanto, ao analisar as misturas HI-AM com HI-RAP-C, obteve-se um valor de $P = 0,02$, para o teste Tukey inferior a 0,05, indicando que a incorporação de RAP e cinzas influenciaram significativamente as propriedades mecânicas de resistência da mistura HI-RAP-C. Apesar da diferença entre a mistura de referência (HI-AM) e a mistura reciclada (HI-RAP) não ter sido significativa, houve um aumento relativo (13%) no resultado de RT, conforme a Figura 51.

Figura 51 — RT das misturas com HiMA



Fonte: Autora (2024)

Frigio *et al.* (2013), ao investigarem o uso de 15% de RAP proveniente de CPAs antigas em novas misturas de CPA com ligante modificado por polímero SBS, utilizando 4,5% de teor de ligante, registraram valores de RT de 0,59 MPa. A mistura de referência, produzida com 5,0% de ligante, apresentou um RT de 0,51 MPa. Esses resultados sugerem que a resistência das misturas não foi significativamente afetada pelo teor de ligante, mas sim pela presença de RAP. Os autores reforçam esse achado ao concluírem que a presença dos agregados RAP pode aderir mais facilmente ao ligante virgem.

Hammes (2023), ao investigar uma mistura asfáltica porosa com 21,5% de vazios utilizando ligante altamente modificado (HiMA) nos teores de 5,0% e 5,1%, obteve valores de resistência à tração (RT) de 0,63 e 0,64 MPa, respectivamente. Esses resultados são superiores aos observados para a mistura HI-AM neste estudo, o que pode ser atribuído ao teor de ligante utilizado ou às características dos agregados minerais empregados.

De Pascale *et al.* (2023), utilizaram 30% de RAP, 20% de escória *Electric Arc Furnace* (EAF) e 0,3% de fibra de celulose em uma mistura asfáltica porosa, empregando 3,6% de

ligante modificado por polímero SBS. Essa composição resultou em um valor de resistência à tração de 0,74 MPa, enquanto a mistura de referência, sem o uso de resíduos, apresentou um RT de 0,59 MPa. Esses resultados indicam que a incorporação de resíduos não apenas preservou, mas também melhorou a resistência da mistura, demonstrando melhores resistências para as misturas recicladas.

5.3.2.2 Desgaste Cântabro

O teste ANOVA indicou, para ambas as misturas, que a presença dos resíduos não influenciou de forma significativa suas propriedades de desagregação. Essa conclusão é sustentada pelo valor de $P > 0,05$, conforme apresentado na Tabela 14, sugerindo que o uso dos resíduos não comprometeu a resistência ao desgaste dessas misturas.

Os valores obtidos indicam que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, uma vez que o valor P foi superior a 0,05, reforçando a aceitação da hipótese nula para esse parâmetro.

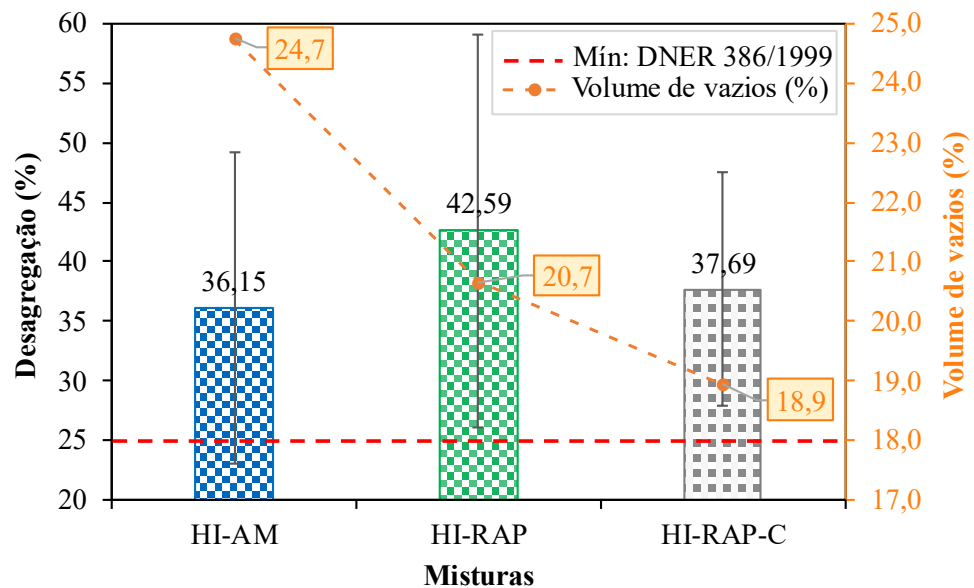
Tabela 14 — Teste ANOVA para desgaste cântabro

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Entre grupos	135,7	2	67,86	0,379	0,6906
Dentro dos grupos	2682	15	178,8		
Total	2817	17			

Fonte: Autora (2024)

Embora a análise estatística mostre que as misturas não foram significativamente impactadas pelo uso do RAP e das cinzas, é importante destacar que ambas as misturas não atenderam ao requisito de perda de massa estabelecido pela norma brasileira da CPA-DNER 386/1999, que permite um desgaste máximo de 25%, Figura 52.

Figura 52 — Perda de massa pelo desgaste cântabro



Fonte: Autora (2024)

Este parâmetro simula a desagregação de misturas asfálticas porosas, sendo fortemente influenciado pelo volume de vazios, pela natureza do ligante e pelo teor de ligante presente na mistura. Estudos indicam que o uso de ligantes como o HiMA, empregado neste estudo, pode melhorar a resistência à desagregação de misturas porosas. Rivera *et al.* (2023) avaliaram misturas porosas com agregados de granito e calcário, incorporando 0,3% de fibra de celulose e teores de ligante HiMA de 5,9% e 6,5%, respectivamente. As misturas foram submetidas a envelhecimento de curto prazo (135°C por 2 horas) e longo prazo (5 dias a 95 °C e 10 dias a 95 °C), resultando em perdas de massa inferiores a 20% no teste de desgaste cântabro, evidenciando o efeito positivo do ligante HiMA na durabilidade dessas misturas.

De forma semelhante, Hammes (2023) investigou misturas porosas com teores de ligante HiMA de 4,5% a 6,0%, e não observou perdas de massa superiores ao limite de 20% estabelecido pela ASTM 7064. As reduções mais expressivas para esse estudo ocorreram entre os teores de 4,5% e 5,0% de ligante, com perdas de massa de 13,1% e 8,8%, respectivamente, indicando uma melhoria na resistência à desagregação para o teor de 5,0% de ligante.

Brum *et al.* (2018) investigaram misturas porosas com 15% e 25% de RAP, utilizando 6,2% de ligante HiMA, e observaram perdas de massa inferiores a 15%. Embora tenha sido observada uma diferença significativa influenciada tanto pelo tipo de ligante quanto pela quantidade de RAP utilizada, as misturas sem RAP apresentaram o melhor desempenho. Apesar dessa constatação, os autores reforçam que é possível produzir CPA com RAP, mantendo-se dentro dos limites aceitáveis para a resistência à desagregação. No entanto, os resultados deste

estudo diferem dos reportados nas literaturas mencionadas, o que pode ser atribuído ao teor de ligante utilizado (4,5%), volume de vazios e ao contato grão a grão (intertravamento) dos agregados, características que influenciam no parâmetro de desagregação das misturas porosas.

5.3.2.3 Módulo de Resiliência

Os resultados do ensaio de módulo de resiliência foram analisados utilizando o teste de Kruskal-Wallis (Tabela 15), devido à ausência de normalidade nos dados. Esse teste foi aplicado para identificar se há diferenças estatisticamente significativas entre as variâncias de cada mistura.

Dessa forma, foi possível avaliar as medianas de cada mistura e o valor de $P < 0,05$, representando a diferença significativa pelo uso do RAP e da cinza. Assim, a hipótese nula das medianas homogêneas entre as misturas foi rejeitada.

Tabela 15 — Teste Kruskal-Wallis

Fonte de variação	HI-AM	HI-RAP	HI-RAP-C	
Mediana	3298	5420	4551	-
Soma dos ranks	22	78	71	-
Contagem	6	6	6	18
r^2/n	80,66667	1014	840,1667	1934,833
H-estatística	-	-	-	10,88889
H-ajustado	-	-	-	10,88889
gl	-	-	-	2
Valor-p	-	-	-	<0,0010
Alfa	-	-	-	0,05

Fonte: Autora (2024)

Para identificar o nível de significância entre dois grupos independentes, foi realizado o teste de Dunn's para comparações. Os resultados indicaram que, estatisticamente, as misturas recicladas (HI-RAP e HI-RAP-C) diferiram significativamente da mistura de referência (HI-AM) para o módulo de resiliência, com valores de $P < 0,05$ (Tabela 16). Esse resultado mostra que o RAP influenciou a rigidez das misturas recicladas.

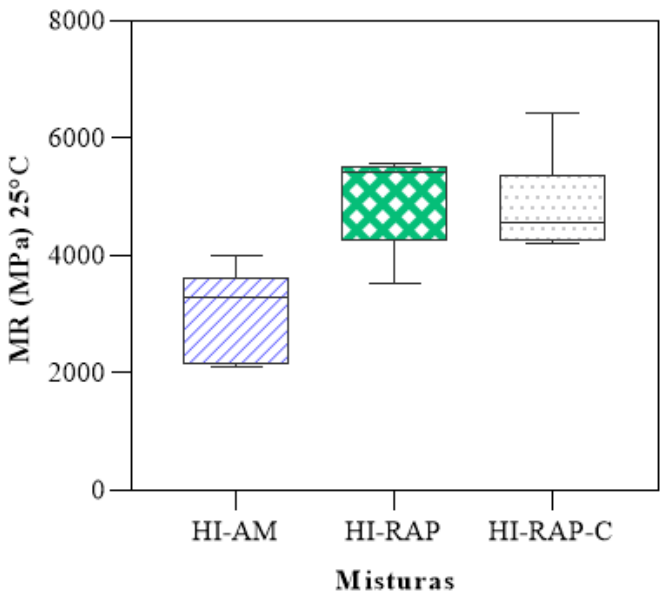
Tabela 16 — Teste de Dunn's

Grupo 1	Grupo 2	P-valor
HI-AM	HI-RAP	0,0074
HI-AM	HI-RAP-C	0,0242
HI-RAP	HI-RAP-C	0,9999

Fonte: Autora (2024)

Em contrapartida, ao comparar a mistura HI-RAP com a HI-RAP-C, não se observou diferença significativa nos resultados, Figura 53.

Figura 53 — MR das misturas com HiMA



Fonte: Autora (2024)

Os resultados de módulo de resiliência obtidos neste estudo para a mistura de referência (HI-AM) são comparáveis aos encontrados por Hammes; Thives (2023), que reportaram valor de MR de 2.764 MPa para uma mistura asfáltica porosa com 5,1% de ligante altamente modificado (HiMA). Esse desempenho foi atribuído ao tipo de ligante. De forma similar, Schneider (2016) observou valores de MR da ordem de 3.416 MPa em misturas com 4,5% de ligante modificado por polímero, resultado aproximado ao encontrado para a mistura HI-AM de 3.298 MPa.

Em relação às misturas recicladas, é comum a literatura reportar aumento de rigidez para misturas contendo RAP. Esse comportamento é atribuído à presença do ligante oxidado oriundo do RAP, o que contribui para uma menor deformação sob carregamento.

5.3.2.4 Dano por Umidade Induzida

Os resultados do ensaio de dano por umidade induzida foram analisados com o teste de Kruskal-Wallis devido à ausência de normalidade nos dados. Esse teste permitiu a aceitação da hipótese nula, tendo em vista um valor de $P > 0,05$, mostrando, portanto, não diferença significativa entre as misturas, Tabela 17.

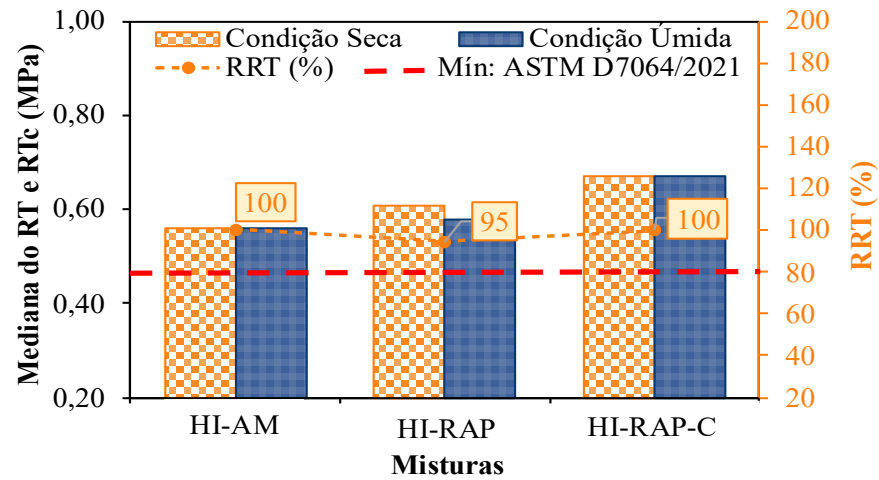
Tabela 17 — Teste Kruskal-Wallis

Fonte de variação	HI-AM	HI-RAP	HI-RAP-C	
Mediana	0,56	0,58	0,67	-
Soma dos ranks	42	60	69	-
Contagem	6	6	6	18
r^2/n	294	600	793,5	1687,5
H-estatística	-	-	-	2,210526
H-ajustado	-	-	-	2,210526
Gl	-	-	-	2
Valor-p	-	-	-	>0,3542
Alfa (α)	-	-	-	0,05

Fonte: Autora (2024)

É possível observar que o efeito da umidade não prejudicou o desempenho das misturas, uma vez que a relação de resistência à tração retida foi a 80%, conforme exigido pela norma ASTM D7064/2021 (Figura 54).

Figura 54 — Medianas do RT e RRT



Fonte: Autora (2024)

Esses resultados estão em conformidade com as observações de Brum *et al.* (2018), que projetaram uma mistura asfáltica porosa com 15% e 25% de RAP, utilizando 6,2% de ligante asfáltico HiMA, alcançando resultados satisfatórios para as misturas recicladas. Em contraste, Hammes; Thives (2023) obtiveram resultados satisfatórios apenas ao utilizar um teor de asfalto de 5,1% do ligante HiMA.

É importante destacar que as misturas recicladas apresentaram desempenho satisfatório em termos de resistência à tração retida, o que pode ser atribuído à menor quantidade de vazios observada nas amostras: 22,6% para HI-AM, 19,5% para HI-RAP e 18,0% para HI-RAP-C. Esse fator influencia positivamente a coesão e estabilidade das misturas. Além disso, o elevado teor de óxidos de cálcio (64,9%) nas cinzas (CIRSS), juntamente com o óxido de cálcio do RAP (9,2%), pode ter contribuído para melhorar esse parâmetro, uma vez que a literatura reporta melhor força adesiva entre ligante e agregado para misturas asfálticas com maior concentração de cálcio (Luo *et al.*, 2017). Ademais, a presença de óxidos de ferro e cálcio nos agregados pode ter favorecido a adesão das misturas, uma vez que a combinação desses elementos é um indicativo de melhoramento de adesividade (Lucas Júnior, 2018).

5.3.2.5 Vazios Comunicantes e Permeabilidade

A análise dos vazios comunicantes é um parâmetro importante para verificar a eficiência da mistura em termos de permeabilidade, pois quantifica a proporção de vazios que estão conectados e permitem a passagem da água. Desta forma, a análise de variância (ANOVA) foi realizada para determinar se há diferenças estatisticamente significativas entre as três misturas

testadas em relação aos vazios comunicantes e à permeabilidade, Tabela 18 e Tabela 19, respectivamente.

Tabela 18 — Teste ANOVA para vazios comunicantes

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Entre grupos	64,01	2	32,01	22,11	0,0001
Dentro dos grupos	21,71	15	1,447		
Total	85,73	17			

Fonte: Autora (2024)

Tabela 19 — Teste ANOVA para permeabilidade

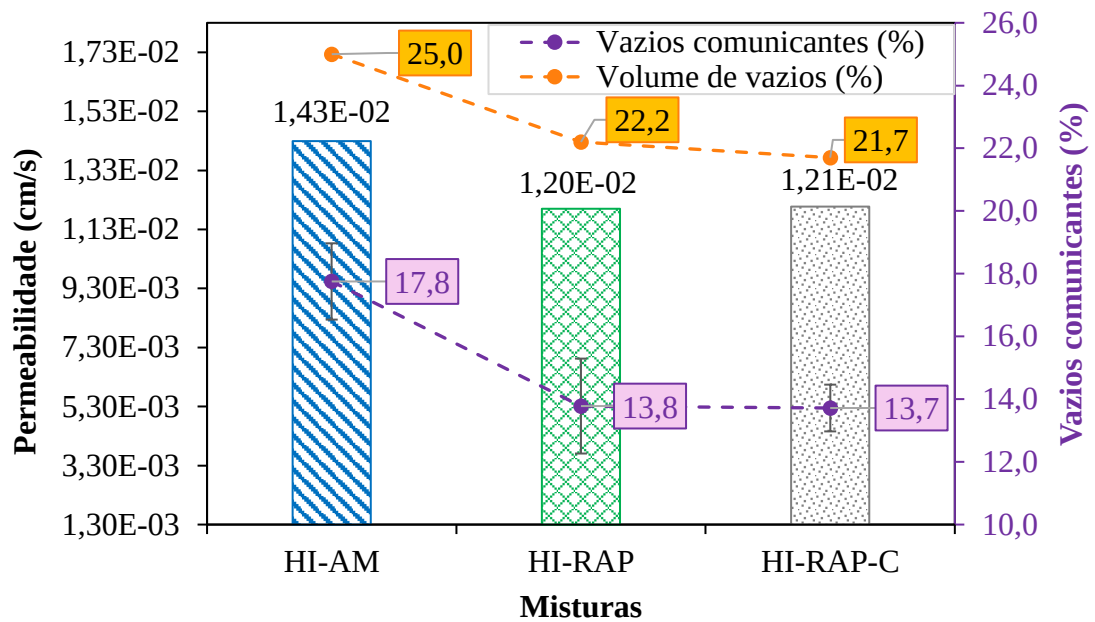
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Entre grupos	2,249E-05	2	1,124E-05	14,84	0,0003
Dentro dos grupos	1,137E-05	15	7,579E-07		
Total	3,386E-05	17			

Fonte: Autora (2024)

A ANOVA indicou diferenças entre as misturas, com valor de P inferior a 0,05 para os vazios comunicantes e o coeficiente de permeabilidade das misturas. Uma análise do teste Tukey revelou que as misturas recicladas (HI-RAP e HI-RAP-C) apresentaram vazios comunicantes e permeabilidade menores (Valor-P<0,05) em relação à mistura de referência (HI-AM).

Na Figura 55, é possível observar os coeficientes de permeabilidade e vazios comunicantes obtidos para cada mistura.

Figura 55 — Vazios comunicantes e permeabilidade



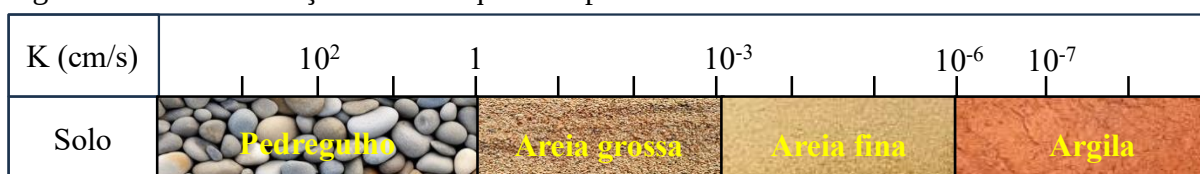
Fonte: Autora (2024)

Apesar dos elevados valores de vazios comunicantes, nenhuma das misturas atingiram o coeficiente (k) mínimo de 0,12 cm/s, conforme estabelecido pela norma ASTM D7064/2021 para misturas asfálticas porosas. Esse resultado pode ser atribuído à distribuição interna dos vazios comunicantes, que se distribuem de forma desigual nas direções vertical e horizontal. Tais constatações foram investigadas por Chen *et al.* (2018), ao estudarem a distribuição interna de vazios conectados de misturas asfálticas porosas utilizando tomografia computadorizada de raio X. Esse estudo constatou que os vazios comunicantes (interconectados) na direção horizontal são de 1,2 a 2,1 vezes maiores do que os vazios conectados na vertical. Além disso, os vazios conectados na horizontal tendem a ser mais uniformes em termos de curvatura e tamanho, afirmam os referidos autores. Essas observações são coerentes com o processo de compactação, uma vez que a compressão aplicada verticalmente durante a compactação promove um maior adensamento nessa direção. A menor extensão e continuidade dos vazios na direção vertical é o principal fator que pode ter contribuído para a redução da condutividade hidráulica vertical, encontrado nessa pesquisa. Além disso, tem-se observado uma variação dos valores de coeficiente de permeabilidade encontrados na literatura, tanto para aqueles obtidos em cada estudo, como também os valores mínimos exigidos que foram tomados como referência (Queiroz, 2016).

No Brasil, por exemplo, não há norma que defina um valor mínimo de k para essas misturas. No entanto, a norma NBR 16.416 (2015) de concreto permeável exige coeficientes

mínimos de permeabilidade superiores a 10^{-3} cm/s para pavimentos permeáveis recém-construídos. Portanto, as misturas estudadas demonstraram conformidade com esse requisito, atendendo aos critérios de classificação para pavimentos porosos. Na ausência de normas específicas para esse tipo de mistura, é comum encontrar na literatura o uso de classificações de permeabilidade adotadas para solos. De acordo com a classificação proposta por Lambe; Whitman (1974), os valores de k obtidos enquadraram-se na categoria de permeabilidade média, com valores de k na ordem de 10^{-2} cm/s, comparáveis à permeabilidade de areias médias ou grossa, Figura 56.

Figura 56 — Classificação de solos quanto a permeabilidade



Fonte: Adaptado de Mello e Teixeira (1967)

Esses resultados estão alinhados aos encontrados por Ferreira (2013), que avaliou a permeabilidade de uma CPA produzida com 4,0% de ligante modificado e vazios de 20% e 23%, obtendo coeficientes de permeabilidade da ordem de gradeza de 10^{-2} cm/s. Essas semelhanças reforçam a classificação e o desempenho hidráulico das misturas analisadas neste estudo.

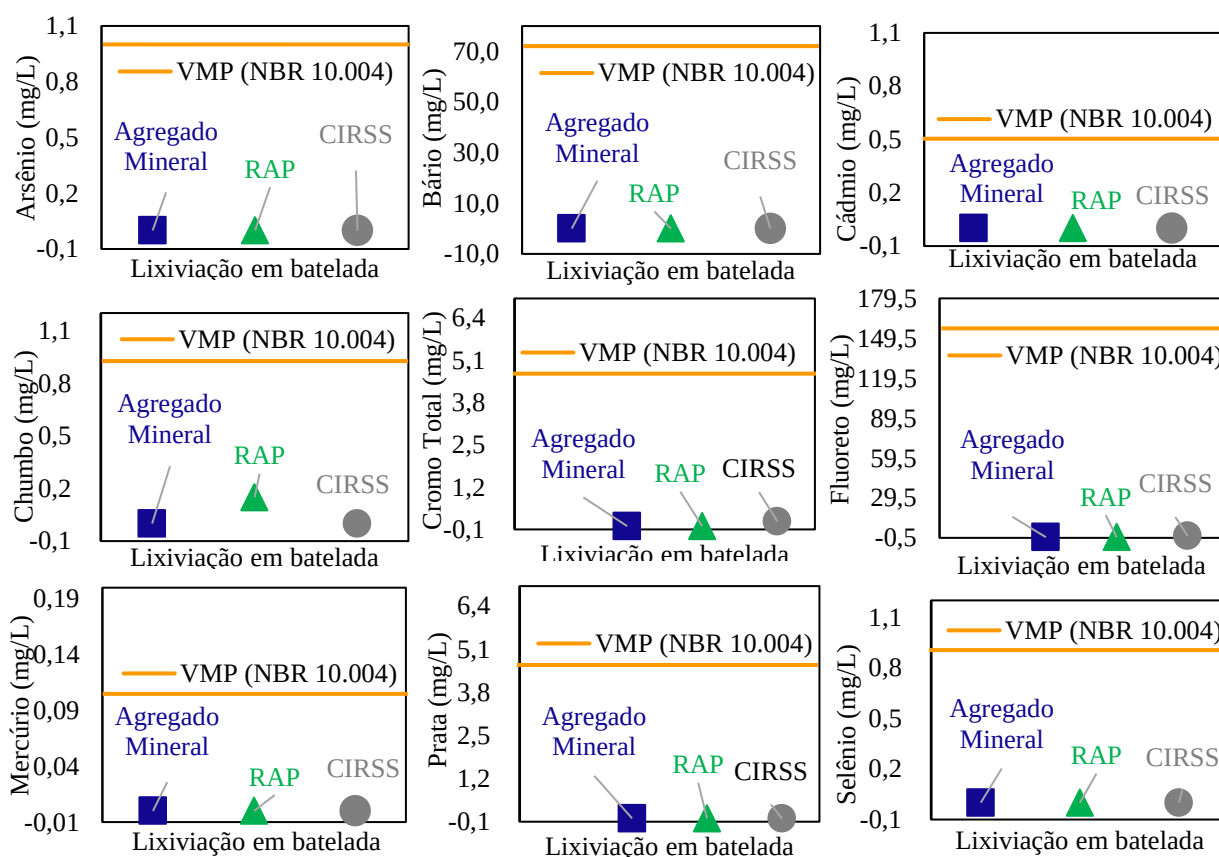
5.4 Avaliação Ambiental da Caracterização Química do Lixiviado e Solubilizado

A partir dos ensaios de lixiviação e solubilização foi possível avaliar o potencial de dissolução e mobilização de contaminantes (metais pesados) dos resíduos utilizados. Os resíduos foram analisados seguindo a NBR 10.005 (ABNT, 2004) e a NBR 10.006 (ABNT, 2004), e classificados segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004). Esses testes são fundamentais para determinar a quantidade de substâncias que podem se dissolver em contato com a água e, assim, identificar possíveis riscos ambientais.

5.4.1 Ensaio de Lixiviação e Solubilização

Para classificar um resíduo quanto à sua periculosidade, é necessário avaliar a mobilidade de substâncias que podem ser lixiviadas quando o material entra em contato com a água. Nesse sentido, uma amostra de cada material (Agregado Mineral - AM, RAP e cinzas) foi enviada a um laboratório externo para realizar as análises de lixiviação e solubilização. Os resultados encontrados para os parâmetros analisados da lixiviação podem ser observados na Figura 57 a seguir.

Figura 57 — Parâmetros inorgânicos da lixiviação em batelada



Fonte: Autora (2024)

Os resultados da análise dos parâmetros inorgânicos dos três tipos de agregados utilizados nessa pesquisa indicaram que nenhum dos materiais lixiviou ou apresentou concentrações superiores aos limites máximos estabelecidos pelo anexo F da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004). Esses achados corroboram com as constatações de Legret *et al.* (2005), que relataram concentrações de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo, zinco, mercúrio e molibdênio em lixiviados de RAP, geralmente abaixo dos limites de detecção, com exceção do zinco (115 mg/L). De forma similar, Yang *et al.* (2020) identificaram concentrações inferiores

aos padrões de água potável da EPA para a maioria dos 32 elementos analisados, exceto o chumbo (15 µg/L).

Brantley; Townsend (1999) também observaram baixas concentrações de metais em lixiviados de RAP, com exceção do chumbo em amostras de RAP mais antigas, evidenciando que exposições mais prolongadas ao tráfego de veículos e suas emissões podem acarretar maiores contaminações.

Zhao *et al.* (2010) observaram que metais pesados, como As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni e Pb, presentes em cinzas de resíduos médicos, também estavam dentro dos limites da EPA, indicando baixo risco associado à sua reciclagem.

Embora os resíduos, RAP e cinzas, não tenham ultrapassado os limites estabelecidos pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) para o teste de lixiviação, foram detectadas concentrações de Chumbo (0,15 mg/L) na amostra de RAP, Cromo Total (0,15 mg/L) e Fluoreto (1,0 mg/L) na amostra de cinza. Esses elementos estão listados no Anexo C da NBR 10.004 (ABNT, 2004) como substâncias que conferem toxicidade aos resíduos sólidos. No entanto, com base nos critérios de classificação da NBR 10.004 (ABNT, 2004), esses resíduos são classificados como Classe II - Não Perigosos, pois suas concentrações não excedem os limites máximos permitidos, não representando riscos significativos à saúde humana ou ao meio ambiente.

Para o ensaio de solubilização, vários compostos solubilizaram, conforme se pode observar na Tabela 20.

Tabela 20 — Parâmetros de solubilização das amostras

Continuação					
Parâmetro	AM	RAP	CINZAS	Unid	VMP
2,4-D	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	0,03
2,4,5-T	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	2 x 10 ⁻³
2,4,5-TP	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	0,03
Aldrin + dieldrin	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	3 x 10 ⁻⁵
Alumínio	3,91	<LQ	73,58	mg/L	0,02
Arsênio	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	0,01
Bário	<LQ	0,80	<LQ	mg/L	0,70
Cádmio	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	0,005
Chumbo	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	0,01

Tabela 20 — Parâmetros de solubilização das amostras

Parâmetro					Conclusão
	AM	RAP	CINZAS	Unid	VMP
Cianeto Total	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	0,07
Clordano	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	2 x 10 ⁻⁴
Cloreto	18,90	7,60	3214,00	mg/L	250,00
Cobre	<LQ	<LQ	1,02	mg/L	2,00
Cromo	<LQ	<LQ	0,32	mg/L	0,05
DDT + DDD + DDE	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	2 x 10 ⁻³
Endrin	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	6 x 10 ⁻⁴
Fenol	0,09	0,11	8,14	mg/L	0,01
Ferro	0,54	<LQ	0,16	mg/L	0,30
Fluoreto	0,45	<LQ	6,80	mg/L	1,50
Heptacloro Epóxido	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	3 x 10 ⁻⁵
Hexaclorobenzeno	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	1 x 10 ⁻³
Lindano	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	2 x 10 ⁻³
Manganês	0,10	<LQ	0,07	mg/L	0,10
Mercúrio	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	0,001
Metoxicloro	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	0,02
Nitrato	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	10,00
Prata	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	0,05
Selênio	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	0,01
Sódio	40,00	10,00	320,00	mg/L	200,00
Sulfato	<LQ	11,70	477,6	mg/L	250,00
Surfactantes aniônicos	0,32	0,54	24,10	mg/L	0,50
Toxafeno	<LQ	<LQ	<LQ	mg/L	5 x 10 ⁻³
Zinco	0,12	<LQ	0,41	mg/L	5,00

Legenda: AM- Agregado Mineral, LQ – Limites de Quantificação, VMP – Valor Máximo Permitido

Fonte: Autora (2024)

É possível identificar para o Agregado Mineral (AM) uma concentração de 3,91 mg/L de alumínio, 0,54 mg/L de ferro e 0,09 de fenol, valores que excedem os limites estabelecidos pelo anexo G da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004). A presença de alumínio e ferro no agregado

pode ser atribuída à sua composição mineralógica, conforme evidenciado pelos resultados de Fluorescência de Raios X (FRX), que indicaram a presença de 12,14% de óxido de alumínio (Al_2O_3) e 11,53% de óxidos de ferro (Fe_2O_3). Os resultados obtidos neste estudo estão em conformidade com os de Lucas Júnior (2018), que estudou a composição química do mesmo tipo de agregado, proveniente da mesma fonte, e encontrou valores semelhantes: 12,64% de óxido de alumínio (Al_2O_3) e 12,12% de óxidos de ferro (Fe_2O_3). A consistência entre os dois estudos reforça a representatividade dos dados e sugere que a composição mineral pode ter influenciado na solubilização do alumínio e ferro para a amostra AM.

Para o agregado RAP, observou-se a solubilização de bário (0,80 mg/L), fenol (0,11 mg/L) e Surfactantes (0,54 mg/L) acima dos níveis máximos de quantificação recomendados pela NBR (ABNT 10.004, 2004).

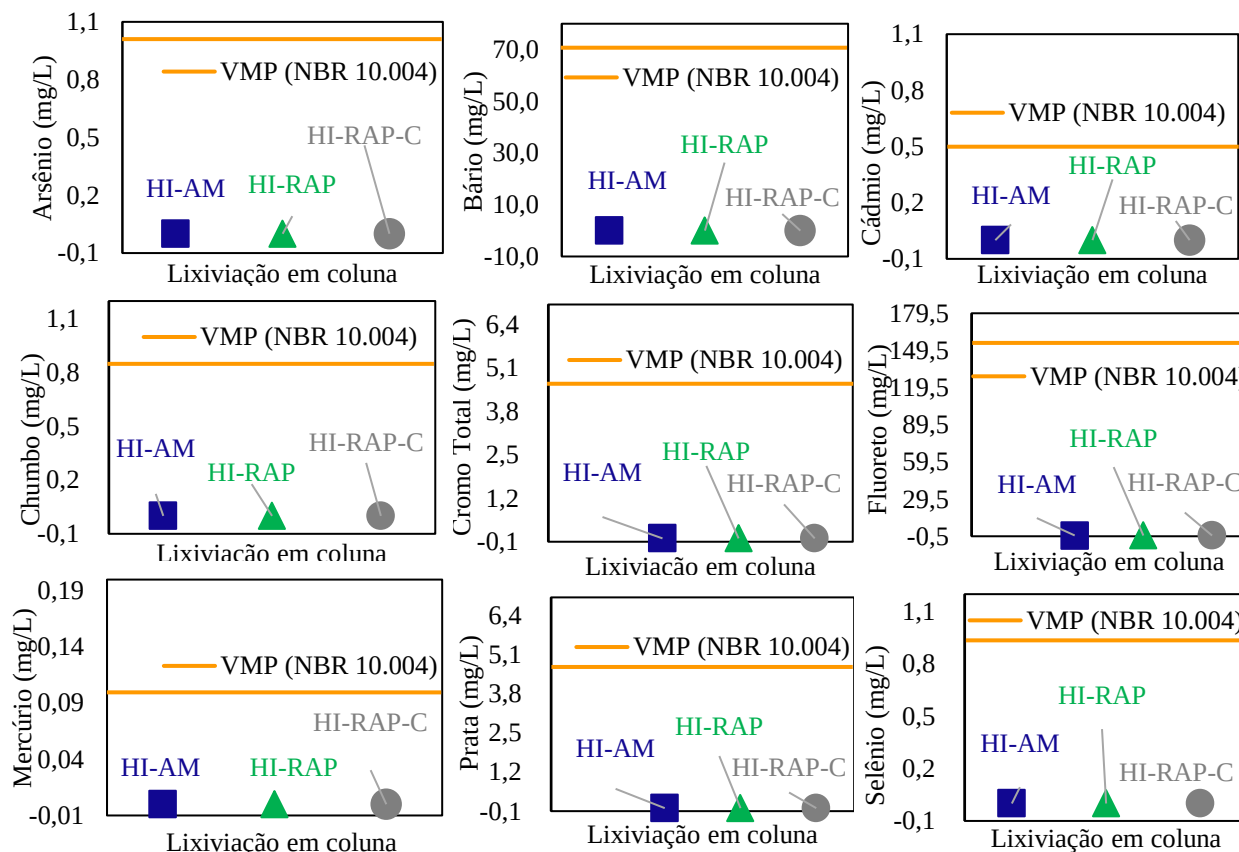
A análise das cinzas (CIRSS) revelou a solubilização de oito elementos principais acima dos limites máximos recomendados pelo anexo G da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004): alumínio (73,58 mg/L), cloreto (3214,00 mg/L), cromo (0,32 mg/L), fenol (8,14 mg/L), fluoreto (6,80 mg/L), sódio (320 mg/L), sulfato (477,60 mg/L) e surfactantes (24,10 mg/L). A presença desses compostos solubilizados está diretamente relacionada à composição química dos resíduos incinerados, que, por sua vez, é influenciada pela heterogeneidade dos materiais provenientes dos resíduos de serviços de saúde. Resíduos médicos como seringas, agulhas, ampolas, medicamentos, cápsulas e materiais descartáveis, em geral, são frequentemente compostos por uma variedade de elementos químicos que, durante o processo de incineração, sofrem reações térmicas e químicas, resultando na formação de cinzas com uma composição complexa. Além disso, a lavagem ácida e alcalina dos gases e os produtos utilizados acabam em contato com as cinzas, agregando a elas outras características químicas.

Os níveis de solubilidade de cloro nas cinzas foram significativamente elevados, em conformidade com os resultados de Tsakalou *et al.* (2018), que também identificaram altas concentrações (1.180 mg/kg) desse elemento ao analisar a lixiviação de cinzas de resíduos médicos.

Com base nos resultados obtidos, observou-se que as amostras analisadas para o ensaio de solubilização apresentaram uma variedade de elementos solubilizados, incluindo o agregado mineral. Esses materiais, portanto, são classificados como resíduos não perigosos de Classe II A – não inertes, o que significa que, ao entrarem em contato com a água, podem apresentar propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Já a lixiviação em coluna realizada nas misturas contendo o ligante altamente modificado (HiMA), mostrou

que os compostos metálicos avaliados não lixiviaram acima dos limites de quantificação estabelecidos pela NBR 10.004/2004, conforme pode ser observado na Figura 58.

Figura 58 — Parâmetros inorgânicos da lixiviação em coluna



Fonte: Autora (2025)

Os resultados obtidos da lixiviação em coluna demonstraram que as misturas avaliadas não apresentam características de toxicidade, indicando a ausência de risco de contaminação das águas subterrâneas. Esses achados evidenciam a viabilidade ambiental dos materiais nas misturas. No entanto, é importante considerar que a imobilidade dos elementos metálicos está sujeita à alteração ao longo do tempo, em função de processos de intemperismo, exposição a diferentes produtos químicos e efeitos de envelhecimento (Ferrazzo *et al.*, 2023). Diante dessa possibilidade, a realização de monitoramentos em campo deve ser encorajada para avaliar a influência das condições ambientais sobre a liberação de contaminantes ao longo da vida útil do pavimento.

6 CONCLUSÕES

De modo geral, os resultados obtidos nesta pesquisa demonstraram a viabilidade técnica, funcional e ambiental da produção de CPA incorporando 10% RAP, 1% de cinzas (CIRSS) e 4,5% de ligantes modificados (AB) e polímero SBS (HiMA). As misturas formuladas apresentaram bons desempenhos mecânicos, funcionais e ambientais. Apesar das limitações observadas quanto à resistência à desagregação para ambas as misturas produzidas com ligantes modificados, e da não conformidade com alguns critérios mecânicos nas misturas com AB, alguns parâmetros destacaram o potencial técnico das soluções propostas, apontando para um comportamento promissor dessas misturas, especialmente no que se refere a deformação permanente, capacidade estrutural (misturas AB) e a resistência aos danos por umidade das misturas produzidas com ligante altamente modificado (HiMA), além de considerar a importância do reaproveitamento de resíduos sólidos e materiais reciclados. Portanto, os achados desta pesquisa contribuem para o avanço no desenvolvimento de alternativas inovadoras para pavimentos porosos, derivando-se as seguintes conclusões que respondem aos objetivos específicos estabelecidos neste trabalho:

6.1 Avaliação das Propriedades Mecânicas e Hidráulicas das Misturas Produzidas com Asfalto-Borracha

Do ponto de vista mecânico, as misturas contendo asfalto-borracha e RAP apresentaram desempenho satisfatório em termos de resistência à deformação permanente, comportamento atribuído à ação conjunta do ligante modificado (AB) e da presença do ligante envelhecidos no RAP. Observou-se desempenho superior, especialmente nos ciclos finais de carregamento sob temperatura elevada. No entanto, apesar desse resultado positivo, as misturas não atenderam integralmente aos critérios de projeto estabelecidos para CPA, apresentando uma baixa resistência à tração por compressão diametral, maior suscetibilidade aos danos causados pela umidade e tendência à desagregação.

Sob a perspectiva funcional, as misturas apresentaram uma permeabilidade média, com coeficientes hidráulicos da ordem de 10^{-2} cm/s, compatíveis com a classificação de solos granulares (areias médias e grossas). Vale ressaltar que ambas as misturas não atenderam a permeabilidade mínima (0,12 cm/s) da norma internacional ASTM D7064. Esses resultados podem estar associados às características microestruturais das misturas como, a distribuição interna dos vazios comunicantes. Além disso, estudos têm mostrado variação nos coeficientes

hidráulicos observados em misturas asfálticas porosas, o que reforça uma possível reavaliação dos critérios normativos vigentes, à luz de evidências experimentais mais recentes.

No que concerne aos benefícios ambientais, a produção de uma mistura asfáltica porosa utilizando RAP e asfalto-borracha pode contribuir para a economia de recursos naturais com a redução de agregados virgens e ligante asfáltico.

6.2 Avaliação da Adequação das Abordagens para Determinar as Propriedades de Rigidez das Misturas Produzidas com Asfalto-Borracha

Em relação aos aspectos estruturais e ao comportamento viscoelástico das misturas, os resultados foram consistentes com os achados na literatura existente. Notou-se um ligeiro aumento de rigidez nas misturas contendo RAP, conforme demonstrado pelos ensaios de módulo complexo e ressonância por impacto.

Outro fator identificado refere-se aos ensaios $|E^*|$ e RI que apresentaram comportamentos análogos quanto à rigidez das misturas investigadas, indicando a possibilidade de aplicação de uma metodologia alternativa baseada na mecânica vibracional para a caracterização das propriedades viscoelásticas de misturas asfálticas porosas.

6.3 Avaliação do Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas Asfálticas Porosas Produzidas com RAP, Cinzas de Resíduos de Serviço de Saúde e Ligante Altamente Modificado – HiMA

Com relação à resistência à tração por compressão diametral, ambas as misturas apresentaram uma resistência adequada ($\geq 0,55$ MPa). Estatisticamente, a mistura contendo cinzas (HI-RAP-C) apresentou maior resistência quando comparada às outras misturas. Em contrapartida, os resultados de desgaste (desagregação) não atingiram o limite máximo de perda (25%) pela norma da CPA, comportamento observado inclusive na mistura de referência. Esse resultado pode ser atribuído ao projeto de mistura adotado, particularmente ao teor de ligante utilizado (4,5%), à interação entre os agregados (contato grão a grão) e ao volume de vazios, fatores que influenciam diretamente a coesão e a durabilidade das misturas asfálticas porosas.

Quanto ao dano por umidade, ambas as misturas apresentaram bons desempenhos, satisfazendo os critérios de projeto (RRT 80%), especialmente as misturas recicladas. Esse comportamento pode ser associado à composição química das cinzas e do RAP, particularmente

à presença de óxido de cálcio e óxido de ferro, que contribuíram para melhorar a adesividade, estabilidade e resistência das misturas frente à ação da umidade.

No que se refere à permeabilidade, a análise do teste de Tukey indicou que as misturas recicladas apresentaram coeficientes hidráulicos inferiores em comparação à mistura de referência, embora essa diferença não tenha sido significativa, pois todas as misturas foram classificadas com uma capacidade de drenagem considerada boa, com coeficientes da ordem de 10^{-2} cm/s, atendendo a permeabilidade recomendada para pavimentos de concreto permeável superior a 10^{-3} cm/s. Cabe ressaltar que assim como as misturas produzidas com AB, as composições formuladas com HiMA também não atenderam às exigências da norma ASTM D7064 de valores de $k \geq 0,12$ cm/s. A redução observada na condutividade hidráulica pode estar relacionada à distribuição interna dos vazios comunicantes, que tendem a se concentrar predominantemente na direção horizontal, comprometendo a permeabilidade vertical, um comportamento também já observado em estudos anteriores.

6.4 Caracterização Química dos Efluentes após Ensaio de Lixiviação e Solubilização e Classificação conforme a Norma ABNT 10.004/2004

Do ponto de vista ambiental, as análises de lixiviação em batelada e em coluna demonstraram que nenhum dos metais avaliados ultrapassou os limites máximos permitidos pela NBR 10.004, classificando os resíduos como Classe II – Não Perigosos. No entanto, a análise de solubilização mostrou concentrações acima dos valores permitidos para ambos os agregados utilizados, especialmente para o material de enchimento (cinzas- CIRSS), resultado atribuído à origem e composição química dos materiais. Assim, os resíduos foram classificados como Classe II A – Não Inertes.

Com base nas análises ambientais conduzidas neste estudo, a classificação dos materiais avaliados não inviabiliza o seu uso em misturas asfálticas porosas, uma vez que os ensaios de lixiviação em batelada e em coluna não indicaram níveis elevados de periculosidade. No entanto, considerando a solubilidade observada de diversos parâmetros, especialmente das cinzas (CIRSS) em água, e o fato da mistura compor uma camada drenante, torna-se relevante a realização de um monitoramento ao longo da vida útil do pavimento, a fim de avaliar de forma mais representativa o potencial de liberação de contaminantes a longo prazo.

Diante das constatações observadas nessa pesquisa, propõem-se como sugestões de trabalhos futuros os seguintes itens a serem investigados:

- a) Avaliar diferentes teores de RAP utilizando granulometria fracionada para otimizar as propriedades volumétricas das misturas;
- b) Aplicar outros teores de ligantes HiMA, visando aprimorar a resistência à desagregação e aumentar a durabilidade do pavimento;
- c) Determinar a permeabilidade na direção horizontal para avaliar o comportamento hidráulico da mistura e sua capacidade de drenagem lateral;
- d) Analisar a estrutura interna das amostras por meio de tomografia computadorizada de Raios-X, objetivando mapear a distribuição e a conectividade dos vazios no interior da mistura para relacionar às propriedades mecânicas e funcionais das mesmas;
- e) Verificar a evolução da lixiviação ao longo do tempo;
- f) Realizar uma análise do custo e ciclo de vida para verificar o impacto positivo ou negativo do uso dos resíduos.

REFERÊNCIAS

AASHTO TP 134-19: **Stress Sweep Rutting (SSR) Test Using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)**, 2019.

AFNOR (Association Française de Normalisation). NF P98-254-2: **Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés, partie 2**. Association Française de Normalisation, 1993.

ASTM D7064: **Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design**. USA. 2021.

ASTM D4874: **Standard test method for leaching solid material in a column apparatus**. Am. Soc. Test. Mater. 1–8 (1995) <https://doi.org/10.1520/D4874-95R14>.

ABNT – Associação Brasileira de Normas. ABNT NBR 10.004. **Resíduos Sólidos - Classificação**. 2004.

_____. NBR 10.005. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. 2004.

_____. NBR 10.006. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. 2004.

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland). Projeto Técnico: Pavimento permeável. Programa Soluções para Cidades, 2013.

_____. ABCP. Panorama do Coprocessamento 2023 (Ano base 2022). São Paulo, 2023. 20p.

ABDO, A.M. A. Utilizing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials in New Pavements - A Review. **Int. J. of Thermal & Environmental Engineering**, v. 12, n. 1, 2016.

AMELI, A.; BABAGOLI, R.; AGHAPOUR, M. Laboratory evaluation of the effect of reclaimed asphalt pavement on rutting performance of rubberized asphalt mixtures. **Petroleum Science and Technology**, v. 34, n 5, p. 449-453, 2016.

ALECRIM, C. M. C. **Avaliação da utilização de camada porosa de atrito em vias do meio urbano**. 2021. 185 f.: il. color. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.

ALVAREZ, A.E. *et al.* **Synthesis of current practice on the design, construction, and maintenance of porous friction courses**. Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office P. O. Box 5080 Austin, Texas 78763-5080, 2006.

ALVES, A. **Comportamento mecânico, funcional e ambiental de misturas asfálticas porosas**. 2019. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, 2019.

ALVAREZ, A.E. *et al.* Determination of Volumetric Properties for Permeable Friction Course Mixtures. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 37, nº 1, 2009.

ALVAREZ, A. E.; MARTIN, A. E.; ESTAKHRI, C. A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures. In **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1159–1166, 2011.

ALLAWZI, M.; AL-HARAHSEH, M.; ALLABOUN, H. Characterization and Leachability Propensity of Bottom Ash from Medical Waste Incineration. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 229, n. 153, 2018.

AKYILDIZ, A.; KOSE, E. T.; YILDIZ, A. Compressive strength and heavy metal leaching of concrete containing medical waste incineration ash. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 326–332, 2017.

ANASTASIADOU, K. *et al.* Solidification/stabilization of fly and bottom ash from medical waste incineration facility. **Journal of Hazardous Materials**, v. 207–208, p. 165–170, 2012.

ANUSHA, T. M.; JAGADEESH, H. S.; SUNIL, S. Experimental investigation of Open Graded mixes using Reclaimed Asphalt Pavement. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 561, p. 012061, 2019.

ANTUNES, L.N.; THIVES, L.P.; GHISI, E. Potential for Potable Water Savings in Buildings by Using Stormwater Harvested from Porous Pavements. **Water**, v. 8, p. 110, 2016.

ARÁMBULA-MERCADO, E. *et al.* Understanding Mechanisms of Raveling to Extend Open Graded Friction Course (OGFC) Service Life. Texas A&M Transportation Institute, Final Report No. BDR74-977-04, 2016.

AZADGOLEH, M.A. *et al.* Characterization of contaminant leaching from asphalt pavements: A critical review of measurement methods, reclaimed asphalt pavement, porous asphalt, and waste-modified asphalt mixtures. **Water Research**, v. 219, p.118584, 2022.

AZNI, I. *et al.* Stabilization and utilization of hospital waste as road and asphalt aggregate. **Mater Cycles Waste Manag**, v. 7, p. 33–37, 2005.

BAMIGBOYE, G. O. *et al.* Waste materials in highway applications: An overview on generation and utilization implications on sustainability. In **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124581, 2021.

BASTOS, J. B. S. *et al.* Composição física e química das cinzas de fundo de um incinerador de resíduos sólidos perigosos. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 31., 2021. **Anais...** Curitiba, 2021.

BERTOLLO, S.A.M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha de pneus**. 2002. 252 f. Tese (Doutorado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2002.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros.** 2ªed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2022.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos asfálticos**, São Paulo, v. 3, 2007.

BRANTLEY, A. S.; TOWNSEND, T. G. Leaching of Pollutants from Reclaimed Asphalt Pavement. **Environmental engineering science**, v. 16, n. 2, 1999.

ABOHAMER, H. *et al.* Effects of Asphalt Binder Additives and Industrial Fillers on the Mechanical and Functional Properties of Open Graded Friction Course. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, p. 1-15, 2023.

BRAGA, S.M. **Estudo do comportamento de concretos com diferentes teores de resíduos de fresado de pavimentos asfálticos.** 2024. 129 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) - Instituto Federal do Ceará, Tecnologia em Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2024.

BRUM, M. J. *et al.* Effect of binder modification and recycled asphalt pavement on the performance of permeable friction course. **Transportation Research Record**, v. 2672, p. 119–129, 2018.

BEZERRA, A. K.L. *et al.* Desenvolvimento de ensaio de ressonância por impacto para determinação de rigidez de diferentes materiais. **Transportes**, v. 30, p. 2237-1346, 2022.

BS EN 13108-7: **Bituminous mixtures. Material specifications. Porous Asphalt.** England. 2006.

CARO, S.; SANCHEZ, L.M.; KIM, Y, R. Computational evaluation of long-term ravelling susceptibility of Permeable Friction Courses (PFC). **Construction and Building Materials**, v. 291, p. 123306, 2021.

CARVALHO, J. L. V. *et al.* Caracterização físico-química de cinzas de resíduos perigosos para uso na construção civil. **Revista Matéria**, v. 27, n. 4, 2022.

CARRET, J. C. *et al.* Comparison of the 3-dim linear viscoelastic behavior of asphalt mixes determined with tension-compression and dynamic tests. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 529–536, 2018.

CAVALCANTI, E. R. N. *et al.* Utilização do compactador giratório superpave (CGS) na dosagem de misturas asfálticas do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA). 26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), 2024.

CENTOFONTE, R. *et al.* Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Revista Materia**, v. 23, n. 3, 2018.

CLIATT, B.; PLATI, C.; LOIZOS, A. Investigating Resilient Modulus Interdependence to Moisture for Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates. **Procedia Engineering**, v. 143, p. 244 - 251, 2016.

CHAVES, A.C. B. **Análise da interação entre ligantes de mistura asfáltica reciclada com RAP, com e sem uso de agentes rejuvenescedores**. 2023. 118 f.: il. color. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2023.

CHEN, J. S.; YANG, C. H. Porous asphalt concrete: A review of design, construction, performance and maintenance. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 13, p. 601- 612, 2020.

CHEN, J. *et al.* Directional distribution of three-dimensional connected voids in porous asphalt mixture and flow simulation of permeability anisotropy. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 12, p. 1550–1562, 2018.

CHEN, J. *et al.* Analysis of Pore Characteristics and Flow Pattern of Open-Graded Asphalt Mixture in Different Directions. **Journal of materials in civil engineering**, v. 32, n. 9, 2020.

CHEN, J.; TANG, T.; ZHANG, Y. Laboratory characterization of directional dependence of permeability for porous asphalt mixtures. **Materials and Structures**, v. 50, n. 5, 2017.

CHEN, J.; WANG, H.; ZHU, H. Investigation of permeability of open graded asphalt mixture considering effects of anisotropy and two-dimensional flow. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 318–325, 2017.

CHEN, J. *et al.* Permeability Loss of Open-Graded Friction Course Mixtures due to Deformation-Related and Particle-Related Clogging: Understanding from a Laboratory Investigation. **J. Mater. Civ. Eng.**, 27(11), 04015023, 2015.

CHOWDHURY, R. *et al.* Medical Waste Incineration Fly Ash as a Mineral Filler in Dense Bituminous Course in Flexible Pavements. **Materials**, v. 16, p. 5612, 2023.

CORREIA, R. R. S. **Comportamento de pisos intertravados de concreto elaborados com frações de cinzas de resíduos sólidos perigosos**. 2022. 56 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Fortaleza, 2022.

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

CUNHA, C. B. *et al.* Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.

DUMKE, M. P. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha**. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 135/2018 - ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro - RJ, 2018.

____ DNIT 136/2018 – ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** Rio de Janeiro - RJ, 2018.

____ DNIT – 180/2018 – ME. **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio.** Rio de Janeiro - RJ, 2018.

____ DNIT – 411/2021. **Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio.** Brasília - DF, 2021.

____ DNIT – 412/2019 – ME: **Pavimentação – Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio.** Brasília - DF, 2019.

____ DNIT – 413/2021 – ME. **Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio.** Brasília - DF, 2021.

____ DNIT – 416/2019 – ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio.** Rio de Janeiro – RJ, 2019.

____ DNIT 424/2020 – ME. **Pavimentação – Agregado – Determinação do Índice de forma com crivos – Método de ensaio.** Brasília - DF, 2020.

____ DNIT 427/2020 – ME. **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio.** Brasília - DF, 2020.

____ DNIT 428/2022 – ME. **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio.** Brasília - DF, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-
DNER 035/1998 – ME. **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”.** Rio de Janeiro - RJ, 1998.

DNER 085/1994 – ME. **Material finamente pulverizado-determinação da massa específica real.** Rio de Janeiro - RJ, 1994.

____ DNER – 383/1999 – ME. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântaro.** Rio de Janeiro - RJ, 1999.

____ DNER – 386/1999 – ES. **Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito.** Rio de Janeiro - RJ, 1999.

EAPA. **Asphalt in figures 2021.** European Asphalt Pavement Association, 2021.

ELKHATEEB, O. *et al.* Three-Dimensional Permeability Study of Open Graded Friction Course (OGFC) Based on CFD Simulation. **Civil and Environmental Engineering**, v. 18, n. 1, p. 148–163, 2022.

DEBRAH, J. K.; DINIS, M. A. P. Chemical characteristics of bottom ash from biomedical waste incinerators in Ghana. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, p. 568, 2023.

DE PASCALE, B. *et al.* Mechanical performance and environmental assessment of porous asphalt mixtures produced with EAF steel slags and RAP aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 400, p. 132889, 2023.

DRESCH, F. **Comportamento de misturas asfálticas tipo Camada Porosa de Atrito (CPA)**. 2016. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

DING, X. *et al.* Laboratory investigation of the recycled asphalt concrete with stable crumb rubber asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 552–557, 2019.

EL BAKKALI, M. *et al.* Characterization of bottom ash from two hospital waste incinerators in Rabat, Morocco. **Waste Management & Research**, v 31, p. 1228–1236, 2013.

EL-AMAIREHA, N. A. A.; AL-ZOUBI, H.; AL-KHASHMAN, O. A. Hospital waste incinerator ash: characteristics, treatment techniques, and applications (A review). **Journal of Water and Health**, v. 21, n. 11, p. 1687-1702, 2023.

ECK, B.J. *et al.* Water Quality of Drainage from Permeable Friction Course. **Journal of Environmental Engineering**, v. 138, p. 174-181, 2012.

ESKANDARSEFAT, S. *et al.* Recycling asphalt pavement and tire rubber: A full laboratory and field scale study. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 283–294, 2018.

FARINA, A. *et al.* Leaching behavior of metals from asphalt mixtures modified with crumb rubber from scrap tires. **Waste Management**, v.179, p. 44–54, 2024.

FERREIRA, W.L.G. **Avaliação da permeabilidade de misturas asfálticas com diferentes granulometrias**. 2013. 68 f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, 2013.

FERRAZZO, S. T. *et al.* Metal encapsulation of waste foundry sand stabilized with alkali-activated binder: Batch and column leaching tests. **Journal of Environmental Management**, v. 348, p. 119287, 2023.

FONTES, L. P. T. L. *et al.* Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1193–1200, 2010.

FRIGIO, F. *et al.* Improved durability of recycled porous asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 755–763, 2013.

FRIGIO, F. *et al.* Use of Reclaimed Asphalt in Porous Asphalt Mixtures: Laboratory and Field Evaluations. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, 2015.

FRIGIO, F. *et al.* Aging effects on recycled WMA porous asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v.123, p. 712-71, 2016.

FRIGIO, F.; CANESTRARI, F. Characterisation of warm recycled porous asphalt mixtures prepared with different WMA additives. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 22, n 1, p. 82–98, 2018.

FROTA, T. M. **Considerações mecânicas e ambientais sobre misturas asfálticas recicladas a quente para o suporte à tomada de decisão**. 2023. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2023.

FROTA, T.M. *et al.* Aderência dos impactos ambientais da produção de misturas asfálticas recicladas a quente às metas dos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU. **IV SUSTENTARE e VII WIPIS: Workshop Internacional sobre Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos**. 978-85-5722-652-4, 2022.

FROTA, T.M. *et al.* Comparação da evolução da deformação permanente de misturas Asfálticas recicladas em relação a uma mistura tradicional. Congresso 19º Rio de Transportes, 2022.

GARCIA, E. S. H. **Análise da redução da permeabilidade de misturas asfálticas drenantes em função da redução do volume de vazios**. 2017. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

GARCIA, E. S. H. *et al.* Analysis of permeability reduction in drainage asphalt mixtures due to decrease in void volume. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119292, 2020.

GIDARAKOS, E. *et al.* Characterization and hazard evaluation of bottom ash produced from incinerated hospital waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 172, p. 935–942, 2009.

GOH, S.W.; YOU, Z. Mechanical Properties of Porous Asphalt Pavement Materials with Warm Mix Asphalt and RAP. **Journal of transportation engineering**, v. 138, p. 90-97, 2012.

GOMES, O.J.F. **Desenvolvimento de metodologias para caracterização de materiais asfálticos**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal do Ceará, Campus Morada Nova, 2021.

GASPAR, M.S. **Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna**. 2019. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2019.

GU, F. *et al.* Evaluation of the benefits of open graded friction course: Case study. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 131–143, 2018.

GUAN, X.; WANG, J.; XIAO, F. Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city. **Journal of Cleaner Production**, v. 303, p. 127022, 2021.

GURJÃO, N.O. **Análise do desempenho da camada porosa de atrito por meio dos ensaios da mancha de areia e permeabilidade.** 2020. 85 f. Monografia (Graduação) – Centro Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2020.

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

HAMMES, G.; THIVES, L.P.; GHISI, E. Application of stormwater collected from porous asphalt pavements for non-potable uses in buildings. **Journal of Environmental Management**, v. 222, p. 338-347, 2018.

HAMMES, G.; THIVES, L.P. Porous Asphalt Mixture with Improved Fatigue Resistance and Stormwater Pollutant Reduction in Urban Road Pavement. **Water**, v. 15, p. 2962, 2023.

HAMZAH, M. O.; HARDIMAN. Characterization of the clogging behaviour of double layer porous asphalt. **Journal of the Eastern Asia Society for transportation studies/Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 6, p. 968–980, 2005.

HERNÁNDEZ-SAENZ, M.A. *et al.* Mix design, performance and maintenance of Permeable Friction Courses (PFC) in the United States: State of the Art. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 358–367, 2016.

HERNANDO, D. *et al.* Study of the field hydraulic conductivity of thin open-graded friction courses. **Construction and Building Materials**, v. 299, p. 124236, 2021.

HICKS, R. G. Moisture Damage in Asphalt Concrete; National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175, **Transportation Research Board**: Washington, 1991.

HOLLERAN, I. *et al.* Effect of biorejuvenator on recycled porous asphalt mixes. **Road materials and pavement design**, v. 24, n 2, p. 340–366, 2023.

HUSSEIN, S. KH.; SALIH, H. H. Recycled asphalt pavement impact on Marshall properties of hot mixed asphalt. **Open Engineering**, v. 12, p. 1030-1037, 2019.

HU, W.; SHU, X.; HUANG, B. Sustainability innovations in transportation infrastructure: An overview of the special volume on sustainable road paving. In **Journal of Cleaner Production** v. 235, p. 369-377, 2019.

HU, J. *et al.* High-viscosity modified asphalt mixtures for double-layer porous asphalt pavement: Design optimization and evaluation metrics. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121893, 2021.

HU, J. *et al.* Three-dimensional discrete element simulation on degradation of air voids in double-layer porous asphalt pavement under traffic loading. **Construction and Building Materials**, v. 313, p. 125570, 2021.

HUANG, C. M. *et al.* Physical and environmental properties of asphalt mixtures

containing incinerator bottom ash. **Journal of Hazardous Materials**, v. 137, p. 1742-1749, 2006.

IBÁÑEZ, R. *et al.* Characterisation and management of incinerator wastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 79, p. 215-227, 2000.

JABER, S. K. *et al.* The use of bottom ash and fly ash from medical incinerators as road construction material. **U.P.B. Sci. Bull., Series D**, v. 84, p. 2, 2022.

JIAO, Y. J. *et al.* Influence of crumb rubber and taupack super on performances of SBS modified porous asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, p. S196-S216, 2019.

JAYAKARAN, A.D. *et al.* Remediation of Stormwater Pollutants by Porous Asphalt Pavement. **Water**, v. 11, p. 520, 2019.

KAUR, H.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, A. Influence of incinerated biomedical waste ash on the properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 428-441, 2019.

KOUGEMITROU, I. *et al.* Characterisation and management of ash produced in the hospital waste incinerator of Athens, Greece. **Journal of Hazardous Materials**, v. 187, p. 421-432, 2011.

KOŁODZIEJ, V. M. **Estudo das propriedades acústicas, drenantes e mecânicas de revestimentos asfálticos porosos**. 2016.184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

KNOP, A. **Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos**. 2003. 80 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

KUMAR, A. R. *et al.* Leaching characteristics and hazard evaluation of bottom ash generated from common biomedical waste incinerators. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 56, p. 1069-1079, 2021.

_____. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010.

LEGRET, M. *et al.* Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement. **Water Research**, v. 39, p. 3675-3685, 2005.

LI, J. *et al.* Characteristics of MSWI fly ash and its resource transformation by road engineering: Mechanical and environmental considerations. **Construction and Building Materials**, v. 323, p. 126575, 2022.

LIU, G.; VEN, M.V.; BERGH, W. V. D. Recycling of Porous Asphalt Mixtures with PMB to Increase Sustainable Use of Non-renewable Materials. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 6 n.5, p. 472-478, 2013.

LI, L. *et al.* Comparative analysis of viscoelastic properties of open graded friction course under dynamic and static loads. **Polymers**, v. 13, p. 1250, 2021.

LIN, C. *et al.* Laboratory evaluation on performance of porous polyurethane mixtures and OGFC. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 436-442, 2018.

LIN, A.M. *et al.* Emerging polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) and trace metal leachability from reclaimed asphalt pavement (RAP). **Chemosphere**, v. 333. p. 138937, 2023.

LINO, T. L. L. **A incineração de resíduos sólidos perigosos em Fortaleza: um estudo de caracterização da composição das cinzas**. 2022. 59.f. Monografia (Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental) – Instituto Federal do Ceará, Tecnologia em Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2022.

LOPES, A. F. D. *et al.* Geração e utilização do RAP no Brasil. **Revista Eninfra**, v. 3, n. 3, p. 201–217, 2024.

LUO, H. L. *et al.* Use of incinerator bottom ash in open-graded asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v.149, p. 497–506, 2017.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O. **Influência da adesividade agregado-ligante no trincamento por fadiga de misturas asfálticas**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2018.

LUCAS JÚNIOR, J. L. O. *et al.* Evaluating the effect of amine-based anti-stripping agent on the fatigue life of asphalt pavements. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 8, p. 2785–2795, 15 jan. 2021.

MANRIQUE-SANCHEZ, L. CARO, S. Numerical assessment of the structural contribution of porous friction courses (PFC). **Construction and Building Materials**, v. 225, p.754-764, 2019.

MARIYAPPAN, R.; PALAMMAL, J. S.; BALU, S. Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications - a review. In **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, p. 45587–45606, 2023.

MAIA, R., S. *et al.* Utilização de revestimentos drenantes do tipo camada porosa de atrito (CPA) e de asfalto modificado por polímero (AMP) como soluções para o meio urbano em Fortaleza-Ce. Conference: 33º ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Balneário Camboriú - SC, 2019.

MATALKAH, F. Recycling of hazardous medical waste ash toward cleaner utilization in concrete mixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 400, p. 136736, 2023.

MENDONÇA, F. L. **Caracterização das cinzas de incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde para inserção em ciclos produtivos e ambientais**. 2018. 27 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

MO, L.T. *et al.* Investigation into material optimization and development for improved travelling resistant porous asphalt concrete. **Materials and Design**, v. 31, p. 3194–3206, 2010.

MONTEIRO, A. M.; SILVA, J. P.; REZENDE, L. Estudo laboratorial de misturas asfálticas recicladas à quente com diferentes teores de asfalto fresado. **Transportes**, v. 3, n 1, p. 2771, 2023.

MOURA, M. C. C. *et al.* Influência da granulometria das cinzas de incineração de resíduos sólidos perigosos (RSP) na filtração de lixiviado de aterro sanitário. **Holos**, v. 5, p. 16328, 2023.

MOURA, M.C.C. **Avaliação do comportamento das cinzas da incineração de resíduos sólidos perigosos no tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. 2023. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, campus Fortaleza, 2023.

NATAADMADJA, A. D.; PRAHARA, E.; SUMBUNG, P. C. Analysis of the usage of rubberized asphalt in hot mix asphalt using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v 109, n 1, 2017.

NIELSEN, C.B. Durability of porous asphalt-International experience. Technical note 41. Copenhagen, Denmark: Danish Road Institute (DRI); 2006.

NEPOMUCENO, D. V. **Avaliação em campo de estrutura de pavimento incorporando solo estabilizado com coproduto de aciaria e sujeita à carregamento com simulador hvs e comparação com previsões de desempenho segundo o novo método brasileiro de dimensionamento medina**. 2019. 187 f.: il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, 2019.

Nações Unidas Brasil-ONU. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 02 jan, 2024.

OLIVEIRA, M. S.; FARIAS, M. M. Hot recycled asphalt mixtures with the incorporation of milled material: analysis of the mechanical performance and economic presumption in the applicability of the technique. **Revista Matéria**, v. 27, n 4, 2022.

ONGEL, A.; HARVEY, J.; KOHLER, E. **State of the Practice in 2006 for Open-Graded Asphalt Mix Design**. Caltrans Division of Research and Innovation. California, EUA, 39p. 2007.

PARTL, M. N. *et al.* Analysis of water and thermal sensitivity of open graded asphalt rubber mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 283–291, 2010.

PERALTA, J. *et al.* Changes in Rubber Due to its Interaction with Bitumen when Producing Asphalt Rubber. **Road Materials and Pavement Design**, v. 11, n, 4, p. 1009-1031, 2010.

PINHEIRO, G. S. **Avaliação do processo de extração e recuperação de ligantes asfálticos e da interação entre ligantes em misturas recicladas a quente**. 2021.139 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

PICADO SANTOS, L. G.; CAPITÃO, S. D.; NEVES, J. M. C. Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review. In **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118577, 2020.

POULIKAKOS, L. D.; PARTL, MN. Evaluation of moisture susceptibility of porous asphalt concrete using water submersion fatigue tests. **Construction and Building Materials**, v 23, p. 3475–3484, 2009.

PRATICÒ, F. G.; R. VAIANA. Improving Infrastructure Sustainability in Suburban and Urban Areas: Is Porous Asphalt The Right Answer? And How? **WIT Transactions on The Built Environment**, v. 128, p. 673–684, 2012.

QUAN, E. M.; XU, H. K.; SUN, Z. Y. Composition Optimization and Damping Performance Evaluation of Porous Asphalt Mixture Containing Recycled Crumb Rubber. **Sustainability**, v. 14, n 5, 2022.

QUEIROZ, B. O. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas modificadas com Politereftalato de Etileno (PET)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

QIU, J. *et al.* Towards 90% warm re-use of porous asphalt using foaming technology. **Journal of Cleaner Production**, v, 190, p. 251–260, 2018.

RAD, S. M. Experimental Evaluation of the Fatigue Performance and Self-Healing Behavior of Nanommodified Porous Asphalt Mixtures Containing RAP Materials under the Aging Condition and Freeze–Thaw Cycle. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n 12, p. 04022323, 2022.

RANIERI, V. *et al.* Effects of reclaimed asphalt, wax additive, and compaction temperature on characteristics and mechanical properties of porous asphalt. **Baltic Journal of Road and Bridge Engineering**, v. 17, 3, p. 187-213, 2022.

RAJOR, A. *et al.* An overview on characterization, utilization and leachate analysis of biomedical waste incinerator ash. **Journal of Environmental Management**, v. 108, p. 36-41, 2012.

REN, S. *et al.* Experimental characterization of viscoelastic behaviors, microstructure and thermal stability of CR/SBS modified asphalt with TOR. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 12052, 2020.

REN, S. S. *et al.* Investigating the role of swelling-degradation degree of crumb rubber on CR/SBS modified porous asphalt binder and mixture. **Construction and building materials**, v. 300, p. 124048, 2021.

RIVERA, C. *et al.* Evaluation of the use of a HiMA binder to extend the durability of porous friction courses (PFC). **International Journal of Pavement Engineering**, v. 24, n 2, p. 2024186, 2023.

ROCHA SEGUNDO, I. *et al.* Assessment of photocatalytic, superhydrophobic and self-cleaning properties on hot mix asphalts coated with TiO₂ and/or ZnO aqueous solutions. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 500-509, 2018.

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

SADEGHNEJAD, M.; SHAFABAKHSH, G.H. Estimation the Fatigue Number of Stone Mastic Asphalt Mixtures Modified with Nano SiO₂ and Nano TiO₂. **Journal of Rehabilitation in Civil Engineering**, v 5, p. 17-32, 2017.

SANGIORGI, C. *et al.* A complete laboratory assessment of crumb rubber porous asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 500-507, 2017.

SAHDEO, S. K. *et al.* Reclaimed Asphalt Pavement as a Substitution to Natural Coarse Aggregate for the Production of Sustainable Pervious Concrete Pavement Mixes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n 2, p. 04020469, 2021.

SHIRINI, B.; IMANINASAB, R. Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v.107, p. 165-171, 2016.

SCHNEIDER, D. **Determinação do teor de asfalto para enquadramento de uma mistura asfáltica aberta como camada porosa de atrito**. 2016. 78 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Centro Universitário Univates de Ciências Exatas e Tecnológicas. Lajeado, 2016.

SLABONSKI, P.; STANKIEWICZ, B.; BEBEN, D. Influence of a rejuvenator on homogenization of an asphalt mixture with increased content of reclaimed asphalt pavement in lowered technological temperatures. **Materials**, v. 14, p. 2567, 2021.

SLEBI-ACEVEDO, C.J. *et al.* Development of improved porous asphalt mixtures with high porosity levels. **Developments in the Built Environment**, v. 16, p. 100286, 2023.

SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M. Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas. **Revista Matéria**, v.23, n.3, 2018.

SILVA, C.E.D.B.D. **Estudo de misturas asfálticas de graduação aberta**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2005.

SIALA, A. *et al.* Improving the performance of porous asphalt with reclaimed asphalt, dune sand and lime. **Construction Materials**, v. 174, n. 4, p. 214–226, 2021.

SPREADBURY, C. J. *et al.* A critical analysis of leaching and environmental risk assessment for reclaimed asphalt pavement management. **Science of The Total Environment**, v. 775, p. 145741, 2021.

SOUSA, L.F.; ARANHA, R.C. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório pneumáticos [recurso eletrônico]: Resolução Conama nos

416/09 2022 organizadores. – Brasília: IBAMA, 2022. 101 p.: il.; color. Modo de acesso: World Wide Web ISBN 978-65-5799-039-1 (on-line).

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 2019. 153 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, 2019.

SURESHA, S. N.; VARGHESE, G. A. U.; SHANKAR, R. A comparative study on properties of porous friction course mixes with neat bitumen and modified binders. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1211–1217, 2009.

SUI, X. *et al.* Research on transversely isotropic permeability of asphalt pavement: Laboratory tests and computational simulation. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118958–118958, 2020.

TAKAHASHI, S. Comprehensive study on the porous asphalt effects on expressways in Japan: based on field data analysis in the last decade. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, n 2, p. 239-255, 2013.

TEIXEIRA, S. *et al.* Estudo do comportamento térmico da rocha fonolito com fins à produção de fertilizantes. **Holos**, v. 5, p. 1, 2015.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1323–1333, 2016.

TSAKALOU, C. *et al.* Characterization and leachability evaluation of medical wastes incineration fly and bottom ashes and their vitrification outgrowths. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v 6, p. 367-376, 2018.

USTMA. U.S. Scrap Tire Management Summary October 25, 2022.

UMILIACO, A.; BENEDETTO, A. Aggregate Size Distribution and Hydraulic Permeability. **Airfield and Highway Pavement**, p. 1134-1144. 2013.

VARDANEGA, P. J. State of the Art: Permeability of Asphalt Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 1, p. 54–64, 2014.

WANG, H. *et al.* Review of warm mix rubberized asphalt concrete: Towards a sustainable paving technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 177, p. 302-314, 2018.

WANG, G. *et al.* Laboratory investigation of rubberized asphalt using high-content rubber powder. **Materials**, v. 13, p. 1–19, 2020.

WANG, X. *et al.* Investigation of the adhesive and cohesive properties of asphalt, mastic, and mortar in porous asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 276, p. 122255, 2021.

WANG, Q. *et al.* An epoxy asphalt with polyethylene glycol chains for porous mixtures containing reclaimed asphalt pavement. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e02972, 2024.

WU, H. *et al.* A Critical State-of-The-Art Review of Durability and Functionality of Open-Graded Friction Course Mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117759, 2020.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. *Mecânica de solos*. México: Editorial Limusa S.A. 1974, 582p.

XUE, Y. *et al.* Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 989-996, 2009.

YANG, X. *et al.* Emission analysis of recycled tire rubber modified asphalt in hot and warm mix conditions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 365, p. 942-951, 2019.

YANG, Q. *et al.* Environmental impacts of reclaimed asphalt pavement on leaching of metals into groundwater. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 85, p. 102415, 2020.

ZHAO, L. *et al.* Typical pollutants in bottom ashes from a typical medical waste incinerator. **Journal of Hazardous Materials**, v. 173, p. 181–185, 2010.

ZHANG, Z. *et al.* State-of-the-art of porous asphalt pavement: Experience and considerations of mixture design. **Construction and building materials**, v. 262, p. 119998, 2020.

ZHU, J.; MA, T.; DONG, Z. Evaluation of optimum mixing conditions for rubberized asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117426, 2020.