Universidade Federal De Campina Grande - UFCG
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECA

ANÁLISE MECÂNICA E VOLUMÉTRICA DE CAMADAS POROSAS DE ATRITO COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAL FRESADO.

EDILZA RAKEL NÓBREGA CAVALCANTI

Campina Grande – Paraíba

2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

C377a Cavalcanti, Edilza Rakel Nóbrega.

Análise mecânica e volumétrica de camadas porosas de atrito com incorporação de material fresado / Edilza Rakel Nóbrega Cavalcanti. – 2026.

116 f. ; il. color.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2026.

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena".

Referências.

1 Camadas Porosas de Atrito (CPA) Reciclada. 2. Urbanização – Impermeabilização do Solo. 3. Geotecnia. 4. Mecânica e Gerência de Pavimentos. 5. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

UFCG/BC CDU 624.131(043.3)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225

EDILZA RAKEL NÓBREGA CAVALCANTI

ANÁLISE MECÂNICA E VOLUMÉTRICA DE CAMADAS POROSAS DE ATRITO COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAL FRESADO.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Geotecnia.

Linha de Pesquisa: Mecânica e Gerência de Pavimentos.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena.

Campina Grande – Paraíba

2026

ANÁLISE MECÂNICA E VOLUMÉTRICA DE CAMADAS POROSAS DE ATRITO COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAL FRESADO.

Área de Concentração: Geotecnia

Dissertação defendida e aprovada em: 05/03/2026

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Orientador
Universidade Federal de Campina Grande

_____

Prof.ª Drª. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Examinadora Interna
Universidade Federal de Campina Grande

_____

Profª. Drª. Talita Miranda De Sousa
Examinadora Externa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe

_____

Profª. Drª. Jeovanesa Régis Carvalho
Examinadora Externa
Universidade Federal de Sergipe

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

ALUNO(A): EDILZA RAKEL NÓBREGA CAVALCANTI / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. ADRIANO ELISIO DE FIGUEIRÊDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR.ª LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIRÊDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG - EXAMINADORA INTERNA, DR.ª TALITA MIRANDA DE SOUSA - IFS - EXAMINADORA EXTERNA, DR.ª JEOVANESA RÉGIS CARVALHO - UFS - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 01/2026)/ TITULO DA DISSERTAÇÃO: "ANÁLISE MECÂNICA E VOLUMÉTRICA DE CAMADAS POROSAS DE ATRITO COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAL FRESADO" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:00 HORAS / NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, DE FORMA HÍBRIDA.

2. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA", SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE "APROVADO". NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIA(A), ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

3. **CAMPINA GRANDE, 05 DE MARÇO DE 2026.**

Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/03/2026, às 07:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Edilza Rakel Nóbrega**, **Usuário Externo**, em 06/03/2026, às 07:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/03/2026, às 07:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA**, **SECRETÁRIO (A)**, em 06/03/2026, às 08:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Talita Miranda de Sousa**, **Usuário Externo**, em 06/03/2026, às 09:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Jeovanesa Régis Carvalho**, **Usuário Externo**, em 06/03/2026, às 09:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade, informando o código verificador **6307869** e o código CRC **3DB0E279**.

Referência: Processo nº 23096.001429/2026-45 SEI nº 6307869

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a duas pessoas que marcam minha vida de maneira singular, em tempos e formas diferentes, mas com a mesma intensidade de amor.

Ao meu amado pai, Manoel Mário, cuja presença transcende o tempo e a ausência. Seu legado de integridade, sabedoria e amor incondicional moldou cada passo da minha jornada. Ainda que seus olhos não possam testemunhar esta conquista, sei que sua essência vive em mim, guiando-me silenciosamente, como um farol que jamais se apaga. Que este trabalho seja também um tributo à sua memória, aos ensinamentos que me concedeu e a mulher e profissional que me tornei por sua causa.

E à doce e amada, Manoela, minha filha, a luz que ilumina meus dias e razão maior do meu caminhar. Mesmo tão pequena, você é força e inspiração, um sopro de vida que me impulsiona a ser sempre mais, sempre melhor. Seu olhar puro e seu sorriso ressignificam cada desafio, tornando cada esforço uma prova de amor. Que esta conquista simbolize não apenas meu empenho, mas também o legado que desejo construir para você.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela saúde e pela sabedoria que me concedeste, por me guiar nos momentos turbulentos e não me permitir desistir.

Ao meu pai, Manoel (*in memoriam*), por todo amor que me deste, por todas as lições que me ensinaste, que do céu me guia por toda a minha caminhada. Tudo que sou devo a ti.

À minha mãe, Soleide, por todas as demonstrações de amor e cuidado. Por não medir esforços para que eu conseguisse concluir esta pesquisa, abdicando dos seus dias para ser minha rede de apoio. Sou imensamente grato por cada gesto, por cada palavra de incentivo e, sobretudo, por suas orações incessantes, que foram como um escudo invisível a me proteger nos momentos mais desafiadores desta caminhada

Ao meu esposo, João Pedro, companheiro de todas as horas, alicerce nos momentos difíceis e celebrante das minhas conquistas. Sua cumplicidade, apoio incondicional e paciência foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Obrigada por acreditar em mim, por me incentivar e por caminhar ao meu lado com tanto amor e dedicação.

A minha filha, Manoela, que mesmo sem compreender, foi a luz que iluminou meus dias e a força motriz que me impulsionou a seguir em frente. Seu existir tornou cada desafio mais leve e cada conquista ainda mais significativa. Que este caminho trilhado seja um exemplo de amor, dedicação e perseverança para você.

Aos meus irmãos, Mauricio Neto e Manoel Júnior, por sonharem junto a mim com essa vitória.

Ao meu avô paterno, Maurício, por todo carinho, doçura, cuidado e incentivo.

Aos meus sobrinhos, Ágata, Álvaro e Liz por toda inocência e amor e por cada sorriso nas ligações que amenizam a saudade de casa.

Ao meu orientador, Professor Adriano, agradeço imensamente pela parceria desde a graduação até o mestrado. Sua sabedoria, paciência e apoio foram fundamentais para minha formação como pesquisadora. Sou profundamente grata por acreditar no meu potencial e me desafiar a ir além.

A minha grande amiga, Talita, por ser um presente na minha vida, por toda amizade, companheirismo, ensinamentos e por toda ajuda durante minha caminhada acadêmica. Minha gratidão.

A minha grande amiga Eloísa, por toda ajuda, dedicação e empenho, por não medir esforços e me ajudar diariamente nesta pesquisa tornando os dias no laboratório mais leves. Minha gratidão.

Aos amigos de caminhada na Pós, Adla, Arthur, Lara, Mariana e Leticia por toda parceria e ajuda nessa pesquisa.

Aos técnicos e colegas do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, Joseildo, Jadilson, Arthur e Ladjane, pela ajuda na execução das várias etapas deste trabalho.

À Universidade Federal de Campina Grande, por todos os ensinamentos e vivências ao longo desses anos, pelo acolhimento que recebi desde a graduação até o mestrado, e por ter abraçado meus sonhos, tornando possível a realização da minha formação profissional. Foi por meio dos professores, colegas e funcionários, que constroem e tornam este lugar um verdadeiro lar de aprendizado que me tornou a profissional que sou.

Agradeço também às agências de fomento, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro fundamental para a concretização desta pesquisa.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esse sonho fosse possível.

Minha eterna gratidão!

Há títulos que dão sentido a todos os outros, e são estes que Deus nos ensina a priorizar.

RESUMO

O avanço da urbanização e o aumento da impermeabilização dos solos têm intensificado problemas de drenagem urbana, ampliando a vulnerabilidade das cidades a eventos extremos, como chuvas intensas. Em sistemas viários, esse cenário se traduz em maior escoamento superficial, formação de lâmina d'água, redução da aderência pneu–pavimento e aumento do risco de acidentes. As Camadas Porosas de Atrito (CPA) destacam-se por promoverem drenagem superficial eficiente e maior segurança em períodos chuvosos. Paralelamente, a utilização do material fresado (Reclaimed Asphalt Pavement – RAP) consolida-se como alternativa ambiental e economicamente relevante. Contudo, sua aplicação em misturas porosas requer validação técnica, visto que a heterogeneidade do fresado e a presença de finos podem alterar a conectividade dos vazios e a funcionalidade hidráulica, enquanto o ligante envelhecido pode modificar a resposta mecânica do revestimento. Nesse contexto, esta dissertação avaliou a viabilidade da incorporação de RAP proveniente de camada asfáltica densa em misturas do tipo CPA, comparando composições recicladas com uma mistura de referência sem RAP. Foram utilizados agregados graníticos, fíler de cal hidratada e ligante asfáltico modificado por SBS (AMP 55/75). Após estudos preliminares, selecionaram-se teores de 12%, 15% e 18% de RAP. As misturas foram avaliadas quanto às propriedades volumétricas, desempenho hidráulico, resistência, rigidez e durabilidade superficial. Os resultados indicaram que as misturas recicladas mantiveram volumes de vazios acima do mínimo normativo e apresentaram comportamento drenante compatível com a função da camada, com escoamento predominante nas primeiras 24 horas e coeficientes de permeabilidade da mesma ordem de grandeza da mistura de referência. Observou-se redução dos vazios comunicantes com o aumento do teor de RAP, evidenciando influência da heterogeneidade do fresado na conectividade da rede porosa. Sob o aspecto mecânico, a incorporação de RAP promoveu incremento consistente da resistência à tração e do módulo de resiliência, indicando aumento da rigidez da camada. Em contrapartida, verificou-se tendência de aumento da perda por abrasão no ensaio Cântabro com a elevação do teor de RAP, tornando o teor de 18% mais sensível quanto à durabilidade superficial. O escorrimento permaneceu abaixo do limite normativo com valores entre 0,020 e 0,040% e a resistência ao dano por umidade induzida manteve-se elevada, com resultados acima de 80% para todas as misturas analisadas. Conclui-se que a incorporação de RAP em misturas do tipo CPA é tecnicamente viável quando o traço é ajustado de modo a preservar a estrutura porosa da mistura e o equilíbrio do sistema ligante. Entre os teores analisados, a mistura com 12% de RAP apresentou o melhor desempenho global, conciliando melhoria do comportamento mecânico com a manutenção da capacidade drenante e da durabilidade superficial. Teores mais elevados promoveram aumento de rigidez, porém com redução da resistência ao desgaste.

Palavras-chave: CPA reciclada; urbanização; impermeabilização do solo; RAP.

ABSTRACT

The advancement of urbanization and the increasing soil impermeabilization have intensified urban drainage problems, increasing the vulnerability of cities to extreme events such as intense rainfall. In road systems, this scenario results in greater surface runoff, formation of water films, reduction of tire–pavement friction, and an increased risk of accidents. Porous Asphalt Layers (PAL), commonly referred to as Porous Friction Courses (PFC), stand out for promoting efficient surface drainage and improving traffic safety during wet conditions. In parallel, the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) has been consolidated as an environmentally and economically relevant alternative. However, its application in porous mixtures requires technical validation, since RAP heterogeneity and the presence of fines may affect void connectivity and hydraulic functionality, while the aged binder may modify the mechanical response of the pavement. In this context, this dissertation evaluated the feasibility of incorporating RAP obtained from dense asphalt layers into porous asphalt mixtures (CPA), comparing recycled compositions with a reference mixture without RAP. Granite aggregates, hydrated lime filler, and SBS-modified asphalt binder (AMP 55/75) were used. After preliminary studies, RAP contents of 12%, 15%, and 18% were selected. The mixtures were evaluated in terms of volumetric properties, hydraulic performance, strength, stiffness, and surface durability. The results indicated that the recycled mixtures maintained air void contents above the minimum specification limits and exhibited drainage behavior compatible with the functional requirements of porous layers, with most water outflow occurring within the first 24 hours and permeability coefficients of the same order of magnitude as the reference mixture. A reduction in interconnected voids was observed with increasing RAP content, indicating the influence of RAP heterogeneity on the connectivity of the porous network. From a mechanical perspective, RAP incorporation promoted a consistent increase in indirect tensile strength and resilient modulus, indicating higher mixture stiffness. Conversely, an increasing trend in abrasion loss in the Cantabro test was observed as RAP content increased, making the mixture with 18% RAP more susceptible in terms of surface durability. Draindown remained below specification limits, with values ranging between 0.020% and 0.040%, and resistance to moisture-induced damage remained high, with tensile strength ratio (TSR) values above 80% for all analyzed mixtures. It can be concluded that the incorporation of RAP into porous asphalt mixtures is technically feasible when the mixture design is adjusted to preserve the porous structure and maintain the balance of the binder system. Among the evaluated contents, the mixture containing 12% RAP presented the best overall performance, combining improved mechanical behavior with the preservation of drainage capacity and surface durability. Higher RAP contents increased mixture stiffness but resulted in reduced resistance to surface wear.

Keywords: Recycled Porous Friction Course (PFC); urbanization; soil impermeabilization; Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Esquematização da primeira etapa da pesquisa 45
Figura 2:Esquematização da segunda etapa da pesquisa 46
Figura 3:Distribuição granulométrica dos agregados 50
Figura 4: Evaporador Rotativo 52
Figura 5: Curvas granulométricas do White RAP e Black RAP 55
Figura 6: Curva da composição granulométrica da CPA. 57
Figura 7: Curva de Temperatura versus Viscosidade, para definição da TU e TC. 57
Figura 8: Determinação da densidade aparente da mistura 64
Figura 9: Determinação da densidade máxima da mistura pelo Rice Test. 64
Figura 10: Curva volume de vazios versus teor de ligante. 65
Figura 11: Demonstração do desgaste sofrido em um dos corpos de prova utilizados na determinação da dosagem. 65
Figura 12:Curva da % de desgaste versus teor de ligante. 67
Figura 13:Amostra acomodada no cesto para determinação da porcentagem de escorrimento. 68
Figura 14:Material resultante do escorrimento do cesto. 69
Figura 15:Curva do escorrimento versus teor de ligante. 69
Figura 16: Curvas granulométricas mistura virgem e misturas recicladas 73
Figura 17: Volume de vazios versus teor de RAP 74
Figura 18: Procedimento para determinação dos vazios comunicantes. 76
Figura 19:Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral 78
Figura 20: Condicionamento dos corpos de prova. 79
Figura 21: Corpos de prova em banho-maria a 60°C. 80
Figura 22:Vazios comunicantes versus teor de RAP 85
Figura 23:Água drenada acumulada em função do tempo para misturas CPA com diferentes teores de RAP 88
Figura 24: Desgaste por abrasão versus Teor de RAP. 91
Figura 25: Porcentagem de Escorrimento (%) versus Teor de RAP (%) 93
Figura 26: Resultados dos ensaios de RT 95
Figura 27: Resultado da resistência retida a tração. 97
Figura 28: Gráfico do MR versus Teor de RAP. 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da CPA – DNIT 386/1999 32
Tabela 2: Caracterização do ligante AMP 55/75 utilizado nesta pesquisa. 47
Tabela 3:Ensaios e resultados da caracterização dos agregados 49
Tabela 4:Quantidade passante acumulada (%) 50
Tabela 5: Caracterização do ligante extraído e recuperado. 52
Tabela 6: Caracterização do Black RAP e White RAP. 53
Tabela 7:Proporção de cada agregado na mistura. 56
Tabela 8:Porcentagem passando da mistura de projeto. 56
Tabela 9:Resultados dos ensaios para dosagem, utilizando o AMP 55/75. 59
Tabela 10: - Resultados dos ensaios para dosagem, variando as TU e TC. 61
Tabela 11: Parâmetros definidos para caracterização das CPAs 70
Tabela 12: Resumo da composição das misturas CPA pura e recicladas 73
Tabela 13:Volume de vazios das misturas CPA com diferentes teores de RAP e limites normativos. 82
Tabela 14: Resumo dos coeficientes de permeabilidade das misturas CPA 90
Tabela 15:Síntese comparativa dos principais parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas CPA com diferentes teores de RAP 100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Especificações para mistura do tipo CPA, de acordo com DNIT 386/1999 33
Quadro 2:Especificações para mistura do tipo CPA, de acordo com ASTM D7064 34
Quadro 3: Ensaios e normas utilizadas para dosagem da CPA. 56
Quadro 4: Ensaios e normas utilizadas para caracterização mecânica e volumétrica das misturas. 75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório SUPERPAVE
CP	Corpo de Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FTIR	*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDT	*Linear Variable Differential Transducer*
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	*Multiple Stress Creep Recovery*
NBR	Norma Brasileira
PG	*Performance Grade*
RAP	*Reclaimed Asphalt Pavement*
RTT	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	*Rolling Thin-Film Oven*
SUPERPAVE	*Superior Perfomance Asphalt Pavements*
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
Vv	*Volume de Vazios*
Vc	*Vazios Comunicantes*

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau celsius
cm	Centímetro
cP	Centipoise
D	Diâmetro dos grãos
g	Grama
Gmb	Massa específica aparente medida (g/cm³)
Gmm	Densidade máxima medida (g/cm³)
Hz	Hertz
Kg	Quilograma
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
Nprojeto	Número de giros de projeto no compactador SUPERPAVE
rpm	Rotação por minuto
UTM	*Universal Testing Machine*
TºC	Ponto de amolecimento
Jnr	Compliância não recuperável
G*	Módulo Complexo de Cisalhamento
s	Segundo
%	Porcentagem
mL	Mililitro
PEN	Penetração
N	Número de ciclos de carregamento que leva a amostra à ruptura
F	Número médio de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga
t	Tonelada
m	Metro
km	Quilômetro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 18
1.1. OBJETIVOS 20
1.1.1. Objetivo Geral 20
1.1.2. Objetivos Específicos 20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22
2.1. Pavimentos Drenantes 22
2.1.1. Contextualização 22
2.1.2. Misturas Asfálticas Porosas 24
2.1.3. Camadas Porosas de Atrito 26
2.1.3.1. Propriedades da CPA 28
2.1.3.2. Normatização 31
2.2. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) 35
2.2.1. Benefícios da incorporação do RAP 37
2.2.2. Limitações e desafios da incorporação de RAP 39
2.6. Camada Porosa de Atrito com incorporação de RAP 41
2.7. Considerações finais 43
3. MATERIAIS E MÉTODOS 45
3.1. Materiais 46
3.1.1. Ligante Asfáltico: AMP 55/75 46
3.1.2. Agregados 46
3.1.3. RAP 47
3.2. Métodos 47
3.2.1. Caracterização física e reológica do ligante 47
3.2.2. Caracterização dos agregados 49
3.2.3. RAP 51
3.2.3.1. Ligante Asfáltico Recuperado 51

3.2.3.2. Agregado Do RAP 53
3.2.4. Dosagem 55
3.2.4.1. Composição granulométrica da mistura 56
3.2.4.2. Temperaturas de usinagem e compactação 57
3.2.4.3. Moldagem CGS 58
3.2.4.4. Volume de vazios 63
3.2.4.5. Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cântabro 65
3.2.4.6. Escorrimento do ligante 67
3.2.5. Determinação do teor de projeto de ligante e número de giros 70
3.2.6. Incorporação Do RAP Na Mistura Asfáltica 71
3.2.7. Caracterização mecânica e volumétrica da mistura CPA reciclada 74
3.2.7.1. Vazios comunicantes 75
3.2.7.2. Comportamento drenante 76
3.2.7.3. Resistência à tração indireta por compressão diametral 77
3.2.7.4. Determinação do Dano por Umidade Induzida 78
3.2.7.5. Módulo de Resiliência 80
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 82
4.1. Caracterização mecânica e hidráulica da mistura CPA reciclada 82
4.1.1. Volume de vazios 82
4.1.2. Vazios comunicantes 84
4.1.3. Comportamento drenante 87
4.1.4. Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cântabro 91
4.1.5. Escorrimento 93
4.1.6. Resistência à tração indireta por compressão diametral 94
4.1.7. Determinação do Dano por Umidade Induzida 96
4.1.8. Módulo de Resiliência 98

4.2. Síntese comparativa e definição do teor de RAP mais adequado 100
5. CONCLUSÕES 102
5.1. Considerações finais 102
5.2. Sugestões para pesquisas futuras 103
6. REFERENCIAS 105

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm assumido papel central na reconfiguração da dinâmica urbana, afetando profundamente as cidades em múltiplas esferas. Em diversas regiões do mundo, observa-se o aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, como tempestades severas, ondas de calor e inundações, os quais impactam diretamente a infraestrutura e a segurança das populações. Esse cenário tem impulsionado transformações nos padrões de uso do solo e estimulado práticas de planejamento urbano mais resilientes e sustentáveis, como telhados verdes, ampliação da cobertura vegetal e sistemas de mobilidade menos dependentes de combustíveis fósseis (Sousa, 2024).

Nesse cenário, surge o conceito de cidade-esponja, que integra a gestão das águas pluviais ao planejamento urbano, buscando criar espaços capazes de absorver, armazenar e liberar gradualmente grandes volumes de água, reduzindo os impactos das cheias. Dentre as ramificações associadas a essas soluções, destacam-se os pavimentos permeáveis, que contribuem para a infiltração e melhoria da drenagem urbana (Fogeiro, 2019; Galdino, 2022).

No caso dos pavimentos permeáveis flexíveis, a estrutura é composta por misturas asfálticas de alta permeabilidade, com volume de vazios acima de 18%, em contraste com as misturas densas convencionais, que apresentam volume de vazios de 3 a 5%. Quando aplicadas como camada de rolamento, essas misturas são denominadas Camadas Porosas de Atrito (CPA), cuja função principal é drenar a água superficial, melhorar a aderência pneu–pavimento em condições úmidas e reduzir o ruído de tráfego. Apesar de seus benefícios funcionais, as CPA apresentam vulnerabilidades estruturais relevantes, como exsudação do ligante, menor resistência mecânica, desagregação dos agregados e colmatação dos poros, que consiste no acúmulo progressivo de partículas finas, como poeira, areia, material proveniente do desgaste dos pneus e resíduos do tráfego, que se depositam nos vazios da mistura asfáltica, reduzindo a conectividade entre os poros e, consequentemente, a permeabilidade da camada. Como resultado, a capacidade de drenagem do revestimento diminui ao longo do tempo, favorecendo o retorno da lâmina d’água superficial e comprometendo parte da funcionalidade hidráulica do pavimento (Alecrim, 2021; Sousa, 2024).

A avaliação desse fenômeno pode ser realizada por meio de ensaios de permeabilidade em laboratório ou em campo, bem como pela análise da redução da macrotextura superficial ao longo da vida útil do pavimento. Já a mitigação da colmatação está associada principalmente ao adequado controle granulométrico da mistura, à manutenção de um volume de vazios interconectados suficiente e à implementação de práticas periódicas de manutenção, como

limpeza mecânica ou hidrojateamento da superfície, que visam remover partículas acumuladas e restabelecer parcialmente a capacidade drenante do revestimento.

Outro desafio relevante da engenharia de pavimentos refere-se à reciclagem de revestimentos asfálticos por meio da incorporação de Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), estratégia que tem se consolidado como alternativa técnica para o reaproveitamento de materiais provenientes da fresagem de pavimentos existentes. A utilização de RAP contribui para a redução do consumo de agregados e ligante asfáltico virgem, além de diminuir o volume de resíduos gerados pela pavimentação (Al-Saffar et al., 2021; Liu et al., 2022; Melo Neto, 2025). Entretanto, a presença de ligante envelhecido no material reciclado pode aumentar a rigidez da mistura e reduzir sua ductilidade, o que pode afetar o desempenho mecânico e a durabilidade, especialmente em misturas porosas, nas quais a adesão entre ligante e agregados e a estabilidade da estrutura granular são fundamentais (Zhang et al., 2024).

Apesar dos avanços observados em diferentes países, a incorporação de RAP em camadas porosas de atrito ainda enfrenta limitações no contexto brasileiro, tanto do ponto de vista técnico quanto normativo. Muitas especificações vigentes não contemplam explicitamente o uso de materiais reciclados em misturas asfálticas porosas, como ocorre com a norma DNIT-ME 386/99, que regulamenta a execução de CPA, mas não prevê a utilização de material fresado na composição da mistura. Além disso, por tratar-se de uma especificação publicada há mais de duas décadas, a norma não incorpora plenamente os avanços recentes relacionados às técnicas de reciclagem de pavimentos e ao desenvolvimento de misturas asfálticas com maior eficiência no uso de recursos.

Do ponto de vista do comportamento da mistura, a incorporação de RAP tende a aumentar a rigidez do sistema ligante-agregado devido ao envelhecimento do ligante presente no material reciclado. Embora esse efeito possa contribuir para ganhos estruturais, ele também pode influenciar propriedades fundamentais das misturas porosas, como a conectividade dos vazios, a resistência ao desgaste e a funcionalidade drenante. Dessa forma, torna-se necessário investigar em que medida a incorporação de RAP pode ser compatibilizada com as características estruturais e hidráulicas exigidas para camadas porosas de atrito.

Estudos recentes indicam que, quando adequadamente dosadas, misturas do tipo CPA contendo material fresado podem apresentar desempenho satisfatório, como Alecrim (2021), ao avaliar a aplicação de camadas porosas de atrito em vias urbanas de Fortaleza-CE, observou que misturas contendo RAP atenderam aos requisitos normativos de CPA, apresentando volume de vazios na faixa de aproximadamente 18% a 22%, coeficientes de permeabilidade da

ordem de 10^{-1} cm/s e perdas por abrasão no ensaio Cântabro inferiores ao limite normativo de 25%. Esses resultados sugerem que a incorporação de material fresado pode ser compatibilizada com a funcionalidade drenante e com a resistência ao desgaste superficial da mistura quando o processo de dosagem é adequadamente conduzido. No entanto, fica claro que o desafio de incorporar RAP em CPA reside principalmente em adaptar essa solução às especificações técnicas brasileiras, considerando as condições particulares de compactação e envelhecimento precoce dos pavimentos em climas tropicais, como o que ocorre no Brasil.

Nesse contexto, a pesquisa proposta nesta dissertação visa investigar o uso do fresado proveniente de camadas de pavimentação densas na produção de CPAs, com foco em avaliar suas propriedades mecânicas e funcionais. A partir dessa análise, foi possível verificar a viabilidade técnica do uso de material reciclado em pavimentos urbanos e rodoviários, além de indicar o potencial da solução para a redução do consumo de agregados e ligantes virgens, contribuindo para práticas mais sustentáveis na engenharia de pavimentos. Este estudo se justifica pela necessidade de ampliar o conhecimento técnico sobre o comportamento de camadas porosas de atrito com incorporação de material fresado, contribuindo para a avaliação da viabilidade de reutilização desse material em misturas asfálticas porosas. Dessa forma, busca-se fornecer subsídios técnicos para o desenvolvimento de soluções que conciliem desempenho mecânico e funcional em pavimentos asfálticos.

Além disso, o desenvolvimento de soluções que favoreçam a drenagem superficial do pavimento, como as camadas porosas de atrito (CPA), tem sido apontado na literatura como uma alternativa para auxiliar no controle do escoamento superficial em áreas urbanas, contribuindo para a redução da lâmina d'água sobre a pista e para o aumento da segurança viária (Galdino, 2022). Nesse contexto, a presente pesquisa busca contribuir para a ampliação do conhecimento técnico sobre o comportamento de misturas CPA com incorporação de material fresado, fornecendo subsídios para a avaliação da viabilidade dessa solução em pavimentos asfálticos.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar o comportamento mecânico e volumétrico de camadas porosas de atrito com incorporação de material fresado proveniente de misturas asfálticas densas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a variação do teor de RAP na funcionalidade drenante da CPA, por meio da análise do volume de vazios, vazios comunicantes e parâmetros de permeabilidade (vazão e coeficiente k) e discutir a relação entre conectividade de poros e desempenho hidráulico.

- Investigar a influência do teor de RAP na durabilidade superficial e na suscetibilidade à umidade das misturas CPA e identificar tendências e limites de desempenho para os teores estudados.

- Analisar o efeito da incorporação de RAP na rigidez e na resistência das CPA, e discutir as implicações desses resultados para o comportamento estrutural da camada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Pavimentos Drenantes

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica que fundamenta o desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente são abordados conceitos relacionados à estrutura e classificação dos pavimentos, com ênfase nos pavimentos flexíveis. Em seguida, são discutidas as características das misturas asfálticas porosas, com destaque para as camadas porosas de atrito (CPA), suas propriedades mecânicas e hidráulicas, bem como aspectos relacionados à sua dosagem e normatização. Por fim, são apresentados conceitos sobre os principais materiais empregados nessas misturas, incluindo agregados, ligantes asfálticos e o material fresado proveniente de pavimentos asfálticos reciclados (Reclaimed Asphalt Pavement – RAP).

2.1.1. Contextualização

A urbanização contemporânea tem sido acompanhada pela substituição progressiva de superfícies naturais por camadas impermeáveis, edificações, vias pavimentadas e áreas de estacionamento, que alteram o balanço hidrológico urbano ao reduzir a infiltração e ampliar o escoamento superficial. Como consequência direta, os sistemas convencionais de micro e macrodrenagem passam a operar mais próximos de sua capacidade hidráulica de projeto, sobretudo em episódios de precipitação intensa, elevando a frequência de alagamentos e os prejuízos associados.

Em regiões tropicais, esse quadro se torna ainda mais sensível devido à ocorrência de chuvas de alta intensidade e grande precipitação em curtos intervalos, o que intensifica picos de vazão e amplia a exposição das áreas urbanas a transtornos hídricos. Sousa (2024) discute sobre as implicações da impermeabilização do solo e de eventos pluviométricos intensos no contexto brasileiro e internacional, apontando que a combinação entre urbanização e precipitações severas potencializa problemas de drenagem superficial e seus efeitos associados.

Os alagamentos urbanos decorrem não apenas de condicionantes fluviais, mas também de deficiências operacionais do sistema de drenagem e de fatores antrópicos, como o descarte inadequado de resíduos sólidos, que pode comprometer o funcionamento dos dispositivos de coleta e condução. Nesse sentido, o problema passa a ser entendido como multifatorial: envolve chuva intensa, impermeabilização, limitações de infraestrutura e condições de manutenção, que juntas elevam a recorrência de acúmulos momentâneos de água em pontos críticos do sistema viário. Essa abordagem é apresentada por Silva Júnior et al. (2024) e Santos (2010), que

discutem a formação de alagamentos e sua relação com deficiências de drenagem e com o manejo urbano inadequado de resíduos.

Com a ampliação da malha viária, a impermeabilização tende a crescer e, com ela, a severidade dos eventos de inundação urbana. Suzuki, Azevedo e Kabbach Júnior (2013) ressaltam que a expansão das superfícies pavimentadas eleva a frequência e intensidade desses eventos, reforçando que o grau de urbanização do solo está diretamente associado à maior suscetibilidade a transtornos por inundações. No entanto, a infraestrutura viária pode deixar de ser apenas "receptora" do problema e passar a ser elemento estrutural do sistema de drenagem urbana, o que abre espaço para soluções que atuem também na própria superfície de rolamento.

Nesse contexto, surge e se consolida a discussão do conceito de cidade-esponja, orientado à integração entre gestão de águas pluviais e planejamento urbano. A ideia central é aumentar a capacidade da cidade em absorver e armazenar volumes relevantes de água para, posteriormente, devolvê-los de forma gradual ao meio, reduzindo picos de vazão e a sobrecarga de sistemas convencionais. Zhang et al. (2018) relacionam a adoção do conceito na China como resposta a inundações pontuais, enquanto Fogeiro (2019) descreve a consolidação do termo no debate após episódios severos de inundação, com destaque para o evento de Pequim em 2012, reforçando o caráter reativo-propositivo do conceito.

O desenvolvimento de cidades-esponja fundamenta-se na adoção de estratégias urbanas capazes de ampliar a capacidade de absorção, retenção e gestão das águas pluviais no ambiente urbano. Para isso, propõe a utilização de um conjunto de soluções baseadas na natureza e em infraestruturas verdes e azuis, capazes de reduzir o escoamento superficial e restabelecer parte das funções hidrológicas naturais do solo. Entre as principais medidas empregadas destacam-se a preservação e recuperação de corpos hídricos urbanos, a implantação de áreas verdes, parques inundáveis, jardins de chuva, telhados verdes, bacias de retenção e infiltração, além do uso de pavimentos permeáveis em vias e áreas urbanizadas. Essas soluções atuam de forma integrada, promovendo a infiltração, o armazenamento temporário e a condução controlada da água pluvial, reduzindo a sobrecarga sobre os sistemas convencionais de drenagem urbana.

Nesse contexto, Wang et al. (2019) destacam que a água pluvial pode ser infiltrada, purificada, armazenada, reutilizada e conduzida de maneira controlada, elevando o padrão de projeto da drenagem urbana e reduzindo o risco de inundações. Entre as soluções aplicáveis ao sistema viário urbano, destacam-se os pavimentos com capacidade drenante, como as camadas porosas de atrito (CPA), que permitem a rápida percolação da água através de sua estrutura porosa, contribuindo para a redução da lâmina d'água superficial e para o aumento da segurança

viária em condições de chuva. Além disso, como ressalta Galdino (2022) a abordagem foi ampliada para incorporar benefícios associados à adaptação climática, como mitigação de ilhas de calor, melhoria do microclima e redução do ruído urbano, aspectos que conectam drenagem, conforto ambiental e infraestrutura urbana em uma mesma agenda.

Entre as técnicas associadas a esse paradigma, os pavimentos permeáveis ganham relevância por ocuparem grande parte da área impermeável das cidades e por atuarem diretamente na dinâmica do escoamento superficial. Sousa (2024) destaca que, no âmbito dos pavimentos flexíveis, a permeabilidade pode ser obtida por meio de misturas asfálticas com permeabilidade superior às misturas densas usuais; quando aplicadas como camada de rolamento, essas misturas são conhecidas como Camadas Porosas de Atrito (CPA). A CPA, nessa configuração, assume finalidade funcional: promover drenagem superficial, melhorar a aderência pneu-pavimento em pista molhada e, adicionalmente, contribuir para a absorção de ruído do tráfego, reforçando a relação entre segurança viária, conforto e desempenho funcional do revestimento.

2.1.2. Misturas Asfálticas Porosas

As misturas asfálticas porosas constituem um tipo específico de revestimento caracterizado por elevada proporção de vazios interconectados, projetados para permitir a percolação da água através da camada superficial do pavimento. Diferentemente das misturas de graduação densa, nas quais os vazios são reduzidos para maximizar a estabilidade estrutural, as misturas porosas são intencionalmente dosadas para manter uma rede contínua de vazios comunicantes, favorecendo o escoamento interno da água e reduzindo a formação de lâmina superficial (MANSOUR; PUTMAN, 2013; WU et al., 2020).

Do ponto de vista composicional, essas misturas apresentam predominância de agregados graúdos e fração reduzida de finos, resultando em volume de vazios e superior ao das misturas convencionais. Zhang et al. (2021) demonstram que o desempenho hidráulico dessas camadas está fortemente relacionado não apenas ao teor total de vazios, mas principalmente à conectividade da estrutura porosa, sendo a continuidade dos vazios comunicantes determinante para a eficiência do fluxo interno. De forma complementar, Liu et al. (2019) evidenciam que a morfologia dos agregados e a distribuição granulométrica influenciam diretamente a permeabilidade e a resistência à colmatação da mistura, destacando a importância do controle da estrutura interna na fase de dosagem.

No contexto normativo brasileiro, a DNIT-ME 386/1999 estabelece que o volume de vazios das misturas do tipo Camada Porosa de Atrito deve situar-se, em geral, entre 18% e 25%,

faixa compatível com recomendações internacionais para misturas abertas, como aquelas descritas na ASTM D7064-13. Wu et al. (2020) apontam que valores nessa magnitude promovem redução significativa da lâmina d'água na interface pneu–pavimento, contribuindo para mitigação da aquaplanagem e melhoria da segurança viária.

Além da função hidráulica, misturas asfálticas porosas também apresentam benefícios acústicos. Li et al. (2023) e Wu et al. (2020) observaram que pavimentos porosos podem proporcionar reduções de ruído na interface pneu–pavimento da ordem de 3 a 6 dB quando comparados a revestimentos densos. Esse desempenho está associado à maior porosidade efetiva da mistura e aos mecanismos de absorção e dissipação sonora proporcionados pela estrutura aberta do material, reforçando o potencial dessas misturas para aplicação em vias urbanas e rodoviárias.

Entretanto, a elevada porosidade que garante funcionalidade hidráulica também impõe desafios relacionados à durabilidade. Zhang et al. (2021) verificaram que a maior exposição do ligante ao oxigênio e à umidade pode acelerar processos de oxidação e perda de coesão. Huang et al. (2022) demonstraram que a resistência à desagregação superficial está diretamente associada à energia de compactação e à estabilidade do filme de ligante. Adicionalmente, a colmatação progressiva dos vazios, causada pela deposição de partículas externas ou pelo desprendimento interno de material, reduz gradativamente a permeabilidade da camada ao longo do tempo (WU et al., 2020).

Diante dessas particularidades, o projeto de misturas asfálticas porosas exige critérios específicos de dosagem e controle tecnológico, distintos daqueles empregados em misturas densas. Ensaios como perda por abrasão Cântabro, resistência à tração indireta, avaliação de permeabilidade e análise da conectividade de vazios são amplamente empregados para assegurar equilíbrio entre desempenho mecânico e hidráulico (MANSOUR; PUTMAN, 2013; ZHANG et al., 2021; HUANG et al., 2022).

Quanto à aplicação, os pavimentos asfálticos porosos podem ser compreendidos em três configurações principais, definidas conforme sua função estrutural e hidráulica. Em rodovias de médio e alto volume de tráfego predominam as camadas porosas superficiais, conhecidas como Open-Graded Friction Courses (OGFC), destinadas primordialmente à drenagem superficial e à melhoria da segurança viária. Em determinados contextos utilizam-se revestimentos drenantes com contribuição estrutural moderada, denominados Porous Asphalt (PA), que associam desempenho hidráulico e suporte mecânico. Já em áreas urbanas de baixo volume de tráfego, estacionamentos e sistemas de drenagem sustentável, podem ser

empregados pavimentos permeáveis de estrutura completa, nos quais a água percola não apenas pela camada superficial, mas também pelas camadas inferiores, podendo contribuir para retenção temporária e infiltração controlada no subleito (LIU et al., 2019; ALVAREZ et al., 2020; WU et al., 2020).

No cenário brasileiro, a aplicação mais consolidada corresponde à Camada Porosa de Atrito (CPA), regulamentada pela DNIT-ME 386/1999, a qual será analisada com maior aprofundamento nos tópicos subsequentes, especialmente sob a perspectiva da incorporação de material fresado em sua composição.

2.1.3. Camadas Porosas de Atrito

A aplicação de misturas asfálticas porosas como revestimento superficial teve início na Europa a partir da década de 1950, inicialmente no Reino Unido, como resposta à necessidade de reduzir a formação de lâmina d'água e melhorar a aderência pneu–pavimento em condições chuvosas (SANDERS; SANDERS, 2006). A partir da década de 1970, o conceito foi amplamente desenvolvido em países como Holanda e Alemanha, onde o denominado Porous Asphalt passou a ser empregado sistematicamente em rodovias de alto volume de tráfego, associando benefícios hidráulicos e redução de ruído (HAMET; BESNARD, 2007; WU et al., 2020).

Nos Estados Unidos, o uso das chamadas Open-Graded Friction Courses (OGFC) consolidou-se no mesmo período, especialmente com foco na mitigação da aquaplanagem. Contudo, aplicações iniciais enfrentaram problemas de durabilidade, como desagregação superficial e envelhecimento acelerado do ligante, o que levou ao aprimoramento das especificações técnicas e ao desenvolvimento de critérios de dosagem mais rigorosos (MANSOUR; PUTMAN, 2013). Estudos posteriores demonstraram que a evolução tecnológica das OGFC, com controle mais preciso da estrutura porosa e utilização de ligantes modificados, permitiu ganhos significativos em desempenho mecânico e funcional (WU et al., 2020).

No Brasil, a adaptação desse conceito resultou na denominada Camada Porosa de Atrito (CPA), regulamentada pela norma DNIT 386/1999. Desde então, a CPA vem sendo aplicada principalmente em rodovias e vias urbanas com elevado volume de tráfego, com ênfase na melhoria da drenagem superficial e da segurança viária.

A Camada Porosa de Atrito (CPA) é um tipo específico de mistura asfáltica porosa utilizada como revestimento superficial de pavimentos, cuja principal função é promover a drenagem rápida da água da superfície, contribuindo para a melhoria da segurança viária e do conforto ao usuário. A CPA apresenta comportamento funcional diferenciado em relação às

misturas densas, sobretudo quanto à redução do risco de hidroplanagem, do spray de água e da reflexão luminosa em pista molhada (Dresch, 2016).

Além da função hidráulica, Wu et al. (2020) e Alecrim et al. (2022) destacam em suas pesquisas que a macrotextura pronunciada e a estrutura porosa favorecem a dissipação das ondas sonoras na interface pneu–pavimento, resultando em níveis de ruído inferiores quando comparados aos revestimentos asfálticos convencionais, especialmente em ambientes urbanos.

Do ponto de vista normativo, a CPA é definida como uma mistura asfáltica aberta com elevado teor de vazios interconectados. A norma brasileira DNIT 386/1999 estabelece que a mistura deve apresentar índice de vazios mínimo de 18% e máximo de 25%, enquanto a norma norte-americana ASTM D7064-21 adota o valor mínimo de 18%, sem fixar explicitamente um limite superior. A CPA é produzida em usina à quente, sendo composta predominantemente por agregados graúdos de graduação descontínua, pequena fração de agregado miúdo, material de enchimento (fíler) e ligante asfáltico modificado por polímero. No entanto, acordo com Tarefder et al. (2019) o ligante utilizado deve ter baixa suscetibilidade térmica e alta resistência ao envelhecimento. Em geral, recomenda-se o emprego de asfalto modificado por polímero (AMP) para aumentar a durabilidade e reduzir a desagregação.

Pesquisas como a de Garcia (2017) ressaltam que a granulometria da CPA é um dos fatores mais críticos para o seu desempenho, uma vez que a predominância de agregados graúdos e a baixa quantidade de finos são responsáveis pela formação de uma estrutura altamente porosa e permeável. No entanto, essa mesma característica estrutural torna a CPA mais suscetível a mecanismos de deterioração específicos, exigindo rigor no controle tecnológico e na seleção de materiais.

Em relação ao ligante asfáltico, a norma determina o uso de ligantes modificados por polímeros, como o estireno-butadieno-estireno (SBS), com o objetivo de aumentar a coesão da mistura, reduzir a suscetibilidade à desagregação superficial e retardar os efeitos do envelhecimento oxidativo (Wu et al., 2020; De Pascale et al., 2023). Apesar da norma DNIT 386/99 especificar apenas o uso de ligante asfáltico modificado por polímero SBS, Ceratti et al., (2015) destacam que entre os três AMPs disponíveis no mercado brasileiro, o 60/85-E e o 65/90-E são os mais indicados para utilização em misturas do tipo CPA. A ASTM D7064-21 recomenda teores de ligante geralmente situados entre 6,0% e 6,5%, enquanto a norma brasileira DNIT 386/1999 admite valores entre 4,0% e 6,0%, podendo esses limites ser ajustados em função das características dos agregados, do tipo de ligante e da metodologia de dosagem adotada (Sousa, 2024).

No que se refere à durabilidade, Sousa (2024) e Wu et al. (2020) apontam que os principais mecanismos de degradação da CPA, assim como nas misturas asfálticas porosas em geral, estão associados à desagregação superficial, à oxidação acelerada do ligante e à colmatação progressiva dos vazios ao longo da vida útil do pavimento. A colmatação, em particular, tem sido amplamente discutida na literatura atual, sendo atribuída tanto à deposição de partículas externas quanto ao desprendimento interno de material da própria mistura, comprometendo gradativamente a permeabilidade e a funcionalidade hidráulica da camada.

Quanto à dosagem, observa-se que, no Brasil, o método Marshall ainda é amplamente empregado para o projeto de CPA, conforme estabelecido pela DNIT 386/1999, priorizando o atendimento ao volume de vazios requerido. Entretanto, Del Carpio (2014), Knabben (2017) e Sousa (2024) indicam que metodologias baseadas no Compactador Giratório Superpave (CGS) vêm sendo cada vez mais utilizadas em pesquisas acadêmicas e aplicações experimentais, por permitirem maior controle da estrutura interna da mistura e melhor representação das condições de campo. Ressalta-se, contudo, que o método Superpave foi originalmente desenvolvido para misturas densas, sendo necessária a adoção de critérios específicos para sua aplicação em misturas porosas.

Nesse contexto, a CPA se consolida como uma solução funcional relevante para pavimentos rodoviários, ao mesmo tempo em que apresenta desafios técnicos relacionados à durabilidade e ao projeto de mistura. Tais desafios têm motivado pesquisas recentes voltadas à modificação da CPA por meio do uso de materiais alternativos, como o material fresado de pavimentos asfálticos (RAP).

2.1.3.1. Propriedades da CPA

O desempenho da Camada Porosa de Atrito (CPA) está diretamente associado às suas propriedades mecânicas e hidráulicas, as quais são fortemente condicionadas pela estrutura aberta da mistura, pela elevada porosidade e pela reduzida área de contato entre ligante e agregados. Zhang et al. (2021) demonstram que a elevada porosidade das misturas asfálticas abertas reduz a área efetiva de contato entre ligante e agregados, aumentando a exposição do ligante à ação do oxigênio e da umidade. Essa condição favorece processos de oxidação acelerada, perda de coesão e desagregação superficial, especialmente sob condições de infiltração contínua de água. Embora esse entendimento permaneça válido, Wu et al. (2020) reforçam que o problema não está apenas na quantidade de vazios, mas sobretudo na qualidade da ligação ligante–agregado e na estabilidade da estrutura interna da mistura.

Nesse contexto, o uso de ligantes asfálticos modificados por polímeros é necessário para garantir o desempenho das camadas porosas de atrito. Devido ao elevado volume de vazios e à menor área de contato entre ligante e agregados, a CPA apresenta maior suscetibilidade à desagregação e à ação da água, exigindo ligantes com maior coesão e resistência ao envelhecimento. Punith et al. (2012) e Wu et al. (2020) mostram que a modificação do ligante reduz a suscetibilidade à umidade e a perda de material por abrasão. De Pascale et al. (2023) indicam que ligantes modificados à base de estireno-butadieno-estireno (SBS) apresentam maior resistência ao envelhecimento oxidativo e melhor desempenho frente à desagregação superficial, contribuindo para a durabilidade da CPA.

Sousa (2024) e Alecrim (2021) indicam que a perda de massa por abrasão, usualmente avaliada por meio do ensaio Cântabro, constitui uma das propriedades mecânicas mais sensíveis em misturas do tipo CPA. Meurer Filho (2001) demonstrou que, para uma mesma granulometria, o teor de ligante exerce influência significativa sobre os teores de vazios totais, vazios comunicantes e sobre as perdas no ensaio Cântabro, observando-se redução progressiva das perdas à medida que o teor de ligante aumenta. Resultados semelhantes são reportados em estudos mais recentes como Sousa (2024), que indicam que teores insuficientes de ligante, abaixo de 4%, embora favoreçam a permeabilidade, comprometem severamente a resistência ao desgaste da mistura.

A influência do método de dosagem e compactação sobre o comportamento resistente da CPA também tem sido objeto de investigação. Watson et al. (2004) compararam misturas dosadas pela metodologia Marshall e *Superpave* e observaram que o método de compactação não alterou de forma significativa os resultados do ensaio Cântabro quando consideradas amostras moldadas com diferentes dimensões. Entretanto, a compactação por meio do compactador giratório Superpave (CGS) pode proporcionar melhor controle da estrutura interna da mistura, favorecendo a uniformidade dos vazios e reduzindo a variabilidade dos resultados de resistência (Del Carpio, 2014; Knabben, 2017).

No que se refere à resistência à tração, pesquisas (Roseno, 2005; Wu et al., 2020; Sousa, 2024), pontam que tanto o teor de vazios quanto o tipo de ligante utilizado exercem influência direta sobre o desempenho mecânico da CPA. Roseno (2005) observou reduções expressivas na resistência à tração indireta em misturas com maiores percentuais de vazios, mesmo quando utilizado ligante modificado, evidenciando a interação existente entre desempenho mecânico e funcionalidade hidráulica. Wu et al., (2020) e Sousa (2024), constataram que aumentos

excessivos no teor de vazios, embora melhorem a drenabilidade, tendem a reduzir a capacidade resistente da camada, exigindo equilíbrio criterioso no projeto da mistura.

Do ponto de vista hidráulico, a CPA tem como principal função a rápida remoção da água da superfície do pavimento, reduzindo a formação da lâmina d'água responsável por fenômenos como hidroplanagem, viscoplanagem, redução de visibilidade devido ao spray e reflexos luminosos noturnos. Guimarães et al. (2013) destacam que essas condições estão diretamente associadas ao aumento do risco de acidentes, justificando o desenvolvimento e a aplicação de misturas asfálticas drenantes em rodovias e vias urbanas de alto volume de tráfego. Sousa (2024) e Garcia (2017) analisam que a eficiência hidráulica da CPA está relacionada não apenas ao teor de vazios, mas principalmente à conectividade e continuidade dos vazios, que governam o escoamento interno da água

A drenabilidade de um pavimento está associada à sua macrotextura e à capacidade de escoamento superficial e interno da água, dependendo da forma, do tamanho e da distribuição dos agregados. Conforme discutido por Momm (1998) o escoamento pode ocorrer tanto entre as rugosidades da superfície quanto sobre elas, dependendo da espessura da lâmina d'água. No campo da avaliação hidráulica, a determinação da permeabilidade de misturas asfálticas porosas é amplamente discutida quanto à representatividade dos métodos empregados. Ensaios laboratoriais tradicionais, baseados na Lei de Darcy e realizados em regime de carga constante ou variável, permitem estimar o coeficiente de permeabilidade vertical em corpos de prova moldados. Contudo, Wu et al. (2020) ressaltam que tais ensaios nem sempre reproduzem fielmente as condições reais de campo, em razão da heterogeneidade estrutural e da anisotropia típica das misturas abertas.

No ambiente de campo, métodos como o permeâmetro de carga variável e o ensaio de condutividade lateral têm sido empregados para estimar a capacidade de escoamento superficial e interno. Li et al. (2023) demonstram que a permeabilidade horizontal, associada ao escoamento lateral da água ao longo da camada porosa, pode apresentar comportamento distinto da permeabilidade vertical medida em laboratório, sendo esta última frequentemente superior aos valores observados em condições reais de serviço. Além disso, os autores evidenciam que a colmatação progressiva altera significativamente os resultados de permeabilidade, reforçando a necessidade de avaliações que considerem o desempenho hidráulico ao longo do tempo.

Dessa forma, a análise hidráulica de pavimentos drenantes deve contemplar tanto ensaios laboratoriais controlados quanto medições in situ, a fim de representar adequadamente o comportamento funcional da camada porosa em serviço (WU et al., 2020; LI et al., 2023). A

avaliação conjunta da permeabilidade inicial e de sua evolução ao longo do tempo é essencial para compreender os efeitos da colmatação e para estimar a vida útil funcional da CPA (Sousa, 2024).

No caso da CPA, a percolação interna desempenha papel fundamental, permitindo que a água seja conduzida lateralmente até os dispositivos de drenagem ou acostamentos, reduzindo significativamente a permanência de água na superfície de rolamento. Em sistemas convencionais de rodovias é comum que o projeto estrutural inclua uma camada impermeável imediatamente abaixo da CPA, associada a um adequado declive transversal, de modo a impedir a infiltração de água nas camadas inferiores e direcionar o fluxo lateralmente até os dispositivos de drenagem (OLIVEIRA et al., 2003; WU et al., 2020). Essa configuração busca preservar a integridade estrutural do pavimento, evitando a saturação da base e do subleito.

Entretanto, configurações alternativas têm sido adotadas em projetos voltados à gestão sustentável de águas pluviais. Nesses casos, a CPA pode ser aplicada sobre camadas granulares também permeáveis, formando um sistema estrutural drenante capaz de armazenar temporariamente volumes de água e promover infiltração gradual no solo ou condução controlada para sistemas de retenção (WU et al., 2020; LI et al., 2023). Apenas abaixo dessas camadas drenantes é que se prevê, quando necessário, uma barreira impermeável ou sistema de drenagem profunda, dependendo dos objetivos hidráulicos do projeto e das condições geotécnicas locais.

Assim, a definição da configuração estrutural associada à CPA depende do contexto funcional do pavimento, seja priorizando exclusivamente a drenagem superficial e proteção estrutural, seja incorporando estratégias de armazenamento e infiltração voltadas ao manejo sustentável das águas pluviais.

2.1.3.2.Normatização

As misturas asfálticas abertas são especificadas de acordo com normas técnicas próprias de cada país, as quais refletem as condições climáticas, os materiais disponíveis e as práticas construtivas locais. No Brasil, as CPA’s são normatizadas pelo DNIT 386/1999, que as definem como misturas asfálticas produzidas à quente, em usina apropriada, composta predominantemente por agregados de graduação descontínua, material de enchimento (fíler) e ligante asfáltico, preferencialmente modificado por polímero do tipo estireno-butadieno-estireno (SBS). Essa norma estabelece ainda critérios específicos para a composição granulométrica da mistura, apresentando cinco faixas granulométricas admissíveis, que visam

assegurar a formação de uma estrutura altamente porosa, com elevada conectividade de vazios, característica fundamental para o desempenho hidráulico da CPA. As referidas faixas granulométricas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da CPA – DNIT 386/1999

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
N° 4	4,8	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	± 5
N° 10	2,0	12-20	5-20	10-18	10-22	10-22	± 5
N° 40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	± 5
N° 80	0,18	-	2-8	-	-	-	± 3
N° 200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	± 2
Ligante polimerizado solúvel no tricloroetileno, %		4,0 - 6,0					± 0,3

Fonte: (DNIT 386, 1999)

De acordo com Tarefder et al. (2019) e Wu et al. (2020) o ligante asfáltico empregado em misturas abertas deve apresentar baixa suscetibilidade térmica, elevada resistência ao envelhecimento oxidativo e capacidade de manter a coesão da mistura mesmo em condições de elevada porosidade. Em razão dessas exigências, as pesquisas recomendam do uso de asfaltos modificados por polímeros (AMP) em camadas porosas de atrito, uma vez que esses ligantes proporcionam maior elasticidade, melhor adesividade ligante–agregado e redução da suscetibilidade à desagregação superficial, fenômeno crítico em misturas com elevado teor de vazios (De Pascale et al., 2023; Tarefder *et al.*,2019).

No Brasil, a especificação DNIT 129/2011 classifica os ligantes asfálticos modificados por polímeros elastoméricos de acordo com o ponto de amolecimento e a recuperação elástica a 25 °C, enquadrando-os nas classes 55/75-E, 60/85-E e 65/90-E. Embora a norma DNIT 386/1999 estabeleça de forma geral o uso de ligante asfáltico modificado por polímero do tipo SBS para misturas CPA, estudos aplicados ao contexto brasileiro indicam que nem todas as classes de AMP apresentam comportamento equivalente para esse tipo de mistura. Ceratti et al. (2015) destacam que, entre os AMPs disponíveis no mercado nacional, os ligantes 60/85-E e 65/90-E são os mais indicados para aplicação em CPA, em função do melhor equilíbrio entre rigidez em altas temperaturas, elasticidade e resistência à desagregação.

A escolha do ligante assume papel ainda mais relevante em CPAs devido à elevada porosidade da mistura e à reduzida área de contato entre ligante e agregados, o que intensifica os efeitos do envelhecimento e da ação da água. Wu et al. (2020) afirmam que ligantes com maior recuperação elástica e maior resistência ao envelhecimento contribuem para a melhoria da durabilidade funcional da CPA, sobretudo no que se refere à redução das perdas por abrasão e à manutenção da integridade superficial ao longo do tempo.

Outro ponto importante no desempenho final das misturas tipo CPA é o processo de produção. Alvarez et al. (2008) ressaltam a necessidade de controle rigoroso das temperaturas de usinagem, transporte e compactação, especialmente quando se utilizam ligantes modificados por polímeros, os quais apresentam viscosidade superior à dos ligantes convencionais. O descontrole térmico pode comprometer a trabalhabilidade da mistura, prejudicar o recobrimento dos agregados e favorecer fenômenos como segregação e desagregação precoce.

A norma DNIT 386/1999 estabelece ainda critérios específicos de desempenho para o projeto de misturas do tipo CPA, os quais visam assegurar tanto a funcionalidade hidráulica quanto um nível mínimo de resistência mecânica. Entre os principais requisitos normativos, destacam-se os limites para volume de vazios, resistência à abrasão e resistência à tração por compressão diametral, apresentados no Quadro 2.

Quadro 1: Especificações para mistura do tipo CPA, de acordo com DNIT 386/1999

Propriedades	**Limites**
Volume de vazios	18% a 25%
Desgaste à Abrasão Los Angeles, Ensaio de Cântabro	Máx. 25%
Resistência à Tração por Compressão Diametral, à 25°C	Mín. 0,55 MPa

Nos Estados Unidos, o projeto e a avaliação de misturas asfálticas abertas destinadas ao uso como camada de atrito são orientados pela especificação ASTM D7064 (2021), que adota uma abordagem fundamentada em parâmetros volumétricos e funcionais para a dosagem da mistura. Essa norma estabelece o atendimento a valores mínimos de volume de vazios e o controle do escorrimento do ligante, além de admitir a aplicação de ensaios complementares, como a perda por abrasão Cântabro e o dano por umidade induzida pelo método Lottman Modificado, a fim de avaliar o desempenho das misturas porosas. Os valores de referência associados a esses parâmetros encontram-se apresentados no Quadro 3.

Quadro 2:Especificações para mistura do tipo CPA, de acordo com ASTM D7064

Propriedades	**Limites**
Volume de vazios	Mín. 18%
Escorrimento	Máx. 0,3%
Desgaste à Abrasão Los Angeles – Ensaio de Cântabro (opcional)	Máx. 20%
Dano por Umidade Induzida – *Lottman* Modificado (opcional)	Mín. 80%

A ASTM D7064 não impõe a utilização de ligantes asfálticos modificados por polímeros. No entanto, tanto a literatura técnica quanto a experiência acumulada na prática norte-americana indicam que misturas produzidas com esse tipo de ligante apresentam comportamento superior, especialmente no que se refere à resistência à desagregação superficial e à estabilidade durante a fase de produção. Nesse contexto, Wurst e Putman (2013) explicam que o uso disseminado de ligantes modificados por polímero do tipo SBS em camadas porosas de atrito nos EUA decorre da sua eficácia em mitigar problemas típicos de misturas altamente permeáveis, como o escorrimento do ligante e o desgaste prematuro da superfície.

Um aspecto distintivo entre as especificações brasileira e norte-americana está associado à metodologia de dosagem. Enquanto a DNIT 386/1999 recomenda o método Marshall, baseado em compactação por impacto, a ASTM D7064 adota o Compactador Giratório Superpave (CGS) como ferramenta para definição do teor ótimo de ligante, priorizando a análise das propriedades volumétricas da mistura. Essa escolha reflete a premissa de que o CGS proporciona uma representação mais fiel das condições de compactação observadas em campo, permitindo maior controle da estrutura interna da mistura porosa.

Diferenças também são observadas nos limites prescritos para parâmetros comuns às duas especificações. Enquanto a DNIT 386/1999 estabelece uma faixa de volume de vazios compreendida entre 18% e 25%, a ASTM D7064 fixa apenas um valor mínimo de 18%, permitindo maior flexibilidade na concepção da granulometria da mistura, desde que os demais critérios de desempenho sejam atendidos. Essa abordagem evidencia uma orientação mais voltada ao desempenho funcional da camada porosa do que ao atendimento de limites prescritivos rígidos.

De maneira geral, a ASTM D7064/21 apresenta uma estrutura normativa mais abrangente quando comparada à especificação brasileira vigente, para a avaliação de misturas porosas. A inclusão de ensaios adicionais possibilita uma análise mais completa do

comportamento da mistura, fornecendo informações relevantes tanto sobre sua estabilidade durante a produção quanto sobre sua resistência à ação da umidade em serviço.

Outro ponto que merece destaque refere-se à atualização das especificações. A norma norte-americana passou por revisão recente, em 2021, incorporando avanços decorrentes de pesquisas desenvolvidas nas últimas décadas. Em contraste, a norma brasileira aplicada às CPAs permanece inalterada desde 1999, período no qual houve evolução significativa dos materiais asfálticos e das técnicas de dosagem e controle tecnológico, o que reforça a necessidade de sua revisão.

Diante disso, é notório que a adoção do Compactador Giratório Superpave e de ensaios complementares previstos na ASTM D7064 tende a proporcionar um projeto de mistura mais consistente e representativo das condições reais de serviço. No contexto brasileiro, uma abordagem integrada que combine as vantagens da metodologia norte-americana com o atendimento aos requisitos estabelecidos pela DNIT 386/1999 mostra-se como alternativa tecnicamente adequada, permitindo conciliar inovação metodológica com conformidade normativa.

2.2.Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

O Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) corresponde ao material proveniente da fresagem de camadas asfálticas existentes, sendo composto predominantemente por agregados minerais revestidos por ligante asfáltico envelhecido. Diferentemente de um resíduo granular convencional, o RAP constitui um sistema compósito cuja resposta mecânica depende simultaneamente das propriedades do esqueleto mineral e das características reológicas do ligante oxidado aderido aos agregados (ZAUMANIS; MALLICK; FRANK, 2020). Essa natureza multifásica impõe ao projeto de misturas recicladas uma abordagem distinta daquela adotada para misturas produzidas exclusivamente com materiais virgens.

O envelhecimento do ligante presente no RAP ocorre durante a vida útil do pavimento original, em função da oxidação térmica e fotoquímica, bem como da volatilização de frações leves. Esse processo altera a estrutura coloidal do ligante, promovendo aumento da fração de asfaltenos e redução da fração maltenos, o que resulta em incremento do módulo complexo ($|G^*|$), redução do ângulo de fase (δ) e elevação da viscosidade (AL-QADI et al., 2007). Essas modificações implicam comportamento mais rígido e menor capacidade de dissipação de

energia, podendo favorecer a resistência à deformação permanente, mas também aumentar a suscetibilidade à fissuração por fadiga ou por contração térmica.

Melo Neto (2022), ao avaliarem misturas asfálticas contendo diferentes teores de RAP sob distintas metodologias de dosagem, verificaram que o ligante envelhecido exerce influência direta na resposta mecânica da mistura final. O autor observou um aumento do módulo resiliente da ordem de 20% a 40%, bem como melhoria na resistência à deformação permanente em ensaios de trilha de roda com o incremento do teor de RAP, resultado associado à maior rigidez proporcionada pelo ligante oxidado presente no material reciclado. De maneira convergente, Aurangzeb et al. (2021) reportaram que teores moderados de RAP podem proporcionar reduções na profundidade de trilha de roda entre aproximadamente 15% e 30%, indicando maior resistência à deformação permanente, especialmente em condições de temperatura elevada.

Entretanto, Zaumanis et al. (2021) destacam que o aumento da rigidez decorrente da incorporação de RAP pode afetar negativamente o comportamento à fadiga e o desempenho em baixas temperaturas quando o teor de material reciclado é elevado. Segundo os autores, esse efeito está associado ao envelhecimento do ligante presente no RAP, podendo resultar em reduções na vida de fadiga da ordem de 20% a 50% caso não sejam adotadas estratégias de compatibilização, como o ajuste do grau PG do ligante virgem ou o uso de agentes rejuvenescedores.

Outro aspecto intrínseco ao RAP é sua elevada variabilidade. Copeland (2011) destaca que a heterogeneidade do material fresado, em termos de origem, espessura da camada removida, histórico de manutenção e composição do ligante, pode resultar em significativa dispersão de propriedades granulométricas e reológicas. Al-Qadi et al. (2012; 2015) reforçam que essa variabilidade constitui um dos principais empecilhos à ampliação do uso de teores elevados de RAP, sobretudo em camadas superficiais sujeitas a solicitações críticas. Ferreira (2023), ao sistematizar essas discussões no contexto brasileiro, ressalta que órgãos rodoviários ainda demonstram cautela na incorporação de RAP em camadas de rolamento, justamente devido à incerteza associada ao comportamento do ligante envelhecido e à ausência de padronização plena na sua caracterização.

No âmbito do projeto de mistura, a discussão técnica mais relevante refere-se aos cenários de mistura entre o ligante envelhecido do RAP e o ligante virgem adicionado. McDaniel et al. (2000) foram pioneiros na formalização experimental dessa problemática ao compararem três hipóteses distintas: (i) o cenário de “rocha negra” (black rock), no qual o

ligante do RAP é considerado inativo e o material se comporta como agregado revestido; (ii) o cenário de disponibilidade total (full availability), em que 100% do ligante envelhecido é assumido como ativo na nova mistura; e (iii) a hipótese intermediária de mistura parcial (partial blending). Al-Qadi et al. (2007; 2009) aprofundaram essa discussão, demonstrando que o grau de interação entre ligantes depende da temperatura de mistura, do tempo de aquecimento e das características do ligante virgem.

Estudos mais recentes, como os de Kaseer et al. (2019) e Lo Presti et al. (2019) indicam que, em condições usuais de produção em usinas de mistura a quente, o comportamento predominante é o de mistura parcial. Nessa condição, apenas uma fração do ligante envelhecido é efetivamente mobilizada e interage com o ligante virgem, o que implica que a simples subtração do teor total de ligante do RAP no cálculo do teor virgem pode conduzir a erros de dosagem. Ferreira (2023) enfatiza que a adoção de hipóteses inadequadas quanto ao grau de ativação pode resultar em misturas com teor efetivo de ligante inferior ao necessário, aumentando a rigidez e reduzindo a durabilidade.

A literatura também evidencia que a limitação de teores de RAP em camadas superficiais constitui prática consolidada em diversos países. Noferini et al. (2017) relatam que a incorporação de RAP em camadas de rolamento costuma ser restringida a faixas entre 10% e 30%, especialmente em vias de tráfego intenso, como forma de mitigar riscos associados à fissuração e à perda de desempenho a longo prazo. Essa limitação decorre do entendimento de que camadas superficiais estão mais expostas a ciclos térmicos, ação da água e solicitações repetidas, sendo particularmente sensíveis ao aumento da rigidez promovido pelo ligante envelhecido.

Assim, a contextualização técnica do RAP evidencia que sua utilização segura depende de três fatores fundamentais: (i) caracterização detalhada do ligante envelhecido e do esqueleto mineral; (ii) definição explícita do cenário de mistura entre ligantes, considerando a possibilidade real de mistura parcial; e (iii) limitação criteriosa dos teores empregados em camadas superficiais, especialmente quando o desempenho à fadiga e à fissuração térmica é determinante. A compreensão integrada desses aspectos é essencial para que o RAP seja incorporado não apenas como alternativa econômica, mas como material estruturalmente viável dentro dos critérios de desempenho contemporâneos da engenharia de pavimentos.

2.2.1. Benefícios da incorporação do RAP

A incorporação de RAP em misturas asfálticas representa uma das estratégias mais consolidadas na engenharia de pavimentos contemporânea, não apenas como alternativa de

reaproveitamento de materiais, mas como abordagem integrada de otimização estrutural, racionalização de recursos e mitigação de impactos ambientais. Quando adequadamente caracterizado e incorporado sob critérios mecanísticos de projeto, o RAP pode contribuir positivamente para o desempenho da mistura, ao mesmo tempo em que promove ganhos econômicos e ambientais mensuráveis (ZAUMANIS; MALLICK, 2015; AURANGZEB et al., 2021).

Do ponto de vista estrutural, o principal efeito associado à presença do RAP está relacionado ao aumento da rigidez da mistura decorrente da incorporação do ligante envelhecido. Esse incremento de rigidez tende a elevar a resistência da mistura à deformação permanente, especialmente sob temperaturas elevadas e condições de tráfego intenso. Aurangzeb et al. (2021) demonstraram que misturas contendo teores moderados de RAP apresentaram desempenho superior em ensaios de trilha de roda quando comparadas a misturas convencionais, resultado atribuído à maior resistência ao cisalhamento proporcionada pelo ligante oxidado. Mogawer et al. (2015) observaram comportamento semelhante, indicando que a incorporação controlada de RAP pode aumentar a estabilidade estrutural sem comprometer o desempenho global, desde que o teor seja compatível com o nível de solicitação previsto para a camada.

Esse ganho estrutural não deve ser interpretado de forma isolada, mas como resultado da interação entre ligante envelhecido e ligante virgem no interior da mistura. Zaumanis, Mallick e Frank (2020) destacam que, sob hipóteses realistas de mistura parcial entre ligantes, a contribuição do RAP pode ser incorporada ao projeto como incremento de módulo, o que pode ser vantajoso em camadas sujeitas a elevadas tensões de compressão. Quando o projeto contempla ajuste adequado do grau de desempenho (PG) do ligante virgem ou o uso de rejuvenescedores, é possível equilibrar rigidez e capacidade de deformação, mantendo níveis satisfatórios de resistência à fadiga (ZAUMANIS et al., 2021).

No âmbito econômico, a utilização do RAP promove redução direta na demanda por agregados naturais e, sobretudo, por ligante virgem, componente que representa a parcela mais onerosa da mistura asfáltica. Zaumanis et al. (2015) demonstraram que o aumento do teor de RAP resulta em diminuição progressiva do custo de produção, sendo a economia particularmente sensível à redução do consumo de cimento asfáltico. Ferreira (2023), ao avaliar cenários de incorporação com diferentes percentuais de RAP, evidenciou que a economia potencial está diretamente associada à substituição parcial do ligante virgem, o que impacta

significativamente o custo final da mistura, especialmente em contextos de volatilidade no preço do petróleo.

Além da dimensão econômica, os benefícios ambientais do RAP são amplamente documentados por estudos baseados em Análise do Ciclo de Vida (ACV). De Pascale et al. (2023) demonstraram que misturas contendo RAP apresentam redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa e no consumo energético quando comparadas a misturas produzidas exclusivamente com materiais virgens. Essa redução decorre principalmente da menor necessidade de produção de ligante asfáltico e da diminuição na extração e no transporte de agregados naturais. Zaumanis e Mallick (2015) reforçam que a reutilização do ligante envelhecido representa uma das estratégias mais eficazes para redução da pegada de carbono no setor de pavimentação, sobretudo quando associada a práticas de produção otimizadas.

Outro aspecto relevante diz respeito à gestão sustentável de resíduos. Copeland (2011) destaca que o reaproveitamento do material fresado reduz a necessidade de disposição em aterros e contribui para fechamento do ciclo de materiais na infraestrutura rodoviária. Ferreira (2023) enfatiza que, em cenários de restrição ambiental à exploração de novas jazidas, o uso do RAP assume papel estratégico na preservação de recursos naturais e na viabilidade de programas de manutenção e reabilitação em larga escala.

Adicionalmente, a integração do RAP com tecnologias complementares, como misturas mornas (Warm Mix Asphalt – WMA), potencializa os benefícios energéticos. Mogawer et al. (2015) demonstraram que a combinação entre RAP e redução de temperatura de mistura permite diminuir o consumo energético durante a produção e reduzir emissões associadas ao aquecimento dos materiais, ampliando o alcance ambiental da reciclagem.

Assim, os benefícios do uso do RAP transcendem a simples redução de custos, configurando-se como estratégia técnica capaz de promover desempenho estrutural adequado, economia de insumos críticos e mitigação de impactos ambientais. Esses ganhos, entretanto, estão condicionados à correta caracterização do material, à definição explícita do cenário de interação entre ligantes e à compatibilização entre teor de RAP e função estrutural da camada. A compreensão desses fatores é fundamental para que os benefícios identificados sejam efetivamente materializados em campo.

2.2.2. Limitações e desafios da incorporação de RAP

A incorporação de Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) em misturas asfálticas envolve desafios técnicos que decorrem principalmente da heterogeneidade do material fresado e das alterações reológicas do ligante envelhecido. Copeland (2011) destaca que o RAP pode

apresentar significativa variabilidade granulométrica e no teor de ligante, em função da origem da camada removida, do histórico de intervenções e das condições ambientais às quais o pavimento esteve submetido. Essa variabilidade compromete a uniformidade do material e impõe a necessidade de protocolos rigorosos de amostragem, fracionamento e controle tecnológico.

No contexto nacional, Ferreira (2023) observa que coeficientes de variação elevados são recorrentes tanto para o teor de ligante quanto para propriedades reológicas do ligante recuperado. Essa dispersão influencia diretamente o dimensionamento da mistura e pode conduzir a desvios no teor efetivo de ligante quando não há caracterização adequada. A autora enfatiza que a confiabilidade do desempenho da mistura reciclada depende da capacidade de transformar essa variabilidade em parâmetros controláveis de projeto.

Outro aspecto crítico refere-se ao envelhecimento oxidativo do ligante presente no RAP. Al-Qadi et al. (2007) demonstram que a oxidação promove aumento da fração de asfaltenos e redução da ductilidade, resultando em ligante mais rígido e menos capaz de dissipar tensões. Embora esse endurecimento possa contribuir para maior resistência à deformação permanente, ele eleva a suscetibilidade à fissuração por fadiga e à fissuração térmica, sobretudo quando o teor de RAP é elevado e não há ajuste adequado do ligante virgem.

A definição do cenário de interação entre o ligante envelhecido e o ligante virgem constitui outro ponto central. McDaniel et al. (2000) demonstraram que hipóteses, como rocha negra, disponibilidade total ou mistura parcial, produzem composições com teores efetivos de ligante significativamente diferentes. Al-Qadi et al. (2009) reforçam que o grau de ativação do ligante do RAP depende de variáveis como temperatura de mistura e tempo de aquecimento, não sendo tecnicamente consistente assumir, de forma generalizada, que todo o ligante envelhecido participa ativamente da nova matriz asfáltica.

Ferreira (2023) destaca que a adoção de hipóteses simplificadas pode resultar em misturas excessivamente rígidas, com teor efetivo de ligante inferior ao necessário para garantir durabilidade. Essa condição é particularmente crítica em camadas sujeitas a solicitações repetidas, nas quais a capacidade de acomodação de deformações é determinante para a vida útil do pavimento.

Nas camadas de rolamento, os desafios tornam-se ainda mais sensíveis. Noferini et al. (2017) indicam que a incorporação de RAP em camadas superficiais costuma ser limitada a faixas entre 10% e 30%, especialmente em vias de tráfego intenso. Essa limitação está associada ao fato de que camadas superiores estão mais expostas a ciclos térmicos, ação da água e tensões

repetidas, sendo particularmente vulneráveis ao aumento de rigidez promovido pelo ligante envelhecido.

Adicionalmente, a presença de aditivos no pavimento original pode dificultar o reaproveitamento do material. Brown et al. (2009) apontam que misturas previamente modificadas com polímeros ou borracha podem apresentar comportamento reológico complexo quando recicladas, exigindo avaliação específica do ligante recuperado. Mirhosseini et al. (2018) complementam que diferentes métodos de extração e recuperação de ligante podem influenciar os parâmetros reológicos medidos, afetando a interpretação do desempenho potencial da mistura reciclada.

Assim, os desafios associados ao uso do RAP não se relacionam à inviabilidade técnica do material, mas à necessidade de controle rigoroso e definição clara de premissas de projeto. A incorporação segura do RAP exige caracterização detalhada, consideração explícita do cenário de mistura entre ligantes e compatibilização entre teor de reciclagem e função estrutural da camada. Conforme sintetizado por Ferreira (2023), o avanço do uso do RAP depende da consolidação de métodos que reduzam incertezas e permitam previsibilidade de desempenho a longo prazo.

2.6.Camada Porosa de Atrito com incorporação de RAP

A incorporação de material fresado de pavimentos asfálticos (RAP) em Camadas Porosas de Atrito (CPA) tem sido objeto de crescente investigação científica nos últimos anos, em razão do potencial de redução de impactos ambientais e de custos de produção, aliado à necessidade de manutenção do desempenho funcional característico desse tipo de revestimento. Diferentemente das misturas densas convencionais, a CPA apresenta elevada porosidade e reduzida área de contato ligante–agregado, o que torna o equilíbrio entre propriedades mecânicas e hidráulicas ainda mais crítico quando se introduz um material contendo ligante envelhecido, como o RAP (Wu et al., 2020).

Entretanto, a literatura também aponta que o aumento excessivo da rigidez decorrente da incorporação do RAP pode induzir comportamento mais frágil, sobretudo em misturas com elevados índices de vazios. Melo Neto (2022) ressalta que a simples substituição parcial de agregados por RAP, sem ajustes no ligante virgem ou sem a adoção de estratégias de compensação, pode comprometer a durabilidade de misturas asfálticas densas. Esse aspecto torna-se ainda mais relevante quando se considera sua aplicação em camadas porosas de atrito, uma vez que essas misturas apresentam resistência mecânica naturalmente inferior à das

misturas densas. Assim, a incorporação de RAP em CPA pode intensificar problemas associados à desagregação e à perda de durabilidade caso não haja adequada compatibilização entre os materiais constituintes (Wu et al., 2020; Zaumanis et al., 2021).

No contexto brasileiro, Alecrim (2021) contribui de forma significativa para essa discussão ao avaliar experimentalmente a utilização de CPA em vias do meio urbano, incluindo misturas com incorporação de material fresado. A autora observou que a adição de 15% de RAP não provocou perda significativa de desempenho funcional quando comparada à mistura de referência, evidenciando a viabilidade técnica da reciclagem nesse tipo de revestimento. Contudo, os resultados de resistência à tração indireta reportados no estudo situaram-se em torno de 0,47 MPa, valor inferior ao mínimo estabelecido pela norma brasileira, o que reforça a necessidade de ajustes criteriosos no projeto da mistura quando se busca conciliar funcionalidade hidráulica e requisitos mecânicos (Alecrim, 2021).

No que se refere à resistência à abrasão, Melo Neto (2025) observou que misturas densas contendo RAP podem apresentar desempenho equivalente ou superior ao das misturas convencionais. Segundo os autores, a maior rigidez do sistema ligante–agregado proporcionada pelo RAP, quando adequadamente balanceada, pode reduzir a perda de material no ensaio Cântabro. Todavia, teores elevados de RAP ou controle inadequado da fração fina tendem a intensificar a perda por abrasão, evidenciando novamente a importância do controle granulométrico e do teor efetivo de ligante. Esse mesmo comportamento é esperado na adição de RAP a CPA.

Quanto as propriedades hidráulicas, a incorporação de RAP em CPA impõe desafios adicionais relacionados à manutenção da permeabilidade e da conectividade dos vazios. Estudos indicam que a presença de partículas finas provenientes do RAP pode reduzir a porosidade efetiva da mistura, afetando negativamente sua drenabilidade, mesmo quando o teor total de vazios permanece dentro dos limites normativos (Wu et al., 2020; Gárcia, 2017). Alecrim (2021) ressalta que a redução dos vazios comunicantes é particularmente prejudicial para o desempenho hidráulico de CPAs, uma vez que compromete o escoamento interno da água.

A previsibilidade de desempenho de misturas asfálticas recicladas depende de uma caracterização rigorosa do material fresado, incluindo avaliação de variabilidade, granulometria e teor de ligante envelhecido, além do entendimento de como esse ligante remanescente contribui para a resposta final da mistura reciclada (Melo Neto, 2022a). No caso específico de CPAs, a preservação das propriedades hidráulicas não pode ser inferida apenas a partir do teor

global de vazios, exigindo avaliação da estrutura interna e do comportamento funcional em campo, como demonstrado por Alecrim (2021). Em perspectiva internacional, Wu et al. (2020) e Zhang et al. (2021) reforçam que, em misturas abertas, a conectividade dos vazios e a presença de frações finas exercem papel determinante sobre a permeabilidade e sua degradação ao longo do tempo por colmatação, exigindo controle granulométrico e avaliação funcional contínua.

Dessa forma, Zaumanis et al. (2021) e Mogawer et al. (2015) demonstram que a incorporação de RAP em misturas asfálticas é tecnicamente viável, desde que sejam adotados critérios específicos de projeto que considerem simultaneamente as propriedades mecânicas e hidráulicas da mistura. No caso de misturas abertas, Wu et al. (2020) ressaltam que o equilíbrio entre rigidez, resistência à abrasão, resistência à tração, teor de vazios e permeabilidade constitui o principal desafio no desenvolvimento desse tipo de revestimento. Nesse contexto, a presente dissertação se propõe a contribuir para o avanço do conhecimento sobre CPA com RAP, avaliando de forma integrada os efeitos do material fresado sobre o desempenho mecânico e funcional da mistura, considerando materiais e condições representativas da realidade brasileira.

2.7.Considerações finais

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo permitiu contextualizar, de forma sistemática, os principais conceitos, técnicas e avanços relacionados às misturas asfálticas porosas, com ênfase na Camada Porosa de Atrito, bem como nos desafios e potencialidades associados à incorporação de material fresado de pavimentos asfálticos. A revisão evidenciou que as CPA desempenham papel fundamental na segurança e funcionalidade dos pavimentos, sobretudo pela capacidade de reduzir a lâmina d'água superficial, mitigar riscos de aquaplanagem e melhorar condições de conforto e visibilidade. Essas vantagens, entretanto, estão diretamente condicionadas à manutenção de uma estrutura porosa adequada, caracterizada não apenas por elevados teores de vazios, mas, principalmente, pela conectividade entre eles.

Do ponto de vista tecnológico, observou-se que as CPA apresentam comportamento distinto das misturas densas, tanto no que se refere à dosagem quanto à avaliação de desempenho. A literatura indica que parâmetros tradicionalmente utilizados em misturas convencionais não são suficientes para descrever o comportamento funcional e mecânico das misturas porosas, tornando necessária a análise integrada de propriedades volumétricas, hidráulicas e resistentes. Ensaios como volume de vazios, vazios comunicantes, permeabilidade, abrasão por Cântabro, resistência à tração e dano por umidade induzida se

mostram essenciais para a compreensão do desempenho dessas misturas ao longo da vida de serviço.

As pesquisas evidenciaram que a incorporação de RAP em misturas asfálticas tem se consolidado como uma estratégia relevante do ponto de vista ambiental, econômico e técnico. Entretanto, no caso específico das CPA, a utilização de RAP impõe desafios adicionais, sobretudo em função da heterogeneidade do material fresado, da presença de finos e da contribuição do ligante envelhecido, que tende a aumentar a rigidez da mistura. Embora esse aumento de rigidez possa resultar em ganhos de resistência inicial, a literatura aponta que ele pode comprometer aspectos relacionados à durabilidade e ao desempenho em longo prazo, especialmente quando não há controle adequado do material ou estratégias específicas de ajuste do ligante.

Outro ponto recorrente, é a limitação de estudos voltados especificamente à aplicação de RAP em CPA, sobretudo sob a ótica do desempenho hidráulico associado à conectividade dos vazios. Grande parte das pesquisas concentra-se em misturas densas, enquanto os trabalhos sobre misturas porosas ainda são relativamente escassos e, em muitos casos, apresentam resultados divergentes, reforçando a necessidade de investigações experimentais que considerem simultaneamente funcionalidade drenante e comportamento mecânico. Adicionalmente, observou-se que as especificações normativas disponíveis, especialmente no contexto brasileiro, não acompanham plenamente os avanços recentes da pesquisa, o que amplia a importância de estudos que forneçam subsídios técnicos para futuras revisões.

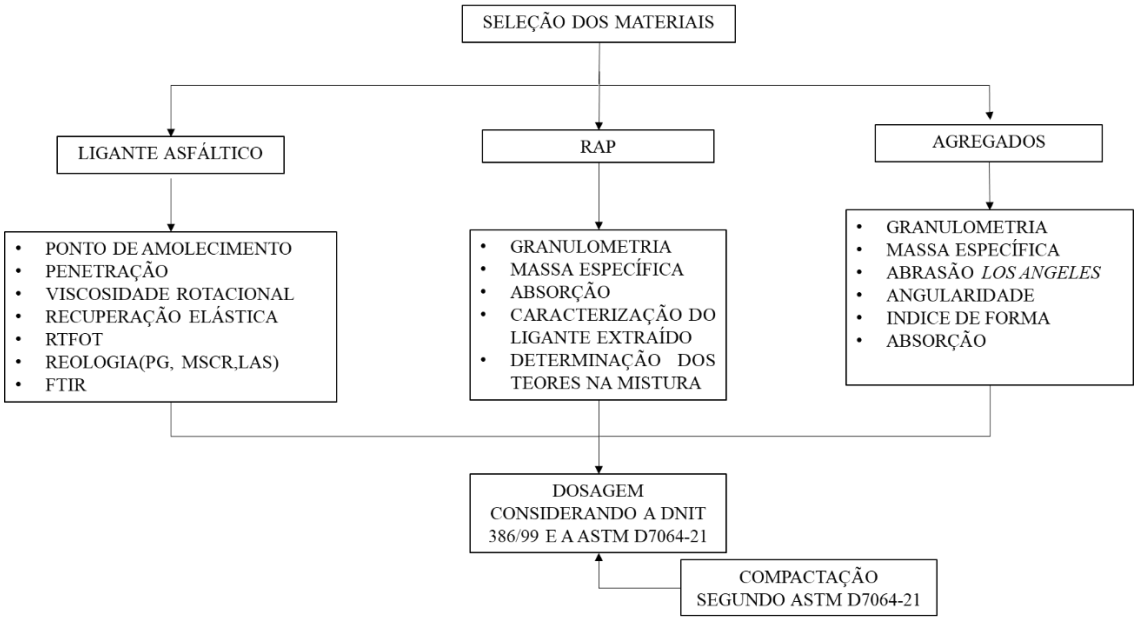
Diante desse cenário, o tema proposto nesta dissertação se justifica pela necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o comportamento de CPA com incorporação de RAP, avaliando de forma integrada os efeitos dessa adição sobre a estrutura de vazios, a capacidade de drenagem e o desempenho mecânico das misturas. Ao explorar essa temática, busca-se contribuir para a ampliação do uso de materiais reciclados em pavimentação, sem prejuízo das propriedades funcionais essenciais das camadas porosas, fornecendo informações técnicas que auxiliem o projeto, a dosagem e a aplicação prática desse tipo de revestimento em condições reais de serviço.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais desenvolvidos nesta pesquisa, onde serão descritos os aspectos referentes aos materiais selecionados e aos métodos e especificações empregados para a realização dos ensaios de caracterização física dos agregados, caracterização física dos ligantes, além da caracterização mecânica e hidráulica das misturas asfálticas.

A primeira etapa do trabalho consistiu na caracterização física dos agregados e do ligante, fornecendo base técnica para a realização da dosagem. Para esse procedimento, foram adotados como parâmetros os limites estabelecidos pela norma DNIT 386/1999, sendo a moldagem dos corpos de prova realizada por meio do Compactador Giratório Superpave (CGS), conforme esquematizado na Figura 1.

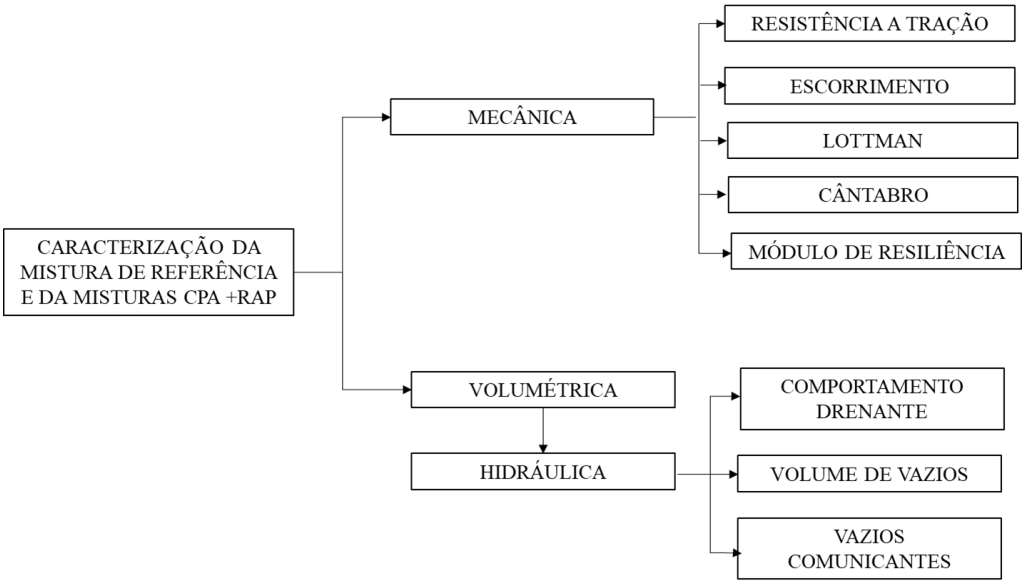
Figura 1:Esquematização da primeira etapa da pesquisa



Fonte: (Autor, 2026)

Na segunda etapa foi realizada a caracterização funcional e mecânica das misturas com teor ótimo de ligante encontrado na dosagem e das misturas com adição de RAP. O programa experimental seguido, está detalhado na Figura 2.

Figura 2:Esquematização da segunda etapa da pesquisa



Fonte: (Autor, 2026)

Para a realização de todas as etapas, essa pesquisa seguiu o estabelecido pelas normas regulamentadoras, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, da American Society for Testing Materials – ASTM, do DNIT e da AASHTO. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia dos Pavimentos (LEP) – UAEC/UFCG.

3.1.Materiais

3.1.1. Ligante Asfáltico: AMP 55/75

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o AMP 55/75 modificado por 3% de polímero SBS, fornecido pela Installe Engenharia, com sede em Maracanaú, Ceará. O uso de ligante modificado segue o previsto na norma DNIT 386/1999. O AMP 55/75 foi escolhido, em detrimento aos demais tipos de AMP, por ser o ligante modificado comumente utilizado no nordeste brasileiro.

3.1.2. Agregados

Os agregados graníticos utilizados foram: Brita 19 mm, Brita 12,5 mm e Pó de Pedra. Esses foram fornecidos pela empresa Rocha Cavalcante, oriundos de pedreira própria com sede em Campina Grande – PB. O fíler utilizado nesta pesquisa foi a cal hidratada, proveniente do comércio local.

3.1.3. RAP

O RAP utilizado nesta pesquisa foi proveniente de uma operação de fresagem realizada em uma rodovia brasileira localizada no Km 15 da BR230, na região metropolitana de João Pessoa, na Paraíba, Nordeste do Brasil, caracterizada por clima tropical e elevadas temperaturas durante o verão.

3.2.Métodos

3.2.1. Caracterização física e reológica do ligante

A Tabela 2 apresenta a caracterização física e reológica do ligante, bem como as normas referentes a cada ensaio e seus limites. Os ensaios de caracterização física do ligante, foram repetidos após o envelhecimento, por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e ar sobre uma película de material asfáltico de cada mistura, em movimento, por meio do Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT). Este procedimento é útil na identificação de possíveis mudanças nas propriedades do ligante que podem ocorrer durante a usinagem a 150°C. Os resultados foram utilizados para verificar se o ligante atende aos requisitos para utilização nesta pesquisa.

Tabela 2: Caracterização do ligante AMP 55/75 utilizado nesta pesquisa.

ENSAIO	NORMA	LIMITE	RESULTADO
Ponto de Amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	mín. 55	62,0
Penetração (mm)	ABNT NBR 6576	45-70	60,7
Recuperação Elástica (%)	ABNT NBR 15086	mín. 75	86,5
Viscosidade Rotacional			
Temperatura 135 ° C (cP)	ABNT NBR 15184	máx. 3000	1073,1
Temperatura 150 ° C (cP)		máx. 2000	146,4
Temperatura 177 ° C (cP)		máx. 1000	177
RTFOT	ASTM D 2872		
Perda de Massa (%)		máx. 1,0	0,354
Penetração Retida (%)	ABNT NBR 6576		73,18
Variação do Ponto de Amolecimento (ºC)	ABNT NBR 6560	-5 a +7	+3
Recuperação Elástica Retida (%)	ABNT NBR 15086	mín. 80	80
PG (ºC)	AASHTO M 320	-	76

MSCR	$\mathbf{R_{0,1}}$ **(%)**	ASTM D7405:2020	-	61,83
	$\mathbf{R_{3,2}}$ **(%)**		-	41,26
	$\mathbf{R_{diff}}$ **(%)**		-	33,27
	$\mathbf{Jnr_{0,1}}$ **(kPa^{-1})**		-	0,657
	$\mathbf{Jnr_{3,2}}$ **(kPa^{-1})**		-	1,19
	$\mathbf{Jnr_{diff}}$ **(%)**		-	81,60

Os resultados da Tabela 2 indicam que a temperatura de ponto de amolecimento está acima do mínimo exigido, atingindo 62°C, esse resultado indica que o ligante apresenta boa resistência em temperaturas elevadas, ponto que contribui para a durabilidade do pavimento. A variação da temperatura após o envelhecimento está dentro dos limites aceitáveis, entre -5 e +7 ºC, portanto o ligante apresenta estabilidade térmica, sem grandes mudanças na sua consistência após o envelhecimento.

Quanto ao valor de penetração, 60,7mm, está dentro do intervalo especificado para um AMP 55/75, que é entre 45 e 70 mm, sugerindo uma consistência adequada do ligante para fornecer flexibilidade e resistência ao tráfego. A penetração retida de 73,18% sinaliza que o ligante é capaz de preservar suas propriedades elásticas após o envelhecimento.

Com relação ao resultado obtido no ensaio de recuperação elástica (86,5%), concluiu-se que o ligante possui boa capacidade de retornar à sua forma original após deformação, evitando assim problemas como rachaduras e deformações permanentes. Essa característica é mantida mesmo após o envelhecimento, com valor de recuperação elástica retida de 80%. Além disso, a baixa perda de massa após o RTFO mostra que o ligante apresenta boa resistência à volatilização dos compostos após o envelhecimento.

A temperatura de PG de 76 ºC indica o limite de temperatura em que o ligante pode ser utilizado sem comprometer suas propriedades, portanto é um ligante apropriado para climas quentes. Já os resultados do MSCR indicam boa resistência a deformações permanentes e boa capacidade de recuperação após aplicação de tensões repetidas.

Diante dos bons resultados observados na Tabela 2, concluiu-se que o ligante asfáltico analisado possui boas propriedades reológicas e de resistência ao envelhecimento, bem como adequada elasticidade e estabilidade térmica. Assim, foi possível atestar a viabilidade do uso do ligante asfáltico na produção das misturas asfálticas, já que os limites impostos pelas normativas foram atendidos.

3.2.2. Caracterização dos agregados

Os ensaios empregados na caracterização dos agregados, bem como os respectivos resultados obtidos, encontram-se apresentados na Tabela 3. Essa etapa de caracterização é fundamental para avaliar a adequação dos materiais à produção de misturas asfálticas, assegurando o atendimento aos requisitos normativos e às exigências de desempenho. Além disso, os parâmetros determinados nos ensaios são essenciais para o processo de dosagem, uma vez que são utilizados na definição do teor de projeto do ligante asfáltico.

Tabela 3:Ensaios e resultados da caracterização dos agregados

ENSAIOS	NORMA	LIMITES	BRITA 19mm	BRITA 12,5mm	PÓ DE PEDRA
Massa Específica Real (g/cm³)	DNIT 195 (1997) e DNIT 084 (1995)	-	2,78	2,77	2, 47
Massa Específica Aparente (g/cm³)		-	2,76	2,74	2,49
Absorção (%)		≤ 2	0,52	0,70	0,70
Equivalente Areia (%)	DNIT 054/97	≥ 55	-	-	56,38
Abrasão Los Angeles (%)	DNIT 035/98	≤ 55	18,97	22,16	-
Índice de forma	DNIT ME 086/94	≤ 1	1,00	0,65	-
Partículas planas e alongadas	ASTM D 4791/10	-	2,50	1,50	-

As massas específicas dos agregados foram determinadas com o objetivo de permitir o cálculo das densidades máximas das misturas asfálticas. No que se refere ao índice de absorção, os resultados obtidos indicam que os agregados utilizados apresentam baixa porosidade, não havendo restrições quanto à sua aplicação. Esse aspecto é importante, uma vez que agregados excessivamente porosos tendem a exigir maiores teores de ligante asfáltico e podem apresentar variações significativas de porosidade entre amostras, o que dificulta o controle tecnológico e compromete a uniformidade da mistura.

Em relação à resistência ao desgaste, avaliada por meio do ensaio de abrasão Los Angeles, os agregados apresentaram valores inferiores a 55%, atendendo ao limite estabelecido pelas normas vigentes. Quanto ao equivalente de areia, o pó de pedra apresentou resultado superior ao valor mínimo normativo de 55%, indicando a presença de material fino de boa qualidade, com baixa quantidade de partículas argilosas. Dessa forma, os resultados obtidos permitem considerar todos os agregados analisados adequados para uso em misturas asfálticas.

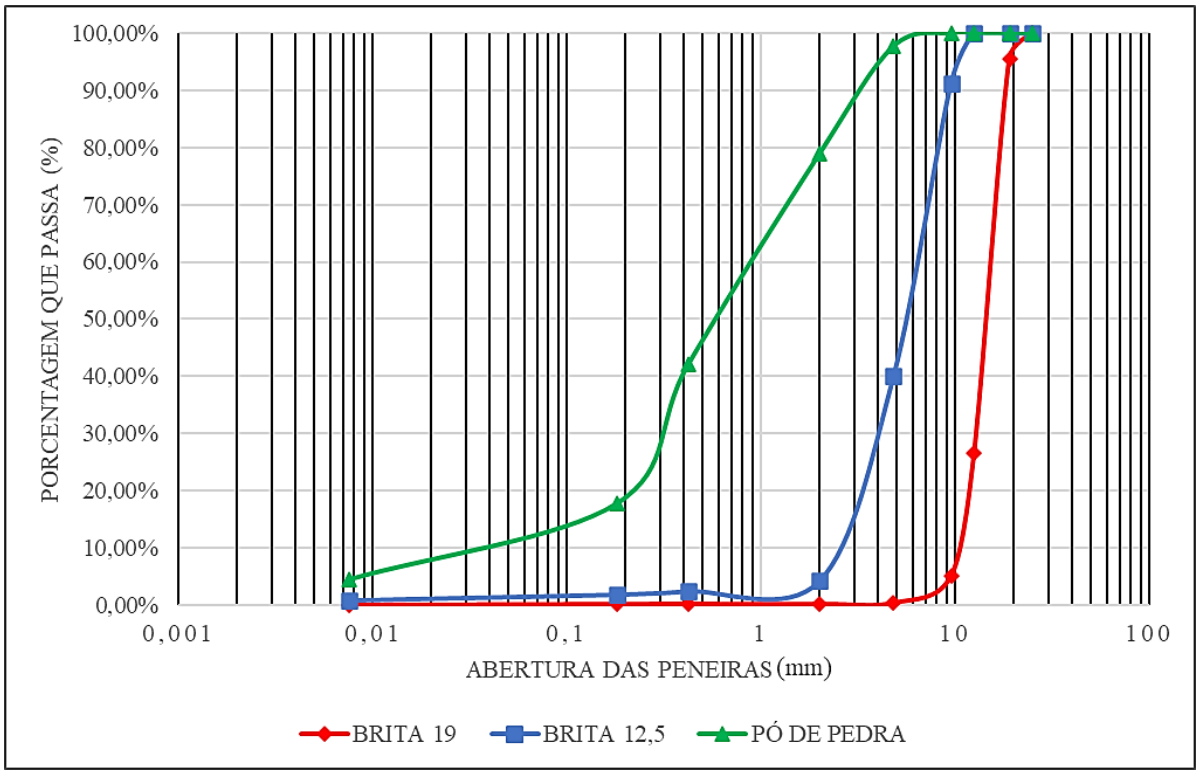
A caracterização granulométrica dos agregados foi realizada conforme a norma DNIT 083/98, utilizando peneiras com aberturas de 0,075 mm, 0,18 mm, 0,42 mm, 2,0 mm, 4,8 mm,

9,5 mm, 12,7 mm, 19,1 mm e 25,4 mm. As porcentagens passantes em cada peneira, assim como as curvas granulométricas correspondentes a cada material, são apresentadas na Tabela 4 e na Figura 3, respectivamente.

Tabela 4:Quantidade passante acumulada (%)

PENEIRA	DIÂMETRO (mm)	BRITA 19mm	BRITA 12,5mm	PÓ DE PEDRA
1”	**25,40**	100,0	100,0	100,0
3/4"	**19,10**	95,5	100,0	100,0
1/2"	**12,70**	26,5	100,0	100,0
3/8"	**9,50**	5,1	91,2	100,0
Nº 4	**4,80**	0,4	31,0	97,6
Nº 10	**2,00**	0,2	4,3	78,9
Nº 40	**0,420**	0,2	2,5	42,0
Nº 80	**0,180**	0,2	1,9	17,7
Nº 200	**0,074**	0,2	0,9	4,5

Figura 3:Distribuição granulométrica dos agregados



Os agregados graúdos empregados nesta pesquisa apresentam uma distribuição granulométrica uniforme, enquanto o pó de pedra possui uma graduação mais densa. A

combinação dessas características granulométricas é determinante para a definição da proporção de cada material na composição da curva granulométrica da mistura, de modo a possibilitar o enquadramento da dosagem na faixa granulométrica selecionada para o desenvolvimento do estudo.

3.2.3. RAP

3.2.3.1. Ligante Asfáltico Recuperado

Com o objetivo de caracterizar a composição do material fresado empregado nesta pesquisa, procedeu-se à extração do ligante asfáltico presente no RAP, viabilizando sua posterior caracterização física e reológica. O procedimento de extração foi realizado utilizando centrífuga elétrica do tipo Rotarex, conforme as recomendações estabelecidas pela ASTM D2172/17. Como solvente, empregou-se tricloroetileno, com temperatura de ebulição aproximada de 87 °C, em conformidade com as prescrições das normas ASTM D2172/17 e DNIT 158/11.

A metodologia adotada seguiu rigorosamente as normas supracitadas, sendo também fundamentada no procedimento descrito por Gonçalves et al. (2019). Inicialmente, as amostras de RAP foram acondicionadas em estufa à temperatura de 110 °C por um período de uma hora. Em seguida, o material foi destorroado e pesado diretamente no recipiente da centrífuga. Após a pesagem, as amostras foram completamente imersas em solvente e mantidas em repouso por cerca de 15 minutos. Posteriormente, o conjunto foi fechado com a colocação do papel filtro, dando início ao processo de centrifugação.

Durante o ensaio, quando todo o solvente da amostra foi extraído, foram realizadas novas adições de 200 ml de solvente de forma sucessiva, repetindo-se o procedimento até que o solvente extraído se apresentasse límpido, conforme preconizado pela norma. Ao final do processo de extração, determinou-se que o teor de ligante asfáltico presente no RAP era de 5,49%.

Após a extração, procedeu-se à recuperação do ligante asfáltico oxidado por meio de um evaporador rotativo, operando a uma temperatura aproximada de 60 °C, sob vácuo da ordem de 0,035 mmHg, por um período de cerca de duas horas. A Figura 4 ilustra o equipamento utilizado durante o processo de recuperação do ligante.

Figura 4: Evaporador Rotativo



Fonte: TECNAL (2026).

Após recuperado, o ligante asfáltico oxidado foi submetido a tratamento em estufa a vácuo para remoção de possíveis resíduos de tricloroetileno que permaneceram do processo de extração. Inicialmente, o ligante permaneceu por 6 horas a 70 °C, sob vácuo na faixa de 60 a 700 mmHg. Em seguida, o material foi mantido por 2 horas a 85 °C, nas mesmas condições de vácuo, e posteriormente por 2 horas a 100 °C. A adoção do escalonamento de temperatura foi necessária em razão do aumento progressivo da viscosidade do ligante à medida que o solvente era removido, o que dificulta a completa evaporação dos resíduos quando se utilizam temperaturas elevadas de forma direta. O procedimento gradativo permitiu a remoção eficiente do solvente sem comprometer as propriedades do ligante recuperado.

Após a etapa de purificação, o ligante asfáltico recuperado foi caracterizado por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, classificação PG e MSCR. A Tabela 5 apresenta os ensaios realizados e os respectivos resultados obtidos para o ligante asfáltico recuperado.

Tabela 5: Caracterização do ligante extraído e recuperado.

ENSAIO	NORMA	RESULTADO
Ponto de Amolecimento (°C)	ASTM D 2872/19	68,0
Penetração (mm)	ASTM D 5M /20	29,0
Viscosidade Rotacional Temperatura 135 ° C (cP)	ASTM D 4402/15	16476

Temperatura 142 ° C (cP)			9520
Temperatura 150 ° C (cP)			6676
Temperatura 165 ° C (cP)			2483
Temperatura 177 ° C (cP)			1215
PG (ºC)		ASTM D 6373/21	82
MSCR	$\mathbf{R_{0,1}}$ **(%)**	ASTM D 7405/20	7,03
	$\mathbf{R_{3,2}}$ **(%)**		2,5
	$\mathbf{Jnr_{0,1}}$ **(kPa^{-1})**		1,82
	$\mathbf{Jnr_{3,2}}$ **(kPa^{-1})**		2,30
	$\mathbf{Jnr_{diff}}$ **(%)**		26,57

O ligante asfáltico recuperado apresentou temperatura máxima de classificação PG de 82°C, indicando elevado nível de rigidez, compatível com o avançado estado de envelhecimento do ligante presente no RAP. Esse comportamento reológico é reforçado pelos altos valores de viscosidade rotacional e pelos baixos valores de penetração, que mostram a redução da capacidade de deformação do ligante e o predomínio de uma resposta mais rígida. No âmbito do ensaio MSCR, essa condição reológica tende a se refletir em menores valores de *creep compliance* não recuperável (Jnr) e maiores percentuais de recuperação elástica, características associadas a maior resistência à deformação permanente em elevadas temperaturas. Por outro lado, a elevada rigidez do ligante pode implicar maior suscetibilidade ao trincamento por fadiga, especialmente quando incorporado a misturas asfálticas com elevado teor de vazios, como é o caso das camadas porosas de atrito. Essas implicações serão discutidas de forma mais aprofundada na análise dos resultados experimentais

3.2.3.2.Agregado Do RAP

Para a caracterização dos agregados naturais do RAP, foram avaliados tanto o RAP sem o ligante asfáltico envelhecido aderido aos agregados (White RAP), como o RAP com o ligante envelhecido aderido aos agregados (Black RAP). A Tabela 6 mostra os resultados e as normas utilizadas.

Tabela 6: Caracterização do Black RAP e White RAP.

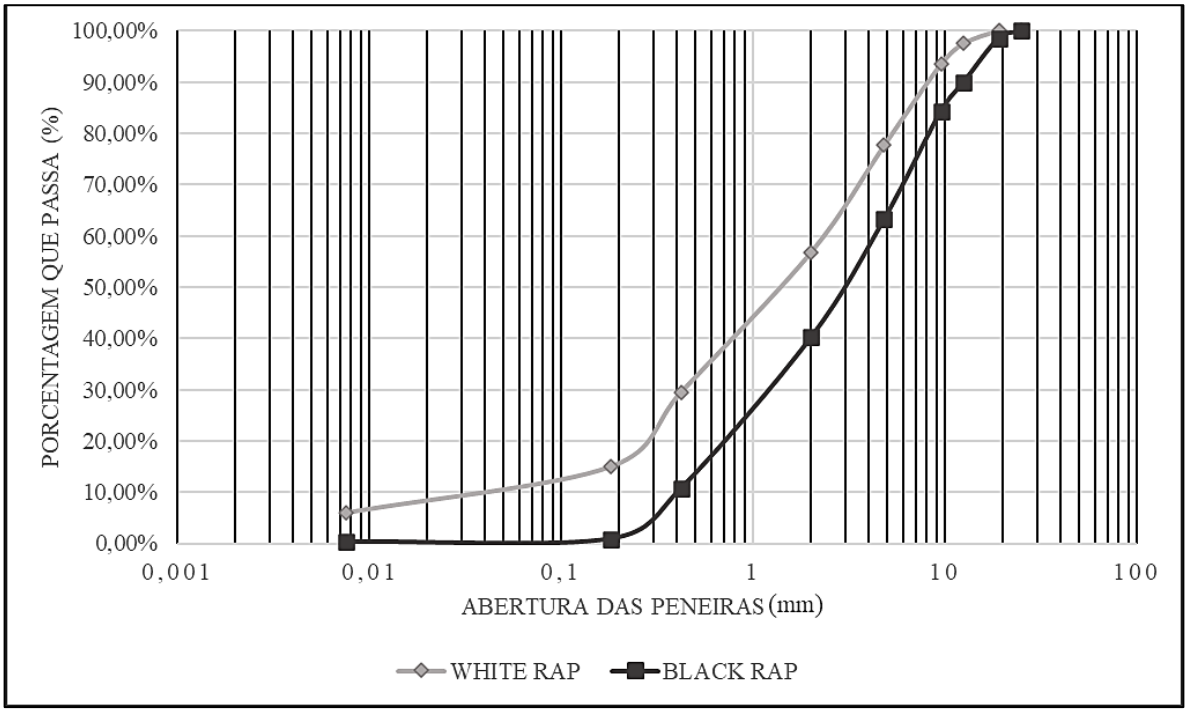
ENSAIOS	NORMA	LIMITES	BLACK RAP	WHITE RAP
Massa Específica Real (g/cm³)	ASTM C 127/15	-	2,464	2,466

Massa Específica Aparente (g/cm³)		-	2,376	2,378
Absorção (%)		≤ 2	0,5	0,89
Equivalente Areia (%)	ASTM D 2419/19	≥ 55	86,59	68,56
Angularidade (%)	ASTM D 4791/19	≥ 45	52,62	45,43
Partículas planas e alongadas	ASTM C 1252/17	≤ 10	-	9,34

A avaliação granulométrica foi realizada considerando as duas condições do material fresado, denominadas White RAP (agregados após extração do ligante) e Black RAP (material contendo o ligante envelhecido aderido). Contudo, na produção da mistura reciclada, o RAP foi incorporado na condição Black RAP. Assim, a caracterização granulométrica do material nessa condição é fundamental para o enquadramento da mistura na faixa de projeto, sendo os resultados apresentados na Figura 5.

Quanto à forma de consideração do ligante presente no RAP no projeto da mistura, foram avaliados diferentes cenários de interação entre o ligante envelhecido e o ligante virgem, incluindo as hipóteses de comportamento do tipo black rock, ativação parcial e disponibilidade total (full availability). A partir da análise dos resultados experimentais, adotou-se o cenário de disponibilidade total, no qual o ligante envelhecido presente no material fresado foi considerado ativo e integrante do sistema ligante da nova mistura. Essa escolha se fundamenta no processo de mistura mecânica empregado, realizado sob condições controladas de temperatura e tempo, que favorecem a mobilização do ligante envelhecido aderido aos agregados. Além disso, observou-se que essa consideração resultou em melhor ajuste do teor efetivo de ligante da mistura, eliminando a ocorrência de exsudação observada em cenários alternativos e proporcionando comportamento mais estável do ponto de vista volumétrico e mecânico. Dessa forma, o teor de ligante originalmente presente no RAP passou a compor o teor total de ligante da mistura, influenciando diretamente parâmetros como a resistência à tração, a perda por abrasão no ensaio Cântabro e o comportamento frente ao escorrimento.

Figura 5: Curvas granulométricas do White RAP e Black RAP



Como demonstrado na Tabela 6 os agregados naturais presentes no RAP estão dentro dos limites estabelecidos pelas especificações e apresentam uma granulometria uniforme como mostra a Figura 5. A combinação dessas características granulométricas é determinante para a definição da proporção de RAP que será adicionado a mistura base de CPA, sem que haja danos às características das misturas abertas, em especial às drenantes.

3.2.4. Dosagem

Com o objetivo de definir o teor de projeto do ligante asfáltico para a mistura do tipo CPA, a etapa de dosagem foi conduzida com base nos procedimentos estabelecidos pela ASTM D7064/21. Paralelamente, foram considerados os critérios e as faixas granulométricas prescritos pela norma brasileira DNIT 386/1999, de modo a assegurar a compatibilidade da mistura com as condições e práticas nacionais. Conforme destacado por Jacques (2018), embora a norma americana apresente metodologia própria para a definição da granulometria das misturas porosas, a adoção das faixas estabelecidas pela DNIT 386/1999 mostra-se mais adequada à realidade brasileira, permitindo maior aderência aos materiais e às especificações usualmente empregadas no país. A relação dos ensaios realizados e das respectivas normas adotadas no processo de dosagem da mistura é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3: Ensaios e normas utilizadas para dosagem da CPA.

ENSAIOS	MÉTODOS
Volume de vazios	DNIT- ME 427/2020 e 428/2022
Desgaste por abrasão – Cântabro	DNIT-ME 383/1999
Escorrimento	ASTM D6390/2017

3.2.4.1.Composição granulométrica da mistura

A composição granulométrica da mistura foi definida a partir da análise da distribuição granulométrica dos agregados disponíveis, sendo posteriormente enquadrada na Faixa V da DNIT-ME 386/1999. A opção por essa faixa deve-se ao fato de ser a mais comumente empregada no Brasil para a execução de camadas porosas de atrito. As proporções adotadas para cada material encontram-se apresentadas na Tabela 7 e permitiram a definição da curva granulométrica da mistura, cujos valores e representação gráfica são apresentados na Tabela 8 e na Figura 6, respectivamente. Essa mesma composição foi aplicada tanto à mistura de referência, sem a adição de RAP, e serviu de base apara criação das curvas com adição do RAP.

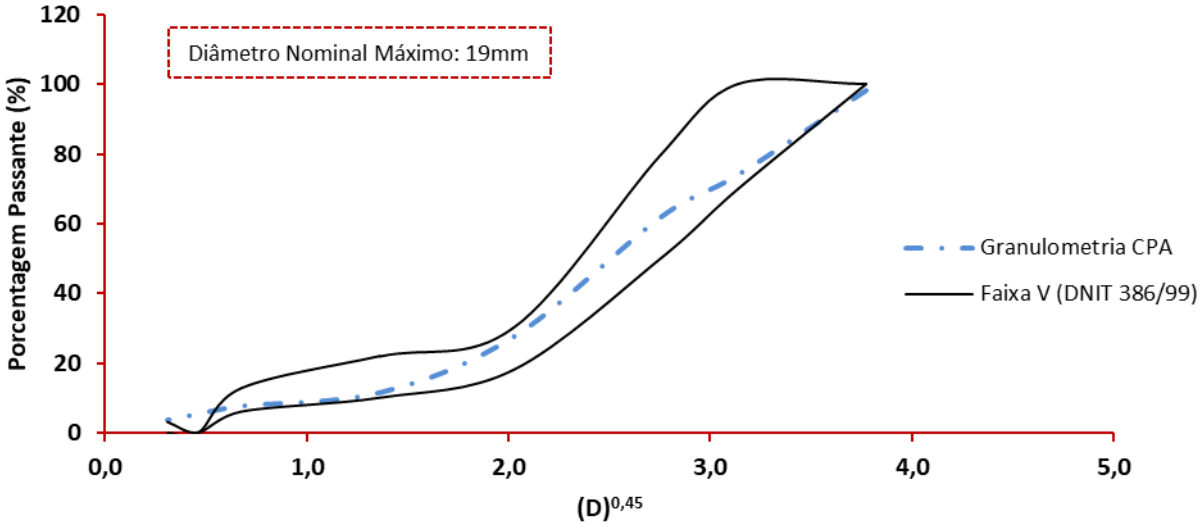
Tabela 7:Proporção de cada agregado na mistura.

PROPORCÕES DOS AGREGADOS NA MISTURA CPA	BRITA 19mm	BRITA 12,5mm	PÓ DE PEDRA	FILLER
	35%	54%	8%	3%

Tabela 8:Porcentagem passando da mistura de projeto.

PENEIRA	ESPECIFICAÇÃO DNIT – FAIXA V		% PASSANTE EM PESO
	% Mín.	% Máx.	
3/4"	**100**	**100**	98,42
1/2"	**70**	**100**	74,28
3/8"	**50**	**80**	62,02
Nº 4	**18**	**30**	27,69
Nº 10	**10**	**22**	11,70
Nº 40	**6**	**13**	7,78
Nº 80	**-**	**-**	5,52
Nº 200	**3**	**6**	3,77

Figura 6: Curva da composição granulométrica da CPA.

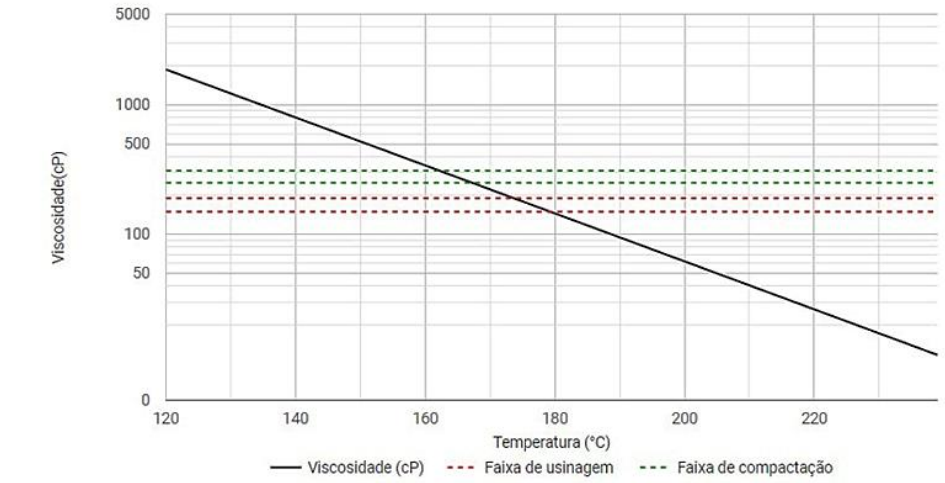


3.2.4.2. Temperaturas de usinagem e compactação

Conhecer as temperaturas de usinagem (TU) e de compactação (TC) é uma etapa fundamental em estudos envolvendo misturas asfálticas, uma vez que temperaturas excessivamente elevadas podem intensificar a oxidação do ligante e comprometer o desempenho da mistura. Nesta pesquisa, para definir as temperaturas de mistura e compactação foram utilizadas duas metodologias distintas com o objetivo de avaliar qual delas se mostra mais adequada às misturas do tipo CPA.

A primeira metodologia baseia-se na determinação gráfica das temperaturas de usinagem e compactação, conforme ilustrado na Figura 7. Nesse procedimento, a temperatura de usinagem é definida no ponto em que o ligante apresenta viscosidade rotacional de 0,17 ± 0,02 Pa.s, enquanto a temperatura de compactação corresponde ao valor de 0,28 ± 0,03 Pa.s de viscosidade rotacional.

Figura 7: Curva de Temperatura versus Viscosidade, para definição da TU e TC.



Temperatura de compactação máxima (°C): 167,25
Temperatura de compactação média (°C): 164,73
Temperatura de compactação mínima (°C): 162,21

Temperatura de usinagem máxima (°C): 179,24
Temperatura de usinagem média (°C): 176,46
Temperatura de usinagem mínima (°C):173,69

A partir da análise da curva Temperatura versus Viscosidade apresentada na Figura 7, foram determinadas TU de 176 °C e TC de 165 °C. Esse procedimento é tradicionalmente aplicado a ligantes asfálticos virgens e, em princípio, não é o mais indicado para ligantes modificados. Ainda assim, Domingos et al. (2012) ressaltam que a utilização das faixas usuais de viscosidade constitui uma simplificação amplamente adotada também para a estimativa das temperaturas de usinagem e de compactação de ligantes modificados.

A segunda metodologia empregada baseou-se no teor de polímero presente no ligante asfáltico, conforme recomendado pela norma DNIT-ME 385/99. De acordo com essa especificação, a temperatura de usinagem deve ser definida a partir de um valor base de 150 °C, acrescido de 3 °C para cada 1% de polímero, enquanto a temperatura de compactação parte de 140 °C, também acrescida de 3 °C por 1% de polímero. Como o ligante AMP 55/75 utilizado nesta pesquisa contém 3% de polímero SBS, obtiveram-se temperaturas de 159 °C para usinagem e 149 °C para compactação.

A definição do método mais adequado à produção das misturas do tipo CPA e, consequentemente, das temperaturas finais de usinagem e compactação, foi realizada com base nos resultados dos ensaios de volume de vazios e de resistência à tração (RT), os quais permitem avaliar o comportamento volumétrico e mecânico das misturas. A análise desses resultados é apresentada no item 3.2.4.3.

3.2.4.3.Moldagem CGS

Além dos ensaios apresentados no Quadro 3, a resistência à tração por compressão diametral foi considerada como um dos parâmetros para a definição do teor de projeto do ligante

asfáltico, por se tratar de um requisito estabelecido pela DNIT 386/1999. Nesse sentido foram avaliados os teores de ligante de 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%, a partir da análise conjunta dos resultados de volume de vazios, perda de massa por abrasão (ensaio Cântabro), resistência à tração indireta por compressão diametral e escorrimento. Conforme recomendado pela ASTM D7064 (2021), a compactação dos corpos de prova foi realizada utilizando o Compactador Giratório Superpave (CGS), com 50 giros, pressão aproximada de 600 kPa e ângulo de inclinação de 1,25º ± 0,02°. Os corpos de prova foram moldados seguindo esses parâmetros, e os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 9.

Tabela 9:Resultados dos ensaios para dosagem, utilizando o AMP 55/75.

Parâmetro	**Limites**		**Teor de ligante asfáltico**			
	ASTM D7064/21	**DNIT-ES 386/99**	**4,0%**	**4,5%**	**5,0%**	**5,5%**
Volume de vazios (%)	Mín. 18	18-25	23,10	22,16	21,60	19,72
Cântabro (%)	Máx. 20	Máx. 25	**27,46**	12,44	4,81	4,05
RT (MPa)	-	0,55	**0,20**	**0,25**	**0,20**	**0,19**
Escorrimento (%)	0,3máx	0,3	0,067	0,013	0,029	0,063
TU/TC (°C)	-	-	176 / 165			
N° de giros (CGS)	50	-	50			
Ligante asfáltico	-	-	AMP 55/75			
Faixa granulométrica	-	-	DNIT-ES 386/99 – Faixa V			

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que nenhum dos teores de ligante avaliados atendeu simultaneamente a todos os limites normativos exigidos para a definição do teor de projeto. Destaca-se, em particular, o desempenho insatisfatório observado nos resultados de resistência à tração (RT), uma vez que nenhum dos teores analisados apresentou valores próximos ao mínimo de 0,55 MPa estabelecido pela DNIT 386/1999.

Resultados semelhantes, com dificuldade em atingir o valor mínimo de resistência à tração (RT) estabelecido pela DNIT 386/1999, também são reportados na literatura técnica para misturas do tipo CPA. Sousa (2024), Pinheiro (2004), Motta et al. (2010), Jaques (2018) e Alecrim (2021) apresentaram, em seus respectivos estudos, valores de RT inferiores ao limite normativo, mesmo com variações nos materiais empregados e nos procedimentos de dosagem e compactação.

Sousa (2024) avaliou misturas CPA produzidas com adição de agregado poroso, saturado em óleo de soja residual, em sua pesquisa realizou vários procedimentos, métodos e

substituições a fim de sanar o problema com a baixa resistência, no entanto concluiu que o uso do ligante AMP 60/85 em detrimento ao uso do AMP 55/75 ou mesmo a mudança na composição granulométrica ou o aumento do número de giros não respondiam com uma melhora satisfatória no valor de RT, obtido nas misturas.

Pinheiro (2004) avaliou misturas CPA produzidas com asfalto modificado por borracha, utilizando teor de ligante de 6,0% e volumes de vazios de 19,5% e 20,8%. Os corpos de prova foram moldados com o compactador giratório, aplicando-se 50 giros, tendo sido obtidos valores de RT de 0,45 MPa e 0,42 MPa, respectivamente. De forma semelhante, Motta et al. (2010) observaram valores reduzidos de resistência à tração em misturas CPA, sendo o maior valor reportado de 0,42 MPa, correspondente ao teor de 4,5% de ligante e à compactação pelo método Marshall com 50 golpes.

No estudo conduzido por Jaques (2018), que investigou a viabilidade técnica da produção de misturas CPA a temperaturas intermediárias, foram realizados ensaios de RT em misturas produzidas com ligante AMP 60/85. Os valores máximos obtidos foram de 0,44 MPa para a mistura produzida a quente e de 0,39 MPa para a mistura morna, permanecendo ambos abaixo do limite normativo vigente. Já Alecrim (2021), ao analisar a incorporação de 15% de material fresado (RAP) em revestimentos do tipo CPA, obteve valores de RT da ordem de 0,47 MPa, tanto para a mistura de referência quanto para a mistura com RAP. A autora observou ainda que as misturas produzidas e compactadas em usina apresentaram valores de RT superiores àquelas misturadas e compactadas em laboratório, sugerindo que o processo de produção em usina pode influenciar positivamente o desempenho mecânico da mistura.

Com base na ampla abordagem técnica, em especial realizada por Sousa (2024), e a limitação de material disponível para a pesquisa, optou-se por manter a utilização do AMP 55/75 e a composição granulométrica inicial nas etapas subsequentes do estudo. Ainda assim, buscando reduzir a baixa resistência observada nas misturas, foram realizados novos ensaios, desta vez explorando a variação das temperaturas de usinagem e compactação, bem como a influência do método de compactação adotado. Os pares de temperaturas avaliados foram definidos com base nos métodos descritos no item 3.2.4.2. Paralelamente, e considerando os resultados apresentados por Motta et al. (2010), foi investigada a utilização do compactador Marshall em comparação ao Compactador Giratório Superpave (CGS). Os resultados obtidos a partir dessas análises, para o teor de 4,5% de ligante, estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: - Resultados dos ensaios para dosagem, variando as TU e TC.

Parâmetro	Limites		TU/TC (°C)		
	ASTM D7064/21	DNIT-ES 386/99	159/149	176/165	
Metodologia de compactação	-	-	CGS	CGS	Marshall
RT (MPa)	-	0,55mín	**0,37**	**0,41**	**0,41**
Volume de vazios (%)	Mín. 18	18-25	19,2	19,1	18,8
N° de giros/golpes	50	-	100	100	75
Ligante asfáltico	-	-	4,5% - AMP 55/75		
Faixa granulométrica	-	-	DNIT-ES 386/99 – Faixa V		

A comparação dos valores de resistência à tração (RT) obtidos para os diferentes pares de temperaturas de usinagem (TU) e compactação (TC) indica que o aumento de 17 °C na temperatura de usinagem e de 16 °C na temperatura de compactação resultou em um acréscimo de apenas aproximadamente 10% nos valores de RT. Diante desse resultado, optou-se por manter as temperaturas de 159 °C para usinagem e 149 °C para compactação, uma vez que o incremento observado na resistência não justifica o maior consumo energético associado à elevação das temperaturas. Ademais, o método de definição das temperaturas em função do teor de polímero mostra-se mais apropriado para ligantes asfálticos modificados, reforçando a adequação dessa escolha.

Outro aspecto relevante, discutido por Motta et al. (2010), refere-se à relação entre os níveis de compactação obtidos pelo Compactador Giratório Superpave (CGS) e pelo método Marshall em misturas abertas. Diferentemente do que ocorre em misturas densas, não há equivalência direta entre o número de giros no CGS e o número de golpes no compactador Marshall, especialmente em materiais com elevado teor de vazios.

Na presente pesquisa, observou-se comportamento semelhante ao reportado por esses autores. A mistura compactada com 100 giros no CGS apresentou valor de Resistência à Tração (RT) da ordem de 0,41 MPa, resultado próximo ao obtido para a mistura compactada com 75 golpes no método Marshall, também em torno de 0,41 MPa. Esse resultado sugere que, sob as condições experimentais adotadas, o nível de energia de compactação correspondente a 100 giros no CGS produziu efeito mecânico equivalente ao obtido com 75 golpes no compactador Marshall, quando analisado sob o parâmetro RT.

Entretanto, a correspondência observada não decorre de equivalência direta entre os métodos, mas da similaridade do estado de compactação alcançado, inferida a partir da resposta mecânica da mistura.

A dificuldade em atingir o valor mínimo de 0,55 MPa de RT, estabelecido pela DNIT 386/1999, observada neste estudo e relatada em importantes trabalhos aqui citados, sugere a necessidade de uma reavaliação desse critério normativo, especialmente considerando que a referida especificação permanece inalterada há mais de duas décadas. Ressalta-se que o limite de 0,55 MPa mostra-se elevado para misturas asfálticas com volumes de vazios entre 18% e 25%, como é o caso das CPAs, sobretudo quando comparado ao valor mínimo de 0,65 MPa exigido para misturas densas, que apresentam tipicamente cerca de 4% de vazios.

Cabe destacar ainda que a metodologia de dosagem preconizada pela ASTM D7064 não estabelece um valor mínimo de resistência à tração para misturas do tipo CPA, uma vez que esse parâmetro não é levado em consideração no método de dosagem. Diante de todas a considerações e resultados, optou-se por seguir a pesquisa, porém, sem considerar o ensaio de RT na dosagem. Este foi considerado apenas na caracterização mecânica das misturas analisadas.

Com o objetivo de avaliar a influência do nível de energia de compactação sobre o desempenho da mistura, a etapa de dosagem foi conduzida utilizando dois patamares distintos de compactação, correspondentes a 50 e 100 giros no Compactador Giratório Superpave (CGS). Essa estratégia permitiu analisar comparativamente os efeitos da densificação sobre os parâmetros volumétricos e mecânicos da mistura, especialmente no que se refere à resistência à tração, à estabilidade estrutural e à manutenção do teor de vazios característico de misturas porosas.

A adoção de 100 giros foi fundamentada na hipótese de que o aumento da energia de compactação poderia promover maior reorganização do esqueleto granular, reduzindo vazios excessivos e, consequentemente, elevando a resistência mecânica. Por outro lado, o emprego de 50 giros foi considerado em conformidade com a recomendação da norma ASTM D7064, que estabelece esse nível de compactação para misturas do tipo *Open-Graded Friction Course* (OGFC), preservando a macroestrutura aberta necessária ao desempenho hidráulico.

A definição do nível de compactação adotado na dosagem final não foi estabelecida a priori, mas resultou da análise integrada dos resultados obtidos para volume de vazios, perda por abrasão no ensaio Cântabro e escorrimento de ligante. A consolidação dessa escolha

metodológica é apresentada no item 3.2.5, após a discussão detalhada dos resultados experimentais.

3.2.4.4.Volume de vazios

De acordo com a DNIT-ES 386/99 uma mistura asfáltica do tipo CPA deve apresentar um volume de vazios entre 18 e 25%. Nesta pesquisa, para determinação do volume de vazios, foram acuradas as densidades aparentes, pela especificação de serviço DNIT 428/22 e, densidades máximas verificadas por meio do Rice Test, regido pela norma DNIT 427/20.

O procedimento determinado pela especificação DNIT 428/22, para cálculo da densidade aparente da mistura, consiste em pesar o corpo de prova ao ar e em pesa- submerso em água, à 25°C, e obtém-se o peso submerso, como mostra as Figuras 8a e 8b. De posse desses dados foi possível calcular a densidade aparente das misturas com volume de vazios superiores à 10%.

Para determinar a densidade máxima das misturas foram realizados os Rices Test para cada teor de ligante asfáltico. A norma DNIT 427/20 estabelece que cada mistura seja espalhada ainda quente sobre uma placa metálica e, após atingir temperatura ambiente, as frações de misturas maiores sejam separadas manualmente e pesadas. Após esse procedimento, as amostras foram submetidas ao agitador mecânico para remoção do ar contido e, em seguida, pesadas na condição submersa (Figuras 9a, 9b e 9c). Esses valores permitiram o cálculo da densidade máxima da mistura.

De posse dos resultados de cada ensaio foi possível determinar o volume de vazios da mistura, por meio da Equação 1. A partir disto foi traçado o gráfico de volume de vazios versus teor de ligante apresentado na Figura 10, para os corpos de prova moldados com 50 e 100 giros.

$$V_V(\%) = 100 * (1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}) \qquad (1)$$

Onde:

Vv: índice de vazios (%);

Gmb: densidade aparente da mistura compactada;

Gmm: densidade máxima medida da mistura.

Figura 8: Determinação da densidade aparente da mistura

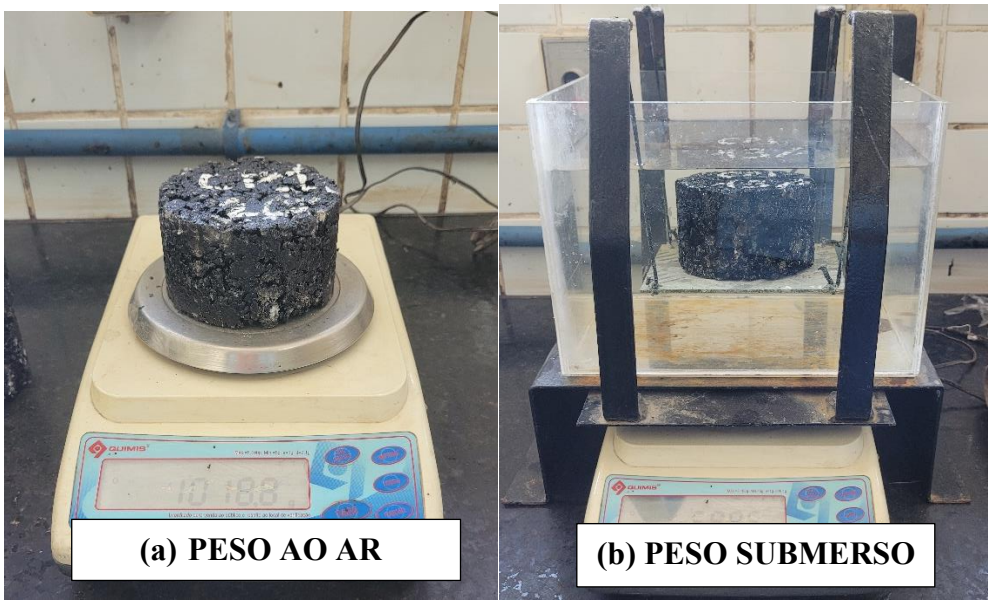
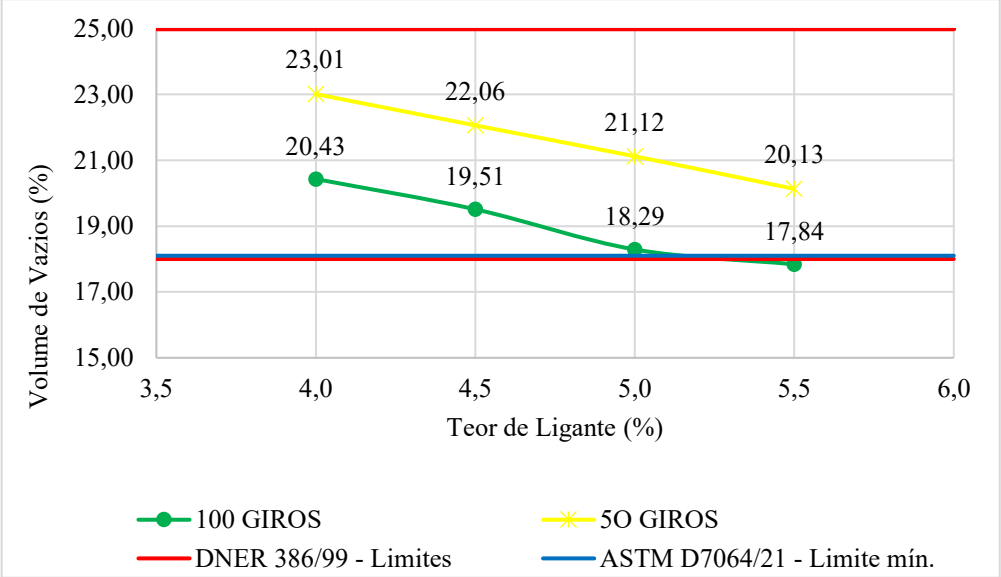


Figura 9: Determinação da densidade máxima da mistura pelo Rice Test.



Figura 10: Curva volume de vazios versus teor de ligante.



Como pode-se perceber na Figura 10, todas as misturas apresentaram volumes de vazios dentro dos limites estabelecidos pelas normas DNIT-ES 386/99 e ASTM D7064/13, com exceção do teor de 5,5% da mistura compactada com 100 giros, porém, ainda assim, o valor encontrado foi próximo do limite mínimo. Para as duas energias de compactação, 50 giros e 100 giros, a CPA apresentou a mesma tendência de redução de vazios, com a diminuição de, aproximadamente, 1% de volume de vazios com o aumento de 0,5% no teor de ligante da mistura.

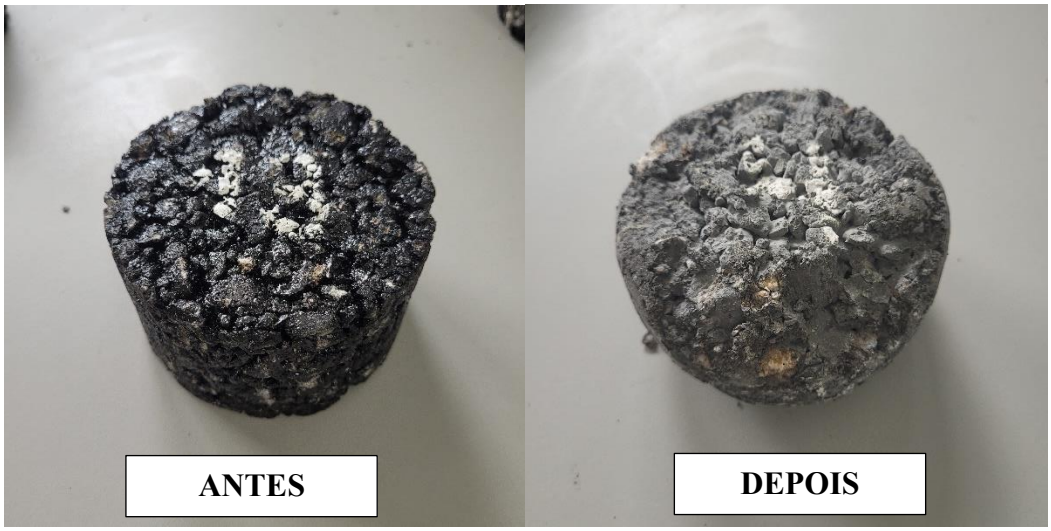
3.2.4.5.Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cântabro

Segundo a especificação 386/99 do DNIT, o ensaio Cântabro é um dos parâmetros importantes analisados para as misturas asfálticas do tipo CPA, não podendo o índice de desgaste ser superior a 25%.

Desta forma este ensaio foi realizado nesta pesquisa de acordo com o especificado na DNIT-ME 383/99. Onde os corpos de prova de cada amostra para cada teor de ligante distinto foram pesadas, colocadas, uma a uma, no tambor da máquina de *Los Angeles*, limpo e sem carga abrasiva, rotacionado por 300 vezes a 30 r.p.m e temperatura de 25°C.

Após esse processo o corpo de prova é retirado e pesado novamente, a Figura 11 mostra um corpo de prova antes e depois do processo de desgaste.

Figura 11: Demonstração do desgaste sofrido em um dos corpos de prova utilizados na determinação da dosagem.



A porcentagem de desgaste foi calculada por meio da Equação 2:

$$A = \left(\frac{P - P'}{P}\right) \times 100 \qquad (2)$$

Onde:

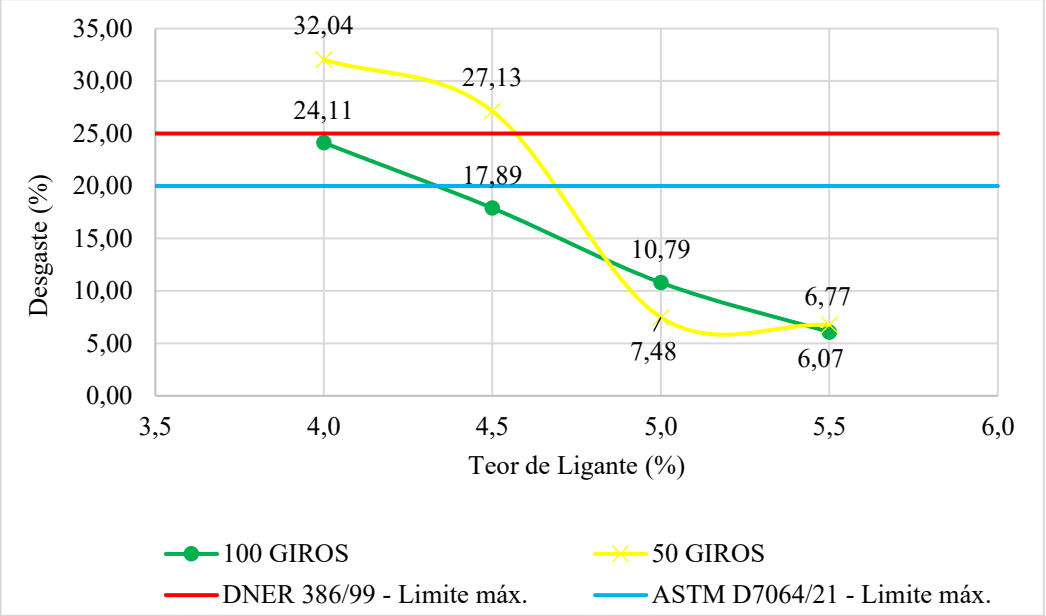
A: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero, com aproximação de 1%;

P: peso do corpo de prova antes do ensaio;

P': peso do corpo de prova após a realização do ensaio.

Na Figura 12 abaixo, as curvas apresentam o comportamento frente ao processo de desgaste sofrido pelas misturas com diferentes teores de ligantes compactadas com 50 e 100 giros.

Figura 12:Curva da % de desgaste versus teor de ligante.



De acordo com a especificação DNIT 386/1999, o limite máximo admissível para o desgaste por abrasão no ensaio Cântabro em misturas do tipo CPA é de 25%, enquanto a ASTM D7064/2021 estabelece um limite mais restritivo, fixado em 20%. Ao analisar os resultados referentes às misturas compactadas com 100 giros, observa-se que todos os teores de ligante avaliados atenderam ao limite máximo previsto na norma brasileira, embora o teor de 4,0% tenha apresentado valor bastante próximo a esse limite. Em relação aos critérios da norma americana, o teor de 4,0% ultrapassou o limite admissível, enquanto o teor de 4,5% de ligante apresentou desgaste próximo ao valor máximo permitido.

Os resultados obtidos indicam uma tendência aproximadamente linear entre o teor de ligante e o desgaste por abrasão, evidenciando que o aumento do teor de ligante está associado à redução do desgaste da mistura. Esse comportamento é coerente com as características do ligante asfáltico, um material adesivo de natureza termoviscoplástica, para o qual teores mais elevados tendem a promover maior coesão e adesão entre os agregados, resultando em maior resistência ao desgaste superficial da mistura.

3.2.4.6.Escorrimento do ligante

Para realização do ensaio de escorrimento do ligante esta pesquisa seguiu as recomendações da ASTM D6390, segundo a norma o ensaio deve ocorrer com no mínimo duas amostras de 1200 ± 200g, não compactadas, que devem ser acomodadas sem perturbação em um cesto com dimensões padronizadas (Figura 13).

Figura 13:Amostra acomodada no cesto para determinação da porcentagem de escorrimento.

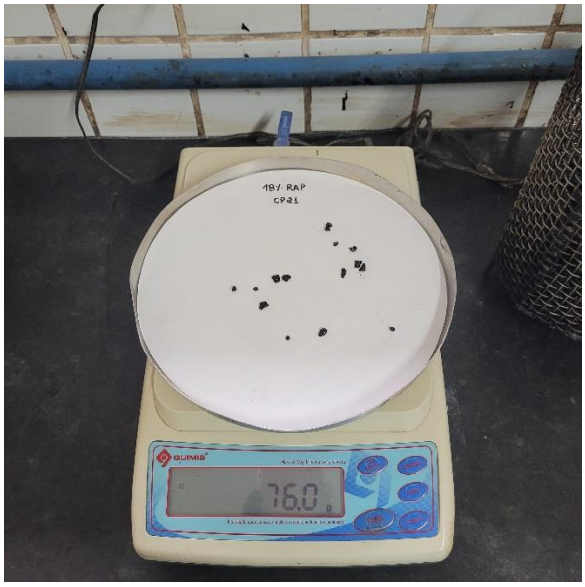


Após a acomodação da amostra no cesto a mesma foi colocada sob um prato e levada a estufa durante o período de 1h ± 5 min na temperatura de usinagem da mistura.

Segundo a norma o ensaio deve ser realizado além da temperatura de usinagem, à uma segunda temperatura, 10°C acima. No entanto, observando o desenvolvimento do ensaio em outras literaturas, e percebendo-se a prática comum de realização em apenas uma temperatura, optou-se por realizar o ensaio apenas na temperatura de usinagem dado que as condições de mistura no laboratório são controladas.

Decorrido o período de permanência na estufa, o conjunto foi retirado e pesou-se apenas o prato contendo o material resultante do escorrimento do cesto (Figura 14), o mesmo procedimento foi repetido para a segunda amostra. Na Figura 15 foi traçada a curva de escorrimento com a variação do teor de ligante.

Figura 14:Material resultante do escorrimento do cesto.



A porcentagem de escorrimento é calculada por meio da Equação 3, e não deve ser superior a 0,3% para misturas asfálticas porosas do tipo CPA.

$$\text{Escorrimento (\%)} = \frac{(D-C)}{(B-A)} * 100 \qquad (3)$$

Onde:

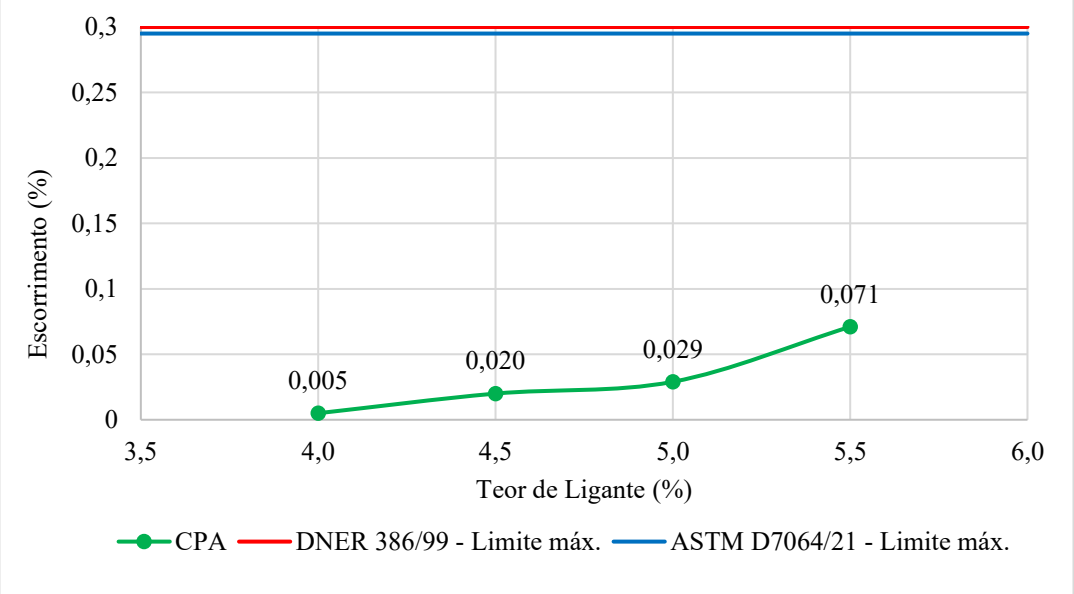
A: Peso do cesto vazio;

B: Peso do cesto contendo a amostra;

C: Massa do prato;

D: Massa do prato contendo o material resultante do escorrimento.

Figura 15:Curva do escorrimento versus teor de ligante.



Por trata-se de um ensaio que não envolve a etapa de compactação das amostras, a avaliação do escorrimento foi realizada uma única vez para cada teor de ligante avaliado. Os resultados obtidos indicaram que todos os teores analisados apresentaram valores de escorrimento inferiores ao limite máximo de 0,3%, conforme estabelecido tanto pela norma brasileira quanto pela norma americana.

3.2.5. Determinação do teor de projeto de ligante e número de giros

O teor de projeto do ligante asfáltico foi definido a partir da análise conjunta das curvas de volume de vazios, desgaste por abrasão e escorrimento. Adicionalmente, a comparação entre os resultados obtidos com 50 e 100 giros possibilitou a definição da energia de compactação a ser adotada ao longo da pesquisa. Com base nessa análise, optou-se pela utilização de 100 giros na compactação dos corpos de prova destinados à caracterização mecânica das misturas.

Essa escolha foi reforçada pelos ensaios preliminares realizados antes da dosagem definitiva, nos quais o aumento da energia de compactação de 50 para 100 giros promoveu, ainda que de forma limitada, um incremento nos valores de resistência da mistura. Dessa forma, considerou-se que a maior densificação proporcionada pelos 100 giros representaria uma condição mais adequada para a avaliação do desempenho mecânico.

A partir da análise dos resultados das misturas compactadas com 100 giros, observou-se que o teor de 4,5% de ligante foi o que apresentou o melhor atendimento aos limites estabelecidos pelas normas brasileira e americana para os parâmetros avaliados. Ressalta-se que o objetivo da dosagem é a determinação do menor teor de ligante capaz de satisfazer os requisitos de qualidade da mistura asfáltica, contribuindo para a redução dos custos sem comprometer o desempenho.

Na Tabela 11 estão reunidas todas as definições estabelecidas a partir dos ensaios realizados e do processo de dosagem. Esses parâmetros foram adotados na produção dos corpos de prova destinados à caracterização das misturas, tanto da mistura de referência quanto das misturas recicladas.

Tabela 11: Parâmetros definidos para caracterização das CPAs

Parâmetros	Definições
Faixa granulométrica	DNIT-ES 386/99 – Faixa V
Composição granulométrica	Brita 19mm – 35% Brita 12,5mm – 54% Pó de pedra – 8% Filler (cal) – 3%

Ligante asfáltico	4,5% – AMP 55/75
Metodologia de compactação	CGS – 100 giros
TU e TC	159°C e 149°C

3.2.6. Incorporação Do RAP Na Mistura Asfáltica

A definição do teor máximo de material fresado de pavimentos asfálticos (RAP) a ser incorporado à mistura asfáltica foi estabelecida, inicialmente, em 30%, considerando que não seriam utilizados agentes rejuvenescedores ao longo da pesquisa. Documentos técnicos amplamente reconhecidos como os relatórios de Copeland (2011) e FHWA (2018) indicam que, na ausência de rejuvenescedores, teores elevados de RAP tendem a resultar em misturas excessivamente rígidas, em função da elevada contribuição do ligante envelhecido, o que pode comprometer o desempenho mecânico, especialmente no que se refere à resistência ao trincamento por fadiga e à trabalhabilidade da mistura. Esses documentos ressaltam que, para teores elevados de RAP, torna-se necessária a adoção de estratégias adicionais de controle reológico ou de rejuvenescimento do ligante, razão pela qual o valor de 30% foi adotado apenas como limite superior preliminar, com finalidade exploratória.

Entretanto, após as primeiras análises de composição granulométrica, observou-se que teores de RAP superiores a 20% inviabilizavam o enquadramento da mistura na Faixa V da DNIT- ME 386/99, principalmente em decorrência do acréscimo de material fino proveniente do RAP. Considerou-se que a manutenção da granulometria dentro da faixa normativa é condição essencial para preservar as características funcionais da CPA, especialmente os vazios comunicantes e o volume de vazios, definiu-se 20% como teor máximo de RAP a ser incorporado à mistura.

Na primeira etapa experimental, o RAP foi incorporado na condição de agregado, substituindo parte dos agregados naturais. As proporções dos materiais foram ajustadas de forma a manter a curva granulométrica resultante dentro da Faixa V da DNIT-ME 386/1999. Nessa configuração, assim como ao longo de todo o desenvolvimento da pesquisa, foi realizada a correção do teor de ligante considerando a ativação total do ligante envelhecido presente no RAP, com base no teor de 5,49% obtido por meio do ensaio de extração.

Essa hipótese foi adotada em função do processo de mistura mecânica realizado no misturador do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), bem como das condições de produção a quente, que favorecem maior interação entre o ligante envelhecido aderido aos agregados do RAP e o ligante virgem adicionado à mistura, conforme discutido por Nascimento (2021). Além disso, a consideração

da ativação total do ligante do RAP permite padronizar o critério de cálculo do teor de ligante da mistura, reduzindo a influência de diferentes hipóteses de interação entre ligantes e possibilitando uma avaliação mais direta do efeito da incorporação do RAP no comportamento volumétrico e mecânico das misturas.

Nessa configuração inicial, foram avaliados os teores de 13%, 16% e 20% de RAP. Como critério para aprovação das misturas e continuidade das análises funcionais e mecânicas, foi adotado o ensaio de volume de vazios, tendo em vista que a principal função da CPA é a drenagem das águas superficiais. No entanto, os resultados obtidos indicaram que nenhuma das três porcentagens avaliadas atingiu o volume mínimo de vazios de 18%, estabelecido pela DNIT ES 386/1999, evidenciando resultando um comprometimento da estrutura porosa da mistura.

Diante desses resultados, optou-se por um novo rearranjo da composição granulométrica, priorizando-se a obtenção de misturas cuja curva final se mantivesse praticamente coincidente ou com comportamento semelhante ao da mistura de referência, de modo a preservar a estrutura de vazios característica da CPA. A partir desse critério, foram definidos os teores de 12%, 15% e 18% de RAP (configuração 2), que apresentaram melhor compatibilidade granulométrica com a mistura virgem, como mostra a Figura 16. Na Tabela 12 é apresentado um resumo de toda composição granulométrica das misturas recicladas bem como o teor de ligante vigem modificado após compensação pela presença do ligante envelhecido presente no RAP.

Figura 16: Curvas granulométricas mistura virgem e misturas recicladas

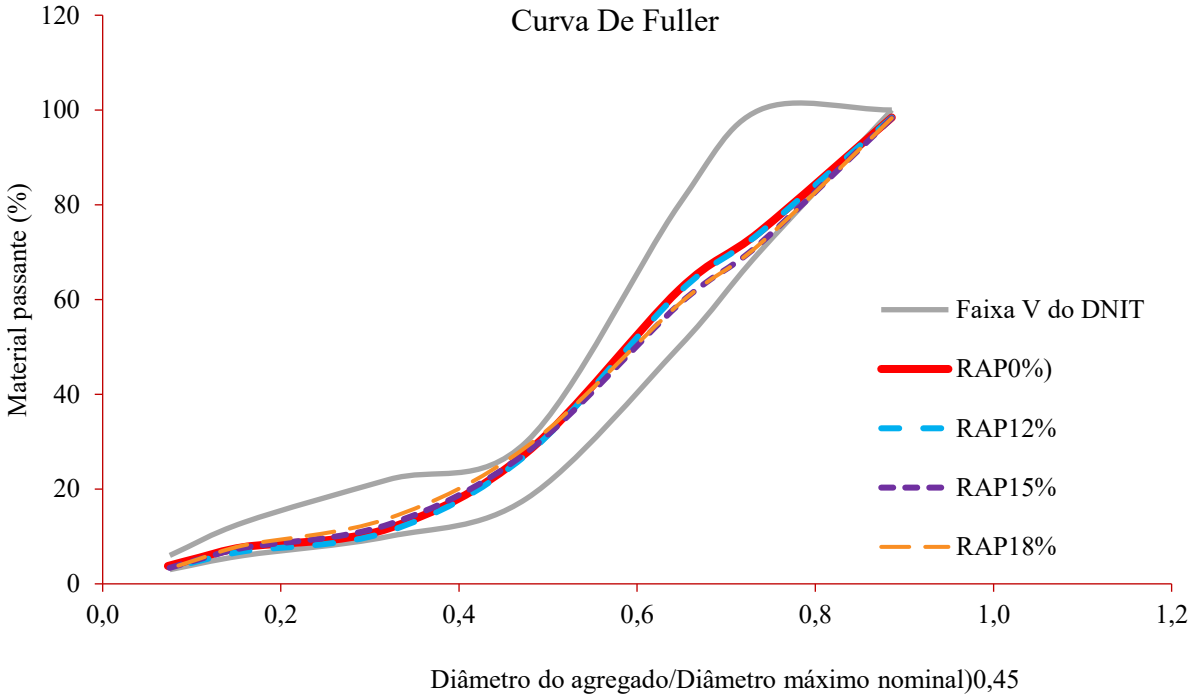


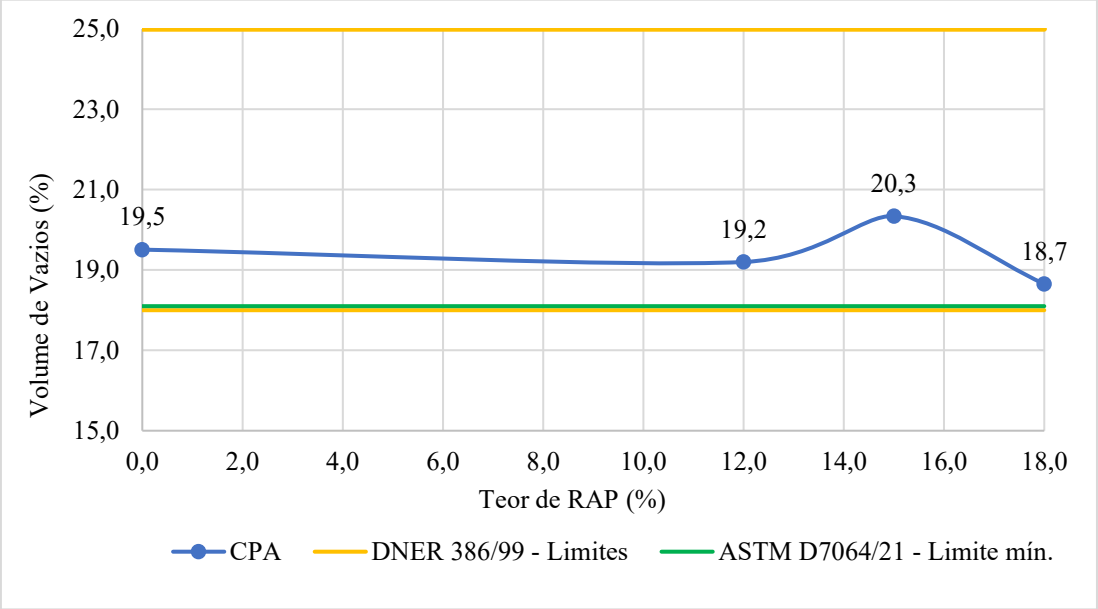
Tabela 12: Resumo da composição das misturas CPA pura e recicladas

Parâmetros	**Definições**	**CPA PURA**	**CPA+ RAP12%**	**CPA+ RAP15%**	**CPA+ RAP18%**
Faixa granulométrica		DNIT-ES 386/99 – Faixa V			
Composição granulométrica	Brita 19mm –	35%	35%	38%	38%
	Brita 12,5mm –	54%	51%	45%	42%
	RAP	0%	12%	15%	18%
	Pó de pedra –	8%	0%	0%	0%
	Filler (cal) –	3%	2%	2%	2%
Ligante asfáltico virgem (AMP 55/75)		4,5%	3,84%	3,68%	3,51%
Metodologia de compactação		CGS – 100 giros			
TU e TC		159°C e 149°C			

Essas três composições foram moldadas e submetidas ao ensaio de volume de vazios, sendo observado que todas atenderam ao valor mínimo exigido em norma, conforme apresentado na Figura 17. Esse resultado evidencia que a manutenção do comportamento granulométrico da mistura de referência é um fator determinante para a preservação das propriedades funcionais da CPA, mesmo na presença de RAP, reforçando os resultados

observados em estudos recentes sobre misturas porosas recicladas como Alecrim (2021) e Ranieri et al. (2022).

Figura 17: Volume de vazios versus teor de RAP



Como citado anteriormente todas as misturas da configuração 2 se mantiveram dentro dos limites normativos. No entanto, os resultados não apresentaram uma linearidade, diferente do esperado, quanto maior a quantidade de RAP menor o volume de vazios, devido a quantidade de finos do material fresado, a fim de verificação, o teor de 15%RAP foi repetido, obtendo um valor diferente para o volume de vazios (19,8%) resultado da heterogeneidade do RAP, mas ainda assim próximo ao valor de 20,3%. Dessa forma, a pesquisa seguiu para a caracterização mecânica e volumétrica das misturas (CPA PURO; CPA+12%RAP; CPA+15%RAP; CPA+18%RAP), conforme estabelecido na Tabela 12.

3.2.7. Caracterização mecânica e volumétrica da mistura CPA reciclada

Nesta pesquisa, os ensaios mecânicos e hidráulicos, apresentados no Quadro 3, permitiram analisar o comportamento das misturas asfálticas recicladas, mediante a dosagem realizada com base nos parâmetros determinados na especificação DNIT 386/1999 e a compactação com uso do CGS. Para que seja possível a análise, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de caracterização, estabelecidos pela norma americana que regulamenta misturas abertas do tipo CPA, ASTM D7064/13.

Os ensaios de caracterização volumétrica, permitiu que se verificasse a capacidade da mistura de manter sua característica funcional, sendo dosada pelos parâmetros da DNIT 386/1999, compactada pelo CGS e com incorporação de RAP.

Os ensaios de volume de vazios, desgaste por abrasão- Cântabro e escorrimento, seguiram o mesmo procedimento detalhado nos itens 3.2.4.4, 3.2.4.5 e 3.2.4.6. respectivamente.

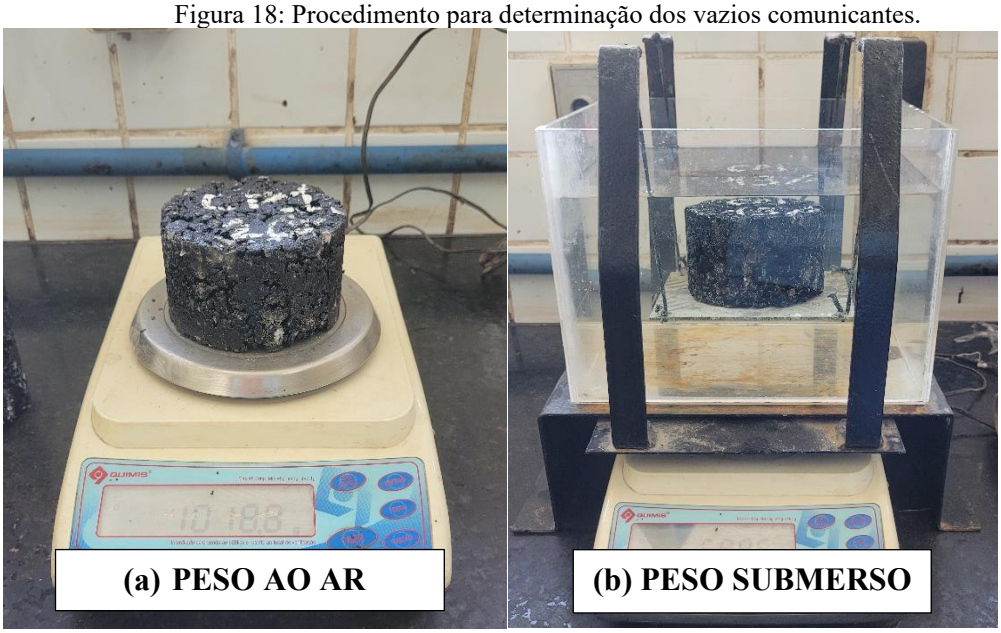
Quadro 4: Ensaios e normas utilizadas para caracterização mecânica e volumétrica das misturas.

ENSAIOS	MÉTODOS
Vazios comunicantes	-
Volume de vazios	DNIT- ME 427/2020 e 428/2022
Resistência à tração indireta por compressão diametral	DNIT-ME 136/2018
Determinação do dano por umidade induzida	DNIT-ME 180/2018
Escorrimento	ASTM D6390/2017
Desgaste por abrasão – Cântabro	DNIT-ME 383/1999
Módulo de resiliência	DNIT-ME 135 /2018

3.2.7.1.Vazios comunicantes

Para Oliveira (2003) determinar a porcentagem de vazios comunicantes em misturas, principalmente as com características drenantes, torna-se imprescindível para a análise da eficiência do revestimento quanto a permeabilidade, pois, a partir desta determinação, é possível quantificar o índice de vazios dos poros contínuos que contribui para a percolação da água. O ensaio para determinação dos vazios comunicantes seguiu o estabelecido pela Associação das Rodovias do Japão (1996) citado por Muniz *et al*. (2024) e Oliveira (2003), segundo as recomendações da associação deve-se medir com paquímetro a altura e o diâmetro do corpo de prova, em seguida determinar o seu volume, pesá-lo ao ar e submerso em água após um minuto de imersão, o procedimento está demostrado na Figura 18a e 18b.

Figura 18: Procedimento para determinação dos vazios comunicantes.



A fórmula que determina o índice de vazios comunicantes está descrita na Equação 3.

$$V_{VC}(\%) = \frac{V-C}{V} * 100 \qquad (3)$$

Onde:

Vvc: % de vazios comunicantes do corpo de prova;

V: Volume do corpo de prova;

C: Volume dos agregados e poros independentes.

C é determinado pela Equação 4:

$$C = \frac{P-P\prime}{\gamma água} \qquad (4)$$

Onde:

P: Peso do corpo de prova ao ar;

P': Peso do corpo de prova após mergulhá-lo por um minuto;

ɣ: peso específico da água.

3.2.7.2.Comportamento drenante

Para um fluido incompressível, a vazão que escoa em regime permanente no interior de um meio poroso é usualmente determinada a partir da Equação da Continuidade, conforme apresentado por Massey (2002) e expressa na Equação 8. Nesse contexto, Caputo (1973) define o coeficiente de permeabilidade (k) como a velocidade superficial de escoamento (v) da água através da área total da seção transversal (A, compreendendo tanto os vazios quanto os sólidos,

quando submetida a um gradiente hidráulico unitário (i = 1), conforme indicado na Equação 5. As expressões matemáticas correspondentes são apresentadas a seguir:

$$Q = A\ x\ v \qquad (5)$$

$$v = k\ x\ i \qquad (6)$$

Onde:

Q: vazão, (L3/T);

A: área da seção de escoamento, (L2);

v : velocidade superficial de escoamento, (LT-1);

k: coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica, (LT-1);

Logo, estes conceitos foram utilizados como base para o cálculo da permeabilidade das misturas, por meio dos dados da água drenada obtidos nas pesagens após os corpos de prova serem submetidos a chuva simulada.

O ensaio de chuva simulada (Figura 19) seguiu os parâmetros descritos por Silva Lopes et al. (2023), que analisou diferentes protocolos de envelhecimento para ligantes e misturas asfálticas densas. Para isto, o simulador foi calibrado com uma vazão de 8 l/min, considerando a média de chuva dos últimos oito anos, na cidade de Campina Grande, que foi de 500 mm/ano e, para um tempo de retorno de 12 meses, o processo de calibração seguiu os processos estabelecidos por Celeste (2025). As amostras foram submetidas a pluviosidade durante cinco horas. Este tempo é correspondente a intensidade de chuva (mm/h) detectada no simulador em função da vazão e do tempo retorno adotados.

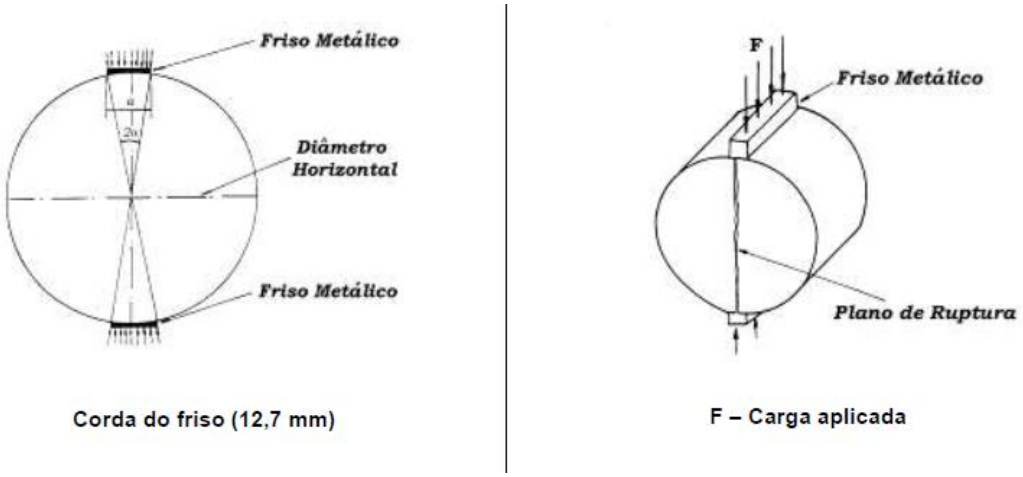
Após decorridas as cinco horas, os corpos de prova foram retirados e imediatamente pesados, a fim de verificar a água armazenada nos vazios, já que estes também foram pesados antes processo de simulação de chuva. As pesagens seguiram durante tempos pré-estabelecidos, até sete dias, com o intuito de verificar o comportamento drenante da mistura. Estes resultados foram comparados de forma relativa entre as misturas utilizadas nessa pesquisa.

3.2.7.3. Resistência à tração indireta por compressão diametral

Segundo Medina e Mota (2015), originalmente desenvolvido para determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, o ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral vem sendo utilizado para determinar a resistência de corpos de prova de misturas asfálticas desde 1980.

Bernucci et al (2022) esclarece que o ensaio consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram tensões de tração perpendiculares ao diâmetro, como mostra a Figura 19.

Figura 19:Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral



Fonte: (DNIT, 2018)

O ensaio utilizado nessa pesquisa seguiu as recomendações da DNIT-ME 136/2018, que determina que, o corpo de prova deve ser mantido por, no mínimo, 4 horas em um compartimento com temperatura controlada de 25ºC. Após esse período o corpo de prova deve ser acomodado em um dispositivo centralizador e levado à prensa.

A carga é aplicada a uma velocidade de 0,8 mm/s até a ruptura da amostra, após esse processo o valor de tensão é calculado por meio da Equação 3:

$$\sigma_R = \frac{2 * F}{\pi * D * H}$$

Onde:

σ_R: Tensão de tração (MPa);

F: Carga de compressão de ruptura (N);

D: Diâmetro da amostra (mm);

H: Altura da amostra (mm).

3.2.7.4.Determinação do Dano por Umidade Induzida

O Ensaio de Lottman Modificado, também denominado ensaio de resistência ao dano por umidade induzida, é utilizado para avaliar a adesividade das misturas asfálticas, permitindo analisar sua suscetibilidade à ação da água. A presença de umidade pode comprometer

significativamente o desempenho e a vida útil dos pavimentos, uma vez que afeta a interação entre o ligante asfáltico e os agregados (BERNUCCI et al., 2022).

O ensaio de determinação do dano por umidade induzida foi realizado nos corpos de prova da mistura de referência e nas misturas recicladas pesquisa e seguiu as recomendações da especificação de serviço 180/2018 do DNIT, incorporando adaptações recomendadas pela ASTM D7064 (2021), a especificação determina que a amostra para realização deste ensaio é de seis corpos de prova, sendo três destinados ao subgrupo de controle e três ao subgrupo condicionado. As amostras do subgrupo condicionado foram submetidas a ciclos de congelamento e descongelamento, consistindo em 16 horas a –18 °C seguidas de 24 horas a 60 °C. Ao final dos ciclos, todos os corpos de prova foram ensaiados para a determinação da resistência à tração indireta.

Para as misturas de graduação aberta, o procedimento adotado difere daquele aplicado a misturas com aproximadamente 7% de vazios, uma vez que são realizados cinco ciclos de congelamento e descongelamento, em substituição ao único ciclo usualmente empregado. Além disso, foi aplicado vácuo de 87,8 kPa por 10 minutos, com o objetivo de promover a saturação dos corpos de prova em diferentes níveis. Durante os ciclos de congelamento, os corpos de prova permaneceram submersos em água, de modo a garantir a manutenção da condição de saturação ao longo de todo o ensaio, conforme mostram as Figuras 20a e 20b.

Figura 20: Condicionamento dos corpos de prova.



Após os ciclos de congelamento e descongelamento os três corpos de prova foram levados para um banho de água a 60 ºC durante 24h (Figura 21). Após esse período foram

retirados e submergidos em um banho a 25°C por 2h. Só após esses processos os seis corpos de prova foram rompidos na mesma prensa onde foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 21: Corpos de prova em banho-maria a 60°C.



O dano por umidade induzida é determinado como a razão a resistência à tração por compressão diametral do corpo de prova do subgrupo condicionado e a resistência do subgrupo de controle como mostra a Equação 4:

$$RRT = \frac{RT_C}{RT} * 100\%$$

Onde:

RRT (%): é a razão de resistência à tração retida;

RT_C: é a média da resistência à tração por compressão diametral de três corpos de prova que sofreram condicionamento, em MPa;

RT: é a média da resistência à tração por compressão diametral de três corpos de prova que não sofreram condicionamento, em MPa.

3.2.7.5.Módulo de Resiliência

O ensaio para determinação do módulo de resiliência da mistura asfáltica do tipo CPA, seguiu as recomendações estabelecidas norma DNIT ME 135/2018., o ensaio foi realizado na prensa hidráulica UTM-25 da IPC e os resultados foram obtidos com auxílio do software UTS0031.39 Indirect Tensile Modulus Test. Os corpos de prova foram acondicionados na prensa e a eles foram conectados os LVDTs (Linear Variable Differential Transducer) que

mediram a deformação elástica do CP durante o carregamento cíclico com frequência de 1Hz, sendo que 0,1segundo foi utilizado para aplicação de carga e 0,9 segundo para descanso.

Este ensaio se fundamenta na aplicação repetida de uma carga no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico, essa aplicação de carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação e o valor de deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada é medido durante o ensaio. O equipamento utilizado no ensaio é automatizado, sendo empregado um software específico para o cálculo do módulo de resiliência (MR). O valor de MR considerado corresponde à média de cinco leituras, obtidas após os ciclos de condicionamento aos quais o corpo de prova foi previamente submetido.

Nos corpos de prova da CPA, foi aplicada, com uma frequência de 50 ciclos por minuto, e tempo de aplicação de 0,10 segundos, uma carga igual a 10% da força da RT.

Os ensaios de carga repetida caracterizam-se pela aplicação de esforços sempre no mesmo sentido de compressão, variando de zero até um valor máximo e, em seguida, reduzindo-se até a anulação da carga ou até um patamar inferior, para então serem reaplicados após um curto intervalo de repouso. Esse tipo de ensaio tem como objetivo avaliar o comportamento do material sob solicitações cíclicas. A amplitude da carga e o tempo de pulso estão relacionados à velocidade dos veículos, enquanto a profundidade considerada influencia os níveis de tensão e deformação gerados. Já a frequência de aplicação das cargas está associada ao fluxo de tráfego atuante (MOURÃO et al., 2003).

O ensaio de determinação do módulo de resiliência, realizado por meio da tração indireta com carregamento repetido, permite simular o comportamento mecânico da mistura asfáltica nas regiões onde se desenvolvem as deformações específicas de tração, as quais são responsáveis pelos mecanismos de fadiga da camada asfáltica (SALES, 2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados para caracterização das misturas asfálticas desenvolvidas nesta pesquisa, com ênfase na avaliação do desempenho das misturas CPA contendo RAP, em comparação com a mistura de referência, sem o material fresado. As análises têm como objetivo verificar os efeitos da incorporação do RAP sobre as propriedades funcionais, mecânicas e hidráulicas da Camada Porosa de Atrito, considerando as particularidades desse tipo de revestimento.

São discutidos os resultados referentes à mistura de referência, os quais servem como base para a análise comparativa. Em seguida são apresentados os resultados obtidos para as misturas recicladas, avaliando-se a influência dos diferentes teores de RAP sobre parâmetros como volume de vazios, resistência à abrasão (ensaio Cântabro), resistência à tração por compressão diametral, escorrimento, módulo de resiliência, resistência ao dano por umidade induzida (Lottman Modificado), vazios comunicantes e comportamento drenante. A análise conjunta desses resultados permite identificar alterações no comportamento da mistura decorrentes da incorporação do material fresado.

Por fim, os resultados são discutidos de forma comparativa, buscando-se estabelecer relações entre a estrutura granulométrica, a energia de compactação adotada e o desempenho observado à luz dos critérios normativos e funcionais aplicáveis.

4.1.Caracterização mecânica e hidráulica da mistura CPA reciclada

4.1.1. Volume de vazios

O volume de vazios é um dos parâmetros mais importantes na avaliação de misturas do tipo Camada Porosa de Atrito, pois está diretamente associado à sua principal função, que é a drenagem das águas superficiais. Além disso, esse parâmetro exerce influência significativa sobre o comportamento mecânico da mistura. Neste ensaio, avaliou-se o efeito da incorporação de RAP nos teores de 12%, 15% e 18%, comparando-se os resultados obtidos com aqueles da mistura de referência, sem adição de material fresado, de modo a verificar a manutenção da estrutura porosa exigida para CPA.

Tabela 13:Volume de vazios das misturas CPA com diferentes teores de RAP e limites normativos.

MISTURAS	Limite mín. ASTM D7064/21 e DNIT 386/99 (%)	Limite máx. DNIT 386/99 (%)	Volume de Vazios (%)
CPA PURA	18	25	19,5

CPA+12%RAP	18	25	19,2
CPA+15%RAP	18	25	20,3
CPA+18%RAP	18	25	18,7

Os resultados do ensaio de volume de vazios, apresentados na Tabela 13, indicam que tanto a mistura de referência (0% de RAP) quanto as misturas recicladas com 12%, 15% e 18% de RAP atenderam ao valor mínimo de 18%, estabelecido pelas normas DNIT ES 386/1999 e ASTM D7064/2021. Esse resultado é particularmente relevante, uma vez que o volume de vazios constitui o principal parâmetro funcional da Camada Porosa de Atrito, estando diretamente associado à sua capacidade de drenagem superficial.

Observa-se, entretanto, que a variação do volume de vazios em função do teor de RAP não apresenta comportamento monotônico, evidenciando uma tendência não linear. Enquanto a mistura com 12% de RAP apresentou volume de vazios semelhante ao da mistura de referência, a incorporação de 15% de RAP resultou em um aumento do volume de vazios, seguido de uma redução para o teor de 18% de RAP. Esse comportamento não linear não pode ser atribuído exclusivamente ao teor de RAP, mas está fortemente relacionado às características intrínsecas do material fresado utilizado.

A literatura aponta que o RAP, quando utilizado sem fracionamento granulométrico prévio, apresenta elevada heterogeneidade, tanto em termos de distribuição granulométrica quanto de teor e estado do ligante envelhecido (COPELAND, 2011; FHWA, 2018). A presença de frações finas aderidas aos agregados graúdos, oriundas do processo de fresagem, tende a variar significativamente entre amostras, dificultando o controle preciso da composição granulométrica final da mistura. Em misturas porosas, essa variabilidade assume papel ainda mais crítico, uma vez que pequenas alterações na fração fina podem impactar de forma significativa a estrutura de vazios.

Alecrim (2021) destaca que, em CPAs contendo RAP, a introdução de material fino proveniente do fresado pode provocar alterações localizadas no empacotamento dos agregados, afetando a conectividade e o volume total de vazios, mesmo quando a curva granulométrica global se mantém dentro da faixa normativa. Assim como observa que a variabilidade granulométrica do RAP influencia diretamente o comportamento volumétrico de misturas porosas recicladas, especialmente quando o material não passa por processos de separação ou classificação prévia.

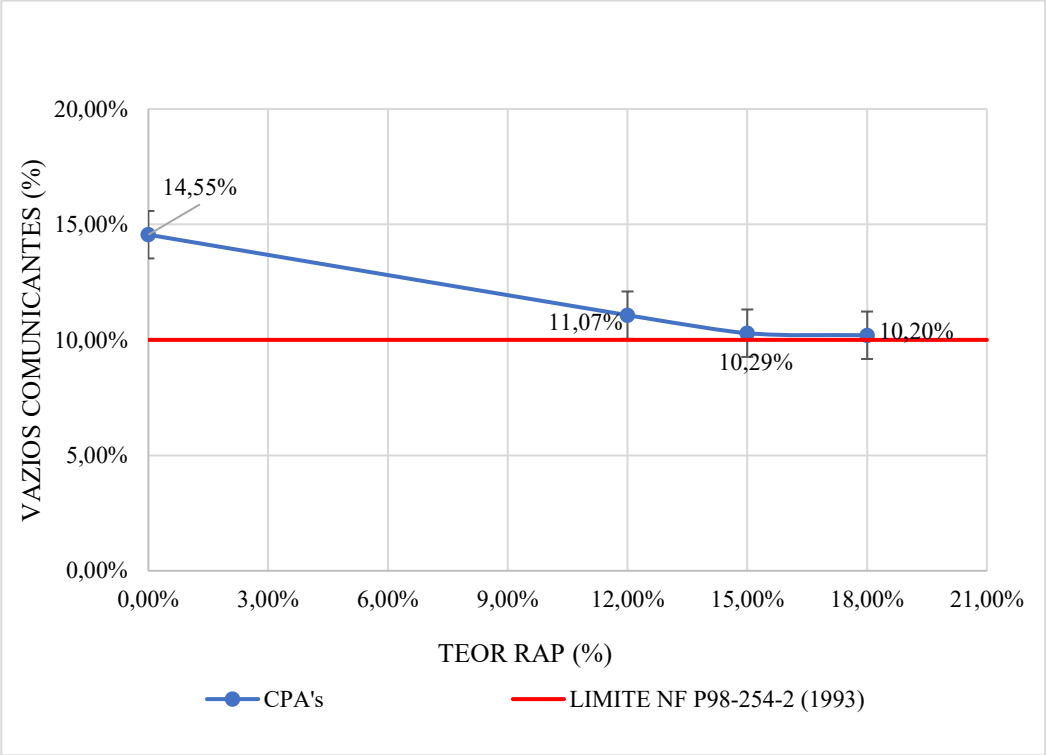
Nesse contexto, o aumento do volume de vazios observado para o teor de 15% de RAP pode estar associado a uma redistribuição mais favorável dos agregados na mistura, enquanto a redução observada para 18% de RAP pode ser explicada pela maior contribuição relativa de finos oriundos do RAP, que tendem a ocupar parte dos vazios originalmente destinados ao escoamento da água. Esse efeito reforça a sensibilidade das CPAs à presença de material fino, conforme discutido por Garcia (2017), que aponta a estrutura granulométrica como fator determinante para a manutenção da porosidade funcional em misturas de graduação aberta.

Apesar da não linearidade observada, os resultados demonstram que a estratégia adotada de ajuste da composição granulométrica, buscando manter comportamento semelhante ao da mistura virgem, foi eficaz para preservar o volume mínimo de vazios exigido em norma, mesmo com a incorporação de RAP. Isso evidencia que, embora a heterogeneidade do RAP imponha limitações ao controle preciso da estrutura interna da mistura, é possível viabilizar sua utilização em CPAs desde que sejam adotados critérios rigorosos de dosagem e verificação funcional.

4.1.2. Vazios comunicantes

Os vazios comunicantes correspondem à fração do volume de vazios que se encontra efetivamente conectada, sendo diretamente responsável pela capacidade de escoamento da água através da mistura. A análise desse parâmetro complementa a avaliação do volume total de vazios, fornecendo uma visão mais precisa da funcionalidade hidráulica da CPA. Na Figura 23 são apresentados os resultados obtidos para a mistura de referência e para as misturas recicladas com 12%, 15% e 18% de RAP, permitindo comparar a conectividade dos vazios em cada caso.

Figura 22:Vazios comunicantes versus teor de RAP



Os resultados da Figura 29 mostram uma redução progressiva na porcentagem de vazios comunicantes com o aumento do teor de RAP, partindo de 14,55% na mistura de referência (0% RAP), passando por 11,07% (12% RAP), e atingindo valores próximos ao limite mínimo adotado, de 10%, para as misturas com 15% (10,29%) e 18% de RAP (10,20%). Como critério de comparação, adotou-se o valor mínimo de 10% indicado pela norma francesa NF P98-254-2 (1993). Ressalta-se que, embora o procedimento experimental não tenha seguido integralmente os parâmetros dessa norma, o limite foi utilizado como referência técnica para interpretar a conectividade dos vazios, uma vez que esse aspecto é determinante para o desempenho hidráulico de misturas porosas.

Diferentemente do que foi observado no volume de vazios totais, cujo comportamento apresentou não linearidade (com elevação para 15% RAP), os vazios comunicantes exibiram uma tendência aproximadamente linear de redução com o incremento de RAP. Esse comportamento contraria a expectativa intuitiva de que um maior volume de vazios totais se refletiria automaticamente em maior conectividade. Na prática, contudo, a literatura é clara ao indicar que vazios totais e vazios comunicantes não são equivalentes, pois a conectividade depende do arranjo do esqueleto mineral, da distribuição granulométrica e, sobretudo, da

presença e dispersão de frações finas que podem “estrangular” os canais de escoamento (Sousa, 2024; Garcia, 2017). Assim, é possível que a mistura com 15% RAP apresente mais vazios totais, mas com maior parcela de vazios não conectados, o que ajuda a explicar a manutenção de vazios comunicantes em patamar próximo ao limite.

A tendência de redução dos vazios comunicantes com o aumento do teor de RAP reforça a hipótese de que o material fresado empregado, sem fracionamento granulométrico prévio, introduziu maior variabilidade na composição da mistura e incremento relativo da fração fina. Essa condição dificulta o controle da estrutura interna e da conectividade efetiva dos poros. Copeland (2011) e o FHWA (2018) destacam que a heterogeneidade granulométrica e reológica do RAP constitui um dos principais entraves à previsibilidade de desempenho, sobretudo quando utilizado em misturas com elevada sensibilidade à distribuição de partículas, como aquelas de graduação aberta.

No caso específico da Camada Porosa de Atrito (CPA), essa sensibilidade torna-se ainda mais crítica, uma vez que pequenas variações na fração passante nas peneiras mais finas podem reduzir significativamente a conectividade dos vazios, mesmo quando o teor total de vazios permanece dentro dos limites normativos. Alecrim (2021) demonstra que a conectividade dos poros é parâmetro determinante para o desempenho hidráulico da CPA, sendo mais influenciada pela distribuição granulométrica e pela coesão do ligante do que pelo volume global de vazios isoladamente.

Apesar da redução observada, os valores obtidos para as misturas com RAP mantiveram-se muito próximos do limite de 10% e, ao mesmo tempo, permanecem compatíveis com valores reportados na literatura para misturas CPA enquadradas na Faixa V do DNIT e com teores de ligante similares aos adotados neste estudo. Sousa (2024), avaliando misturas na Faixa V com teor de ligante de 4,5%, reportou vazios comunicantes variando entre 10,3% e 14,6%. Alves (2019), ao avaliar uma CPA enquadrada na Faixa V com teor de ligante de 4,5%, reportou vazios comunicantes em torno de 11,3%. Knabben (2012), para uma CPA também enquadrada na Faixa V e com 4,3% de ligante, obteve valor médio de 14,27%. Esses resultados situam os valores obtidos nesta pesquisa dentro de uma faixa coerente com estudos anteriores, especialmente considerando que as misturas com 15% e 18% RAP ficaram próximas do limite inferior adotado.

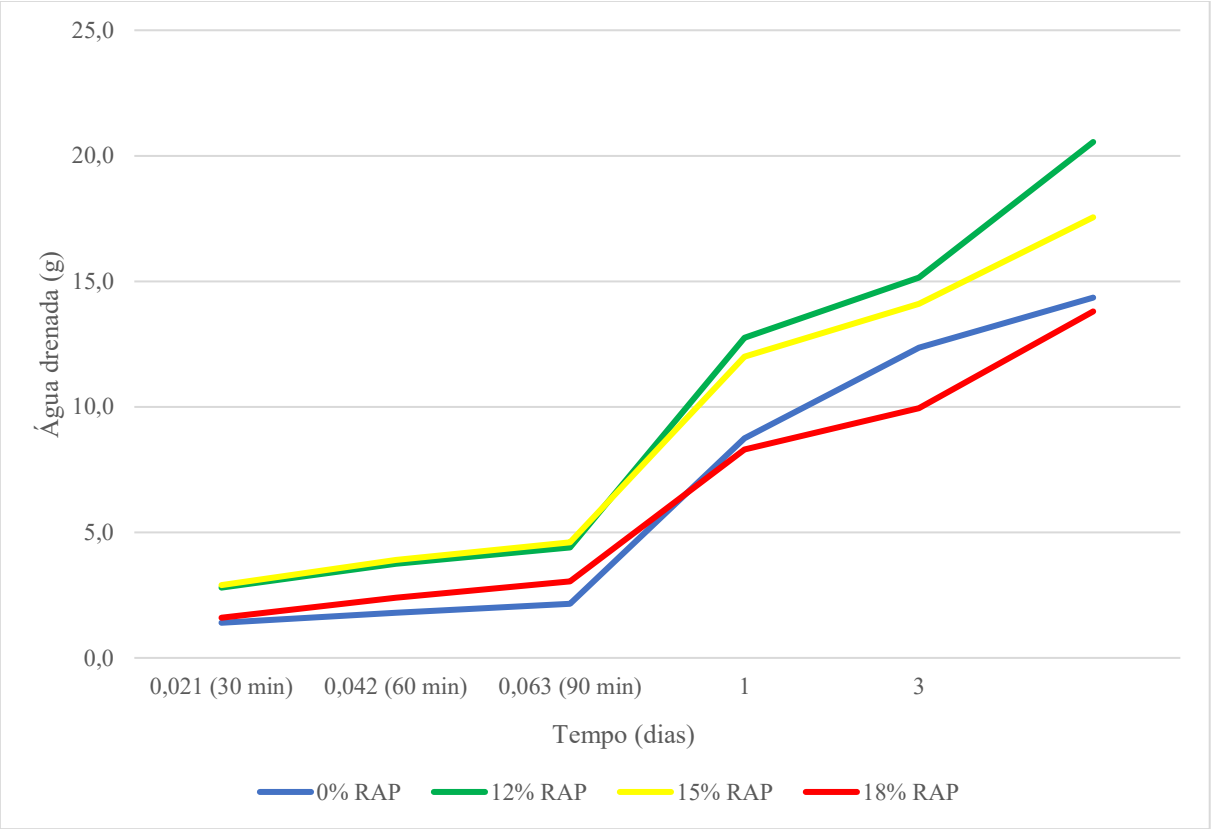
Do ponto de vista funcional, o fato de as misturas com 15% e 18% RAP apresentarem vazios comunicantes em torno de 10% merece atenção, pois indica que a conectividade da rede de poros já se encontra em um patamar mínimo de referência. Isso sugere que, embora o volume

total de vazios tenha atendido aos requisitos normativos, a incorporação de RAP tende a reduzir a porção efetivamente drenante da estrutura, o que pode afetar o desempenho hidráulico e aumentar a suscetibilidade à colmatação ao longo do tempo. Portanto, os resultados reforçam a importância de controlar a granulometria efetiva do RAP (especialmente a fração fina) quando se busca preservar conectividade em misturas porosas, além de justificar a avaliação conjunta de vazios totais, vazios comunicantes e comportamento drenante para uma interpretação completa do desempenho funcional.

4.1.3. Comportamento drenante

O comportamento drenante das misturas asfálticas porosas está diretamente associado à sua capacidade de reduzir a lâmina d'água na superfície do pavimento, contribuindo para a segurança e o conforto dos usuários. Esse comportamento depende da interação entre a estrutura granulométrica, o volume de vazios e os vazios comunicantes. A seguir, são apresentados os resultados do ensaio que permitiu avaliar o desempenho drenante da mistura de referência e das misturas CPA com 12%, 15% e 18% de RAP, possibilitando uma análise comparativa da eficiência hidráulica das misturas estudadas.

Figura 23:Água drenada acumulada em função do tempo para misturas CPA com diferentes teores de RAP



Na Figura 24, os resultados do ensaio de comportamento drenante indicam que todas as misturas avaliadas apresentaram capacidade de drenagem compatível com revestimentos do tipo CPA. Observa-se que, para todas as composições, a maior parcela da água retida pelos corpos de prova foi drenada nas primeiras 24 horas após a simulação de chuva, estimou-se que aproximadamente 62% do volume total de água drenada tenha sido escoado nesse período. Esse comportamento evidencia a eficiência inicial do sistema de vazios das misturas CPA, característica desejável para a rápida remoção da água após eventos de precipitação.

Resultados semelhantes são relatados por Sousa (2024), que ao avaliar CPAs enquadradas na Faixa V do DNIT e com teor de ligante de 4,5%, observou que a maior parte da água infiltrada era drenada nas primeiras horas do ensaio, indicando bom desempenho hidráulico inicial. De forma convergente, Alecrim (2021) destaca que o comportamento drenante de CPAs está fortemente associado à conectividade dos vazios, sendo comum a ocorrência de elevados volumes de escoamento logo após a aplicação da carga hidráulica.

A mistura com 12% de RAP apresentou o maior volume acumulado de água drenada ao longo do período analisado, seguida pelas misturas com 15%, Pura e 18% de RAP, respectivamente. Contudo, esse comportamento não corresponde diretamente aos valores de

vazios comunicantes, uma vez que a mistura de referência (PURA), apresentou o maior percentual desse parâmetro. Tal resultado indica que o desempenho hidráulico da CPA não depende exclusivamente da fração de vazios comunicantes, mas também da organização espacial da rede porosa, da distribuição do tamanho dos poros e da continuidade efetiva dos canais de escoamento. Estudos como os de Knabben (2012) e Alves (2019) demonstram que misturas enquadradas na Faixa V do DNIT, mesmo com volumes totais ou comunicantes semelhantes, podem apresentar comportamentos drenantes distintos em função da estrutura interna e da presença de estrangulamentos nos caminhos de fluxo.

Por outro lado, observa-se que a mistura com 15% de RAP, embora tenha apresentado maior volume total de vazios em relação à mistura com 12% de RAP, não apresentou incremento proporcional no desempenho drenante. Esse resultado reforça que o volume de vazios, isoladamente, não é um indicador suficiente da eficiência hidráulica, uma vez que parte desses vazios pode não estar efetivamente conectada. Conforme discutido por Sousa (2024), a permeabilidade de misturas porosas está mais relacionada à conectividade, continuidade e tortuosidade da rede de poros do que ao volume total de vazios.

A não linearidade observada no comportamento drenante das misturas com RAP pode ser atribuída, principalmente, à heterogeneidade do material fresado, utilizado sem fracionamento granulométrico. A presença variável de frações finas aderidas aos agregados do RAP tende a alterar localmente a estrutura interna da mistura, promovendo o bloqueio parcial dos canais de escoamento e dificultando o controle preciso da permeabilidade. Esse efeito é particularmente crítico em misturas de graduação aberta, nas quais pequenas variações na fração fina podem comprometer significativamente a conectividade dos vazios (ALECRIM, 2021; SOUSA, 2024).

Como o escoamento mais significativo ocorreu nas primeiras 24 horas, esses dados foram utilizados para a estimativa da taxa de escoamento pela equação da continuidade e, consequentemente, para a determinação dos coeficientes de permeabilidade das misturas analisadas. As vazões obtidas e os respectivos coeficientes de permeabilidade são apresentados na Tabela 13, permitindo uma avaliação quantitativa do desempenho hidráulico das misturas recicladas em comparação com a mistura de referência.

Tabela 14: Resumo dos coeficientes de permeabilidade das misturas CPA

Mistura	Água retida após chuva simulada (g)	Água escoada em 24 horas (g)	Vazão (cm^3/s)	k (cm/s)
CPA Pura	16,7	8,8	$1,02 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-6}$
CPA+12% RAP	23,5	12,8	$1,48 \times 10^{-4}$	$1,89 \times 10^{-6}$
CPA+15% RAP	19,5	12,0	$1,39 \times 10^{-4}$	$1,77 \times 10^{-6}$
CPA+18% RAP	14,8	8,3	$9,61 \times 10^{-5}$	$1,22 \times 10^{-6}$

Os resultados da Tabela 13 indicam que a incorporação de RAP não comprometeu o comportamento drenante relativo das misturas, uma vez que os coeficientes de permeabilidade permaneceram na mesma ordem de grandeza da mistura de referência, sugerindo que teores moderados não prejudicaram a capacidade de escoamento.

Entretanto, ao comparar os valores obtidos com aqueles reportados na literatura, verifica-se diferença significativa de ordem de grandeza. Goh e You (2012) e Shen, Wu e Du (2008) indicam que revestimentos porosos com boa drenabilidade apresentam coeficientes superiores a 0,01 cm/s, enquanto a ASTM D7064/21 estabelece valores mínimos da ordem de 0,12 cm/s. Os valores obtidos neste estudo situam-se na ordem de 10^{-6} cm/s, o que sugere que o procedimento experimental adotado não reproduz diretamente as condições do ensaio padrão de permeabilidade vertical constante utilizado para avaliação hidráulica de CPA.

Esse comportamento também foi observado por Sousa (2024) que identificou discrepâncias entre valores obtidos em ensaios laboratoriais alternativos e aqueles medidos por métodos normativos de permeabilidade. Tal diferença indica que o método aplicado pode estar captando predominantemente o escoamento retardado e a retenção interna de água, em vez da permeabilidade hidráulica clássica associada à drenagem rápida.

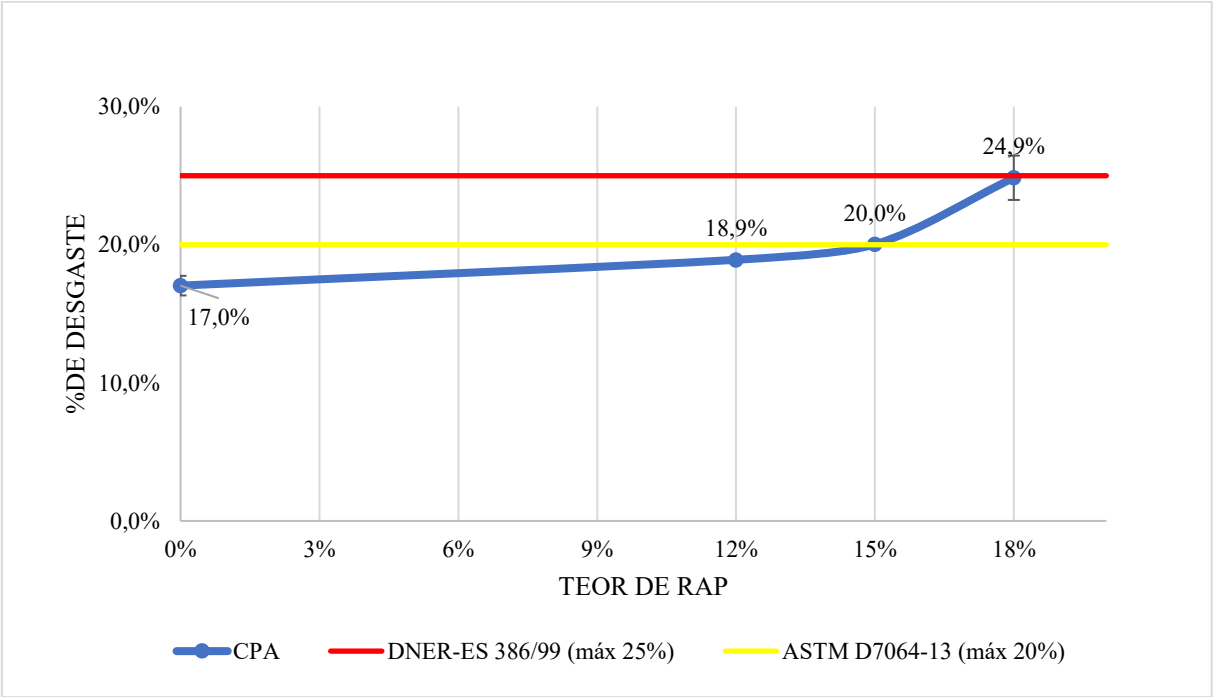
Adicionalmente, embora a mistura pura tenha apresentado maior percentual de vazios comunicantes, o maior coeficiente de permeabilidade foi observado para 12% de RAP. Esse resultado indica que o desempenho hidráulico não depende exclusivamente do volume de vazios comunicantes, mas também da organização espacial da rede porosa, da tortuosidade dos canais e da presença de possíveis estrangulamentos locais. A heterogeneidade do RAP utilizado,

sem fracionamento granulométrico e com presença variável de finos, pode ter influenciado essa microestrutura interna, afetando a conectividade efetiva e a eficiência do escoamento.

4.1.4. Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cântabro

Neste subtópico, são apresentados os resultados do ensaio Cântabro para a mistura de referência e para as misturas recicladas com 12%, 15% e 18% de RAP, permitindo analisar a influência do material fresado sobre a durabilidade da camada. Os resultados são a média de três corpos de prova para cada teor, bem como são apresentados os respectivos desvios padrão.

Figura 24: Desgaste por abrasão versus Teor de RAP.



Os resultados do ensaio de desgaste por abrasão - Cântabro, apresentados na Figura 25, indicam tendência de aumento do desgaste com o incremento do teor de RAP na mistura. Esse comportamento é coerente com a sensibilidade das misturas do tipo CPA ao equilíbrio entre teor efetivo de ligante, coesão interna e estrutura porosa, uma vez que a graduação aberta, por natureza, apresenta menor área de contato ligante–agregado, e maior propensão à desagregação.

Sob análise normativa, todas as misturas atenderam ao limite de 25% estabelecido pela DNIT ES 386/1999. No entanto, quando comparadas ao critério mais restritivo da ASTM D7064 (máximo de 20%), observa-se que a mistura com 18% de RAP ultrapassou o limite, ao passo que a mistura com 15% de RAP atingiu exatamente o limiar. Esse resultado indica que,

embora o teor de 18% de RAP ainda seja aceitável segundo a especificação brasileira, a mistura está no limite, o que do ponto de vista de durabilidade ao desgaste, acaba por reduzir sua margem de segurança.

Do ponto de vista mecanístico, o aumento do desgaste com a incorporação de RAP pode ser interpretado como resultado combinado de dois efeitos típicos da reciclagem, a contribuição do ligante envelhecido do RAP, que tende a elevar a rigidez do sistema ligante–agregado e a redução do ligante virgem adotado na compensação do teor total, o que pode diminuir a fração de ligante efetivamente disponível para promover coesão e recobrimento adequado dos agregados. Melo Neto (2022) e de Carvalho (2022), discutem que a presença de ligante envelhecido altera a resposta mecânica das misturas recicladas, podendo torná-las mais rígidas e menos tolerantes à solicitação repetida, em misturas abertas, esse efeito pode se manifestar como maior suscetibilidade à abrasão, sobretudo quando a mistura opera com menor "margem" de ligante efetivo.

Alecrim (2021), ao avaliar CPA recicladas em meio urbano, discute que a durabilidade de camadas porosas é altamente sensível à estrutura da mistura e ao balanço ligante–granulometria, sendo o Cântabro um indicador direto da propensão à desagregação. Na mesma linha, Knabben (2012) e Alves (2019) reportam valores de desempenho para CPAs enquadradas na Faixa V e destacam a importância do controle granulométrico e do teor de ligante para evitar perdas excessivas por abrasão.

Além disso, deve-se considerar que o RAP empregado sem fracionamento granulométrico, oriundo de uma camada de pavimentação densa, pode contribuir para heterogeneidade local da mistura, com variação na quantidade de finos aderidos e na distribuição do ligante envelhecido ao longo dos corpos de prova. Em misturas porosas, pequenas mudanças nessa microestrutura podem impactar a coesão e o intertravamento do esqueleto mineral, refletindo-se diretamente no Cântabro. Assim, o aumento mais acentuado observado para 18% de RAP pode estar associado não apenas ao teor em si, mas também à combinação entre maior rigidez média e maior sensibilidade à variabilidade do material fresado.

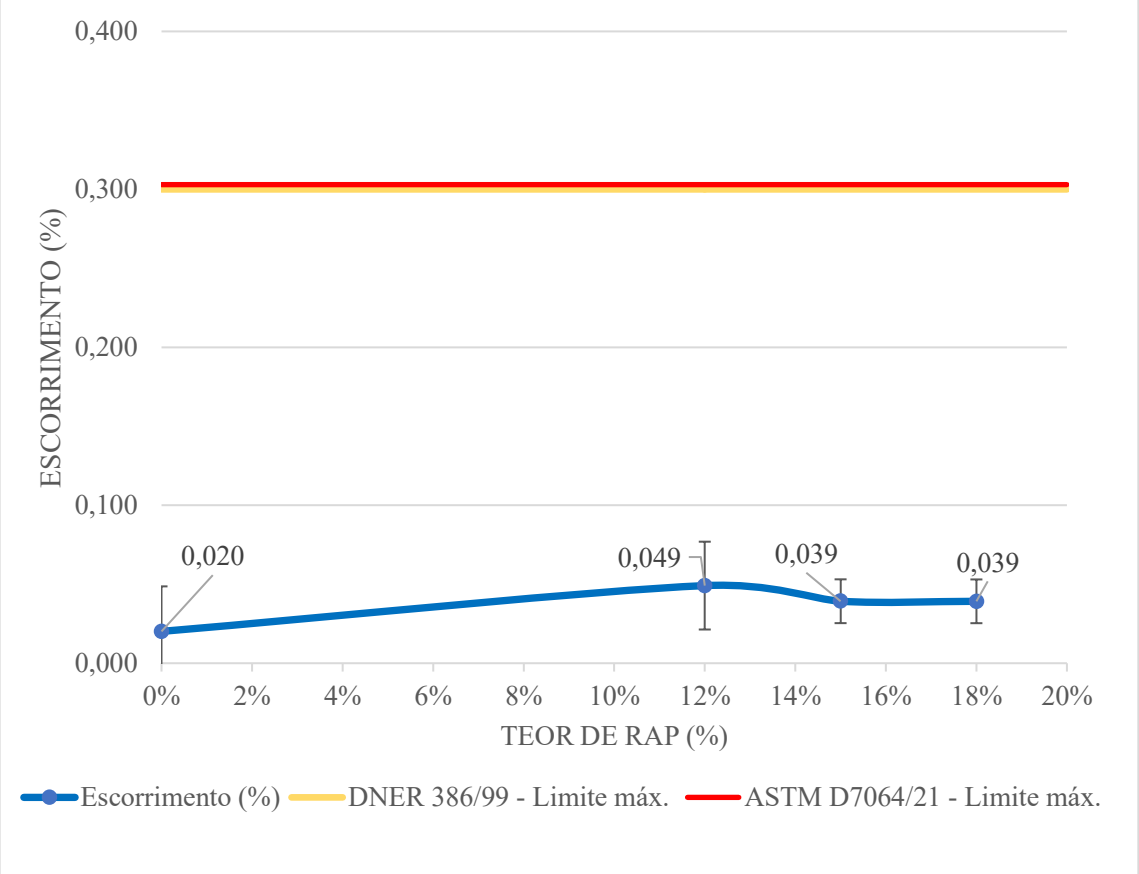
Em síntese, os resultados do ensaio Cântabro sugerem que a incorporação de RAP em CPA é tecnicamente possível, porém com redução gradual de desempenho ao desgaste à medida que o teor aumenta, tornando-se mais crítica para o teor de 18%, que se mantém dentro do limite da DNIT ES 386/1999, mas ultrapassa o critério mais restritivo da ASTM. Dessa forma, os teores de 12% e 15% de RAP apresentam um comportamento mais equilibrado entre viabilidade ambiental e manutenção de desempenho, enquanto o teor de 18% demanda maior cautela e

controle, sobretudo quanto à variabilidade granulométrica do RAP e à condição efetiva do ligante na mistura.

4.1.5. Escorrimento

O ensaio de escorrimento tem como finalidade avaliar a estabilidade do ligante asfáltico durante o processo de usinagem, aspecto crítico em misturas de graduação aberta, nas quais a menor quantidade de finos pode favorecer a migração do ligante. Neste contexto, são apresentados os resultados de escorrimento obtidos para a mistura de referência e para as misturas com 12%, 15% e 18% de RAP, permitindo verificar se a incorporação do material fresado afeta o comportamento do ligante durante a produção.

Figura 25: Porcentagem de Escorrimento (%) versus Teor de RAP (%)



Os resultados do ensaio de escorrimento, apresentados na Figura 26, mostram que todas as misturas avaliadas apresentaram valores de escorrimento substancialmente inferiores ao limite máximo de 0,30% estabelecido tanto pela DNIT ES 386/1999 quanto pela ASTM D7064/2021. Esse resultado é relevante para misturas de graduação aberta, como a CPA, uma vez que a menor fração fina e a estrutura mais aberta podem favorecer a migração do ligante

durante a usinagem e o transporte, sobretudo quando há excesso de ligante ou temperaturas elevadas.

Observa-se que o escorrimento aumentou da mistura de referência para a mistura com 12% de RAP, que apresentou o maior valor, e em seguida reduziu para as misturas com 15% e 18% de RAP. Apesar dessa variação, os valores permanecem baixos e indicam que, nas condições de produção adotadas, não houve tendência de segregação significativa do ligante. A ocorrência do valor máximo no teor de 12% pode estar associada à combinação específica entre granulometria resultante e teor efetivo de ligante na mistura, visto que pequenas alterações na distribuição granulométrica em CPAs podem modificar a capacidade de retenção do ligante pela matriz mineral.

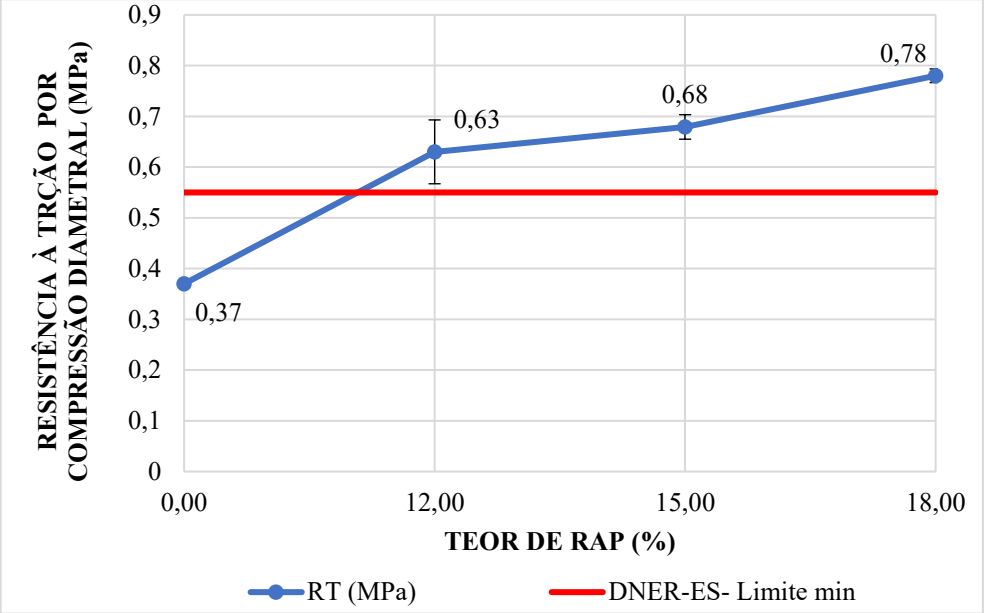
De modo geral, os resultados indicam que a incorporação de RAP não agravou o escorrimento das misturas estudadas. Esse comportamento é coerente com observações reportadas por Mogawer et al. (2015) e Zaumanis e Mallick (2015), que atribuem a redução da mobilidade do ligante em misturas com RAP ao aumento da rigidez do sistema ligante decorrente da presença de ligante envelhecido. Em misturas abertas, Huang et al. (2013) e Elseifi et al. (2012) verificaram que teores moderados de RAP não resultaram em aumento significativo do escorrimento, desde que mantido o controle granulométrico e o teor efetivo de ligante.

Nesse contexto, os resultados obtidos nesta pesquisa sugerem que o ligante envelhecido presente no RAP pode ter contribuído para maior estabilidade térmica do sistema ligante, sem comprometer o comportamento volumétrico da mistura. Assim, o ensaio de escorrimento confirma que as misturas avaliadas apresentaram estabilidade adequada durante a produção, não configurando fator limitante para a continuidade das análises mecânicas e funcionais.

4.1.6. Resistência à tração indireta por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados no gráfico da Figura 27. Os valores são uma média dos resultados de três corpos de prova, além disso, estão apresentados os respectivos desvios-padrão para cada mistura

Figura 26: Resultados dos ensaios de RT



Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), apresentados na Figura 27, evidenciam aumento expressivo da resistência com a incorporação de RAP. Para a condição de compactação com 100 giros no Compactador Giratório Superpave (CGS), a mistura de referência (0% RAP) apresentou RT de aproximadamente 0,37 MPa, enquanto as misturas com 12%, 15% e 18% de RAP alcançaram valores da ordem de 0,63 MPa, 0,68 MPa e 0,78 MPa, respectivamente.

Destaca-se que esses valores foram obtidos sob nível de compactação correspondente a 100 giros, superior ao recomendado pela ASTM D7064 para misturas do tipo OGFC. Ainda assim, o resultado é relevante, pois as misturas recicladas superaram o limite mínimo de 0,55 MPa estabelecido pela DNIT ES 386/1999 para CPA, indicando que o incremento de rigidez promovido pela incorporação de RAP, associado ao maior nível de densificação, contribuiu significativamente para o ganho de resistência.

Esse comportamento é particularmente significativo considerando que, em estudos anteriores envolvendo CPAs compactadas sob níveis normativos usuais, o não atendimento ao limite mínimo de RT tem sido amplamente discutido em função da própria natureza aberta da mistura, conforme relatado por Motta et al. (2010), Jaques (2018), Alecrim (2021) e Sousa (2024).

Do ponto de vista mecanístico, o incremento de RT com o aumento do teor de RAP pode ser explicado, de forma plausível, pela contribuição do ligante envelhecido presente no material fresado, que tende a elevar a rigidez do sistema ligante–agregado, aumentando a

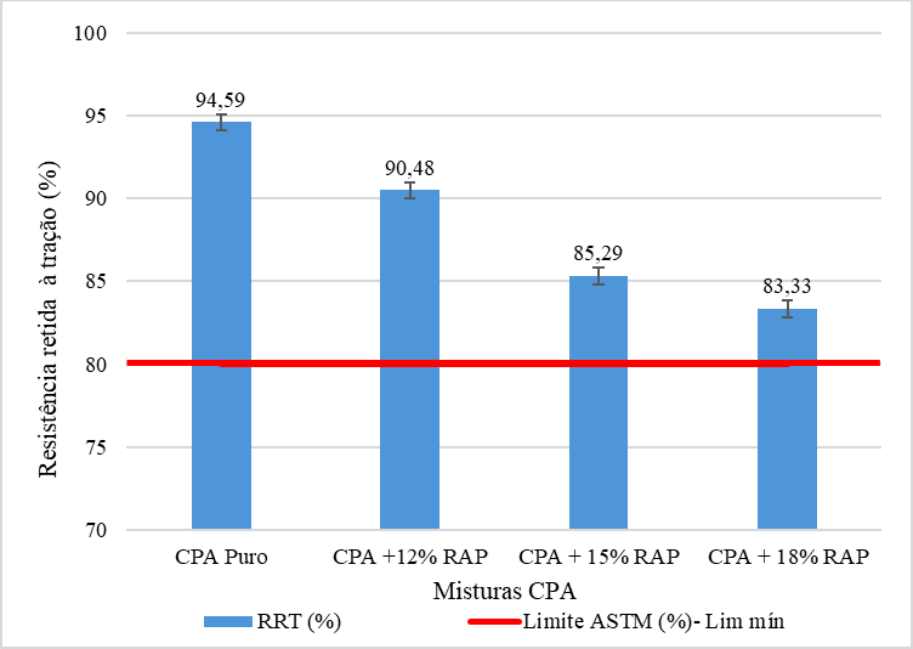
resistência em condições de carregamento não cíclico, de curta duração e em temperaturas moderadas. Melo Neto (2022) e Carvalho (2022), discutem que a incorporação de RAP modifica a resposta mecânica das misturas em função do aumento de rigidez associado ao ligante envelhecido, podendo elevar parâmetros resistentes medidos em ensaios laboratoriais convencionais. No caso específico de CPA, esse ganho pode ser ainda mais pronunciado quando há redução do ligante virgem por compensação do teor total, pois a fração de ligante efetivamente "ativa" passa a ter maior influência na resposta mecânica, embora isso nem sempre se traduza em melhor desempenho em longo prazo.

Apesar do resultado favorável em RT, é importante salientar que maior resistência à tração em ensaio diametral não implica, necessariamente, melhor desempenho global da camada ao longo da vida de serviço. Misturas mais rígidas tendem a apresentar maior suscetibilidade ao trincamento por fadiga e ao trincamento térmico, especialmente quando a rigidez decorre do aumento da participação de ligante envelhecido, sem medidas adicionais de ajuste reológico. Alecrim (2021) e Sousa (2024), reforçam a necessidade de interpretar parâmetros mecânicos à luz da função do revestimento poroso e de suas condições de serviço, destacando que a durabilidade da CPA depende do equilíbrio entre resistência, estrutura de vazios e integridade do sistema ligante–agregado. Assim, embora o aumento de RT observado nesta pesquisa represente um indicativo de melhora na resistência inicial, esse comportamento deve ser analisado em conjunto com outros parâmetros mecânicos e de durabilidade de modo a verificar se o ganho resistente não está associado a um aumento excessivo de rigidez, potencialmente desfavorável em solicitações repetidas e em longo prazo.

4.1.7. Determinação do Dano por Umidade Induzida

A Figura 28 apresenta o comportamento das misturas quanto à resistência por umidade das amostras, por meio dos valores de resistência retida à tração.

Figura 27: Resultado da resistência retida a tração.



A Figura 28 apresenta os resultados do ensaio de Lottman Modificado, comparando as resistências à tração indireta do subgrupo controle (corpos de prova não condicionados) e do subgrupo condicionado (corpos de prova submetidos aos ciclos de congelamento e descongelamento). A partir desses dois conjuntos de resistências, determinou-se a resistência retida à tração (RRT), definida como a razão entre a resistência do grupo condicionado e a do grupo controle, expressa em porcentagem.

Ressalta-se que a linha de referência indicada na Figura 28 corresponde ao limite mínimo de RRT (80%) estabelecido pela ASTM D7064 (2021), representando um critério relativo de retenção de resistência e não um valor mínimo absoluto de resistência à tração.

Do ponto de vista do atendimento ao critério normativo, todas as misturas apresentaram valores de RRT superiores ao limite de 80%. Os resultados obtidos foram de 94,59% para a mistura CPA Puro, 90,48% para a mistura com 12% de RAP, 85,29% para a mistura com 15% de RAP e 83,33% para a mistura com 18% de RAP, indicando que, nas condições avaliadas, as misturas mantiveram níveis adequados de resistência após o condicionamento por umidade.

Esse resultado é particularmente relevante para misturas do tipo CPA, pois a elevada conectividade de vazios e a maior permeabilidade tendem a intensificar a interação água–ligante–agregado, tornando a suscetibilidade à umidade um dos principais mecanismos potenciais de degradação. Nesse contexto, o desempenho hidráulico desejável deve ser compatibilizado com adequada resistência à desagregação e estabilidade do sistema ligante–

agregado frente à ação da água, especialmente em condições de serviço urbano e de manutenção variável (ALECRIM, 2021; SOUSA, 2024).

Ao analisar a influência do teor de RAP, observa-se uma tendência gradual de redução da RRT com o aumento da incorporação de material fresado, ainda que todos os valores permaneçam acima do limite mínimo estabelecido. A mistura CPA pura apresentou o maior valor de retenção de resistência, enquanto os teores crescentes de RAP resultaram em reduções progressivas do parâmetro, atingindo o menor valor na mistura com 18% de RAP. Entretanto, considerando a ausência de tratamento estatístico dos dados e a magnitude relativamente pequena das diferenças observadas, não é possível afirmar que essa redução represente uma influência significativa do teor de RAP sobre a suscetibilidade à umidade.

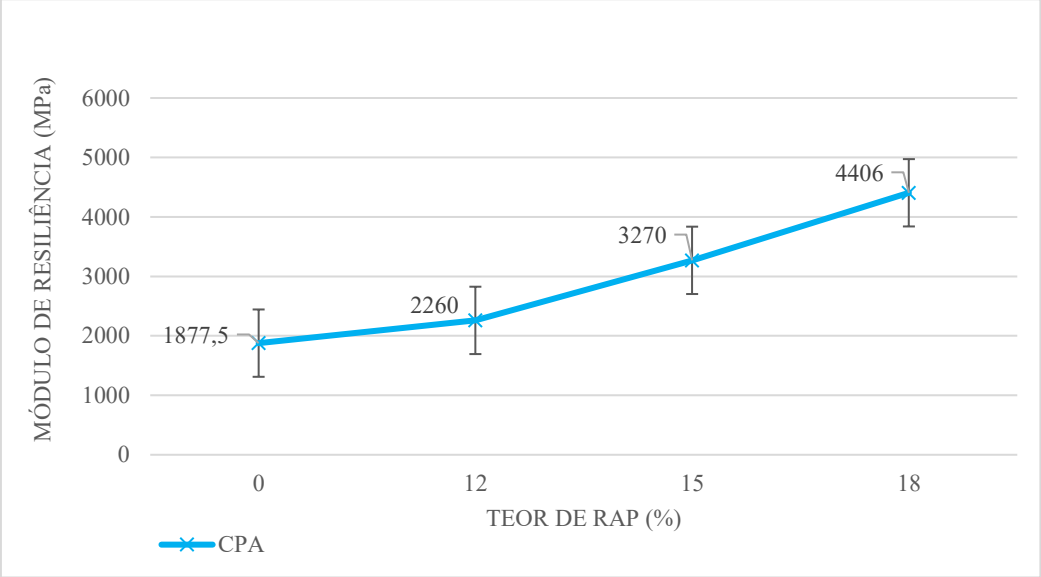
Dessa forma, os resultados indicam que a incorporação de RAP, nos teores avaliados, não comprometeu o atendimento ao critério de resistência retida à tração, embora tenha sido observada uma leve tendência de redução do parâmetro com o aumento do teor de material reciclado. As variações observadas podem estar associadas à própria variabilidade do material fresado utilizado, empregado sem fracionamento granulométrico, bem como a possíveis diferenças locais na distribuição do ligante envelhecido e na espessura efetiva do filme de ligante.

Do ponto de vista mecanístico, a literatura destaca que a presença de ligante envelhecido proveniente do RAP tende a alterar a resposta mecânica das misturas asfálticas, podendo aumentar a rigidez do sistema e modificar o comportamento observado em ensaios laboratoriais (MELO NETO, 2022; CARVALHO, 2022). Nesse sentido, a interpretação dos resultados de RRT deve ser realizada em conjunto com outros parâmetros mecânicos, como o módulo de resiliência, de modo a verificar se a retenção de resistência observada não está associada a um aumento da rigidez da mistura, o que poderia implicar maior suscetibilidade ao trincamento sob solicitações repetidas em condições de campo.

4.1.8. Módulo de Resiliência

Os resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência estão apresentados no gráfico da Figura 29. Os valores são uma média dos resultados de três corpos de prova, além disso, estão apresentados os respectivos desvios-padrão para cada mistura

Figura 28: Gráfico do MR versus Teor de RAP.



Os resultados do módulo de resiliência (Figura29) evidenciam um aumento consistente da rigidez das misturas com a incorporação de RAP. Em relação à mistura de referência (0% RAP), verificou-se um aumento de 20,37% para a mistura com 12% de RAP, de 74,17% para 15% de RAP e de 134,67% para 18% de RAP. Trata-se de um incremento expressivo, sobretudo entre 15% e 18% de RAP, indicando que a participação do ligante envelhecido e a alteração do sistema ligante–agregado exerceram influência direta no comportamento sob carregamentos repetidos.

Do ponto de vista de desempenho mecânico, esse aumento de módulo pode ser interpretado de forma positiva, pois tende a representar maior resistência à deformação e menor suscetibilidade a deformações resilientes elevadas sob ação do tráfego, especialmente em temperaturas intermediárias. Em termos estruturais, misturas com maior módulo podem contribuir para reduzir tensões e deformações nas camadas inferiores do pavimento, o que é desejável quando se busca maior capacidade de suporte. Esse comportamento está alinhado ao observado no ensaio de resistência à tração, no qual as misturas recicladas também apresentaram ganhos significativos de resistência inicial.

A tendência de crescimento do módulo com o teor de RAP é coerente com a literatura sobre misturas recicladas, na qual se destaca que a presença de ligante envelhecido tende a elevar a rigidez global do material, modificando a resposta mecânica sob carregamentos repetidos (MELO NETO, 2022; CARVALHO, 2022). Além disso, como nesta pesquisa houve compensação do ligante virgem em função do ligante presente no RAP, é esperado que a mistura final apresente uma matriz mais rígida, com menor participação relativa de ligante

“mais novo” para promover maior flexibilidade. Ainda assim, os resultados obtidos indicam que, dentro dos teores estudados, o RAP atuou como um elemento de reforço na resposta resiliente da CPA, o que é particularmente relevante por se tratar de uma mistura de graduação aberta, normalmente mais sensível a variações de ligante e estrutura interna.

Por outro lado, é importante lembrar que o aumento de módulo, embora favorável sob o ponto de vista de resistência e estabilidade, deve ser interpretado em conjunto com a função da CPA e com os mecanismos de dano esperados em serviço. A elevação de rigidez pode, em determinadas condições, reduzir a capacidade de acomodar deformações e aumentar a suscetibilidade a trincamentos sob ações repetidas, motivo pelo qual a análise integrada com os resultados mecânicos e parâmetros funcionais é essencial para um julgamento equilibrado do desempenho.

Nesse contexto, os resultados mecânicos obtidos, em especial o ganho simultâneo de RT e módulo, aliado a RRT acima do limite, sugerem um comportamento resiliente globalmente favorável, ainda que a influência da heterogeneidade do RAP e do ajuste do ligante mereçam atenção na interpretação final.

4.2. Síntese comparativa e definição do teor de RAP mais adequado

Após a apresentação e discussão individual dos resultados obtidos para cada parâmetro avaliado, torna-se pertinente realizar uma análise comparativa integrada das misturas estudadas, considerando simultaneamente os aspectos volumétricos, mecânicos e de durabilidade. Essa abordagem permite identificar o comportamento global de cada teor de RAP e estabelecer, com base técnica, qual composição apresenta o melhor equilíbrio entre desempenho funcional e resposta estrutural.

A síntese dos principais resultados experimentais é apresentada na Tabela 14, de modo a facilitar a visualização comparativa e subsidiar a definição do teor de RAP mais adequado sob a perspectiva de desempenho integrado.

Tabela 15:Síntese comparativa dos principais parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas CPA com diferentes teores de RAP

Mistura	Vv (%)	Vc (%)	Escorr. (%)	Cântabro (%)	RT (MPa)	RTT (%)	MR (MPa)	Avaliação Global
CPA PURA	19,5	14,6	0,020	17,0	0,37	89,19	1877,5	Boa drenagem / Baixa resistência

CPA+12 %RAP	19,2	11,1	0,049	18,9	0,63	96,83	2260,0	Equilíbrio funcional-estrutural
CPA+15 %RAP	20,3	10,3	0,039	20,0	0,68	91,18	3270,0	Alta rigidez / Durabilidade intermediária
CPA+18 %RAP	18,7	10,2	0,039	24,9	0,78	97,44	4406,0	Máxima resistência / Menor margem ao desgaste

A análise comparativa integrada das misturas evidencia comportamentos distintos sob os aspectos funcional, mecânico e de durabilidade. A mistura de referência apresentou maior percentual de vazios comunicantes e menor perda por abrasão, porém não atendeu ao limite mínimo de resistência à tração estabelecido pela DNIT ES 386/1999, além de apresentar o menor módulo de resiliência entre as misturas avaliadas.

A incorporação de 12% de RAP resultou em ganho significativo de resistência e rigidez, mantendo volume de vazios adequado, baixa perda por abrasão e elevada retenção de resistência após condicionamento por umidade. Essa mistura apresentou equilíbrio satisfatório entre desempenho hidráulico e resposta estrutural.

Com 15% de RAP, observou-se incremento adicional de rigidez e resistência, acompanhado de aumento moderado da perda por abrasão. Embora o desempenho estrutural tenha sido superior ao da mistura com 12%, verificou-se tendência de redução da margem de segurança quanto à durabilidade superficial.

A mistura com 18% de RAP apresentou os maiores valores de resistência à tração e módulo de resiliência, indicando elevada capacidade estrutural. Entretanto, também apresentou o maior valor de perda por abrasão, aproximando-se do limite normativo, o que reduz sua margem de segurança quanto ao desgaste superficial.

Considerando de forma integrada os resultados volumétricos, hidráulicos, mecânicos e de durabilidade, a mistura com 12% de RAP apresenta o melhor equilíbrio entre desempenho estrutural e funcionalidade drenante, associando ganho significativo de resistência e rigidez à manutenção da durabilidade e da estabilidade superficial. Embora teores mais elevados promovam maior rigidez, o aumento progressivo da perda por abrasão indica que a durabilidade superficial passa a constituir fator limitante para aplicação prática.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa explorou o uso potencial de RAP como uma alternativa tecnicamente benéfica e sustentável para o melhoramento de camadas porosas de atrito. Nesta seção, serão apresentadas as conclusões obtidas por meio desta pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras relacionadas às lacunas identificadas na temática.

5.1.Considerações finais

A investigação desenvolvida nesta dissertação permitiu examinar, de forma integrada, os efeitos da incorporação de material fresado (RAP) em misturas do tipo Camada Porosa de Atrito, considerando parâmetros volumétricos, hidráulicos, mecânicos e de durabilidade. Os resultados demonstram que a utilização do RAP é tecnicamente viável dentro dos teores analisados, desde que o projeto da mistura seja conduzido com controle granulométrico rigoroso e com atenção ao equilíbrio entre desempenho estrutural e funcionalidade drenante, preservando a estrutura aberta característica da CPA.

A análise conjunta das propriedades volumétricas e mecânicas evidenciou que as misturas recicladas mantiveram volumes de vazios compatíveis com as exigências normativas e apresentaram incremento consistente da resistência à tração por compressão diametral, especialmente sob o nível de compactação correspondente a 100 giros no Compactador Giratório Superpave. Esse comportamento indica que a presença do ligante envelhecido contribuiu para o aumento da coesão interna e da rigidez do sistema ligante, sem comprometer o enquadramento granulométrico da mistura.

No que se refere à funcionalidade drenante, as misturas avaliadas mantiveram comportamento compatível com a finalidade da camada porosa, apresentando escoamento predominante nas primeiras 24 horas após a chuva simulada e coeficientes de permeabilidade da mesma ordem de grandeza da mistura de referência. Contudo, a resposta hidráulica não apresentou relação perfeitamente proporcional aos indicadores volumétricos, indicando que a drenabilidade depende não apenas do volume total ou comunicante de vazios, mas também da conectividade efetiva da rede porosa e da organização espacial dos canais de escoamento. A heterogeneidade do RAP empregado, sem fracionamento granulométrico, mostrou-se fator potencial de influência nesse comportamento.

Quanto à durabilidade superficial e à suscetibilidade à umidade, verificou-se aumento progressivo da perda por abrasão no ensaio Cântabro com a elevação do teor de RAP, ainda que os valores tenham permanecido dentro do limite normativo brasileiro. Esse resultado indica redução da margem de segurança quanto ao desgaste superficial em teores mais elevados, configurando o principal ponto de atenção para aplicação prática. Além da possível influência da variabilidade do material fresado, a redução do teor de ligante virgem, decorrente da compensação do ligante envelhecido presente no RAP, pode ter contribuído para alterações na espessura efetiva do filme de ligante, afetando a coesão da mistura. Em contrapartida, a resistência à ação da umidade manteve-se elevada, não sendo identificada penalização relevante associada à incorporação do RAP, considerando a ausência de tratamento estatístico dos dados e a pequena diferença observada entre os resultados.

Sob o ponto de vista estrutural, a incorporação de RAP promoveu incremento significativo do módulo de resiliência, indicando aumento da rigidez da camada. Esse comportamento sugere maior resistência a deformações permanentes e maior estabilidade sob carregamentos repetidos, podendo contribuir positivamente para o desempenho estrutural do revestimento. Entretanto, o aumento da rigidez também exige atenção quanto à possível elevação da suscetibilidade à fragilização, especialmente em condições térmicas mais severas, reforçando a necessidade de equilíbrio entre rigidez e capacidade de deformação.

De forma integrada, conclui-se que a CPA reciclada apresenta potencial técnico e ambiental para reaproveitamento de material fresado, mantendo desempenho funcional satisfatório e promovendo ganhos estruturais relevantes. A definição do teor de RAP deve, contudo, resultar de análise conjunta entre parâmetros hidráulicos, mecânicos e de durabilidade, com especial atenção à preservação da conectividade dos vazios e ao controle do sistema ligante, de modo a assegurar desempenho equilibrado e tecnicamente consistente para aplicação em campo.

5.2.Sugestões para pesquisas futuras

- **Fracionamento granulométrico do RAP e controle de finos**

Investigar, de forma comparativa, o uso de RAP integral versus fracionado e diferentes níveis de remoção/controle de finos, quantificando o impacto na conectividade de vazios, permeabilidade e variabilidade dos resultados mecânicos.

- **Avaliação de longo prazo com envelhecimento e colmatação**

Aplicar procedimentos de envelhecimento (curto e longo prazo) e reavaliar desempenho após condicionamento, incluindo a evolução de permeabilidade/colmatação, Cântabro, RT, retenção à umidade e módulo de resiliência, para verificar se o ganho de rigidez inicial se mantém ou gera penalizações em durabilidade e trincamento.

- **Enquadramento nas demais faixas granulométricas da DNIT 386/1999, na busca por melhor acomodação do RAP de camadas densas em quantidades superiores.**

Testar sistematicamente as demais faixas granulométricas disponíveis na DNIT 386/1999, buscando o melhor "encaixe" do RAP proveniente de camadas densas, com foco em manter estrutura porosa funcional e reduzir correções no traço, e aumentar porcentagem incorporada. avaliando conjuntamente vazios comunicantes, permeabilidade e indicadores mecânicos.

- **Uso de agentes rejuvenescedores em CPA reciclada**

Avaliar a adição de agentes rejuvenescedores em diferentes dosagens e métodos de incorporação, verificando sua capacidade de reduzir a rigidez induzida pelo RAP sem comprometer drenagem, com ênfase em desempenho após envelhecimento, resistência à fadiga/trincamento.

6. REFERENCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de pavimentação com cimento Portland.** São Paulo: ABCP, 2012.

ALECRIM, C. M. C. (2021) **Avaliação da utilização de camada porosa de atrito em vias do meio urbano.** Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

ALECRIM, C. M. C.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; PEIXOTO, N. G. M.; ALVES, A.; PINHEIRO, G. M. (2022) **Avaliação do desempenho acústico e das características de superfície de camada porosa de atrito em meio urbano.** Revista Transportes. DOI: 10.14295/transportes.v30i1.2581

AL-QADI, I. L.; AURANGZEB, Q.; CARPENTER, S. H. **Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures.** Transportation Research Record, n. 2126, p. 102–111, 2009. DOI: 10.3141/2126-13.

AL-QADI, I. L.; AURANGZEB, Q.; CARPENTER, S. H.; PINE, W. J.; TREPANIER, J. **Reclaimed asphalt pavement – A literature review.** Illinois Center for Transportation Research Report, 2012.

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

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR) NF-P98-254-2: **Essais Relatifs aux Chaussés – Mésure de Propriétés Liées à la Permeabilité des Matériaux des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 2: Détermination du Pourcentage de Vides Communicantes des Matériaux Liés.** 1993.

AURANGZEB, Q.; AL-QADI, I. L.; OZER, H.; TREPANIER, J. **Advances in high RAP mixtures: performance evaluation and practical implications.** Construction and Building Materials, v. 278, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122332.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNARDES, H. et al. **Pavimentos de Concreto.** São Paulo: IBRACON, 2013.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. (2022) **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos). Rio de Janeiro, RJ. Brasil.

BROWN, S.F.; NEEDHAM, D.; THOM, N. H.; LO PRESTI, D. **The effect of polymer modification on the performance of recycled asphalt mixtures.** Road Materials and Pavement Design, Abingdon, v. 10, n. 1, p. 95–117, 2009. DOI: 10.1080/14680629.2009.9690230.

CAPUTO, H. P. (1973). **Mecânica dos solos.** 3a Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, RJ.

CARVALHO, J. R.. **Avaliação de diferentes tecnologias de misturas asfálticas mornas com a incorporação de elevadas quantidades de material fresado.** 2022. 195f. (Tese de Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental , Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2022. Disponível em: https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/28732.

CELESTE, A. B. **Otimização multiobjetivo aplicada à seleção de projetos de misturas asfálticas porosas utilizando o conceito de dominância de soluções.** 2025. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2025.

COPELAND, A. **Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice.** FHWA-HRT-11-021. Federal Highway Administration, 2011.

DE PASCALE, A; GIUSTOZZI, F; HARVEY, J; LO PRESTI, D**. Life cycle assessment of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP).** Resources, Conservation & Recycling, v. 189, 2023. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106722.

DEL CARPIO, J. A. V. **Uso de Pigmentos de Óxidos de Metais Mistos na Pavimentação para a Mitigação da Ilha de Calor Urbana.** 2014. 437 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina., Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER) ES 386: **Pavimentação – Pré-Misturado a Quente com Asfalto Polímero – Camada Porosa de Atrito.** Rio de Janeiro, RJ, 1999.

_____ DNER - ME 383: **Desgaste por Abrasão de Misturas Betuminosas com Asfalto Polímero – Ensaio Cântabro.** Rio de Janeiro, RJ, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) ME 130: **Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro.** Rio de Janeiro, RJ, 2010.

_____. DNIT – EM 129: **Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico.** Rio de Janeiro. 2011.

_____. DNIT – ME 131**: Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola.** Rio de Janeiro. 2010.

_____. DNIT – ME 155: **Material asfáltico – Determinação da penetração.** Rio de Janeiro. 2010.

_____. DNIT– ME 135: **Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência,** Rio de Janeiro, RJ, 2018.

_____. DNIT– ME 136: **Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

_____. DNIT– ME 180: **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida**, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

_____. DNIT– ME 411: **Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas**. Brasília, 2021.

_____. DNIT– ME 413: **Pavimentação – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas**. Brasília, 2019.

_____. DNIT– ME 427: **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas.** Brasília, 2020.

_____. DNIT– ME 428: **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados.** Brasília, 2022.

DOMINGOS, M.; PAMPLONA, T.; FAXINA, A.; GIGANTE, A. (2012) **Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho.** Revista Transportes, v. 20, n. 2, p. 15–22. DOI: 10.4237/transportes.v20i2.560

DRESCH, F. (2016) **Comportamento de Misturas Asfálticas Tipo Camada Porosa de Atrito (CPA).** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS.

FERREIRA, L. F. **Avaliação integrada de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de RAP e estratégias de ativação do ligante envelhecido.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

FOGEIRO, J. S. **Cidade Esponja - Aplicação do Conceito e Métodos no Bairro Marechal Gomes da Costa, Porto**. 2019. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto, PT.

GALDINO, L. M A. (2022) **Drenagem urbana na área da Praça da Cruz Vermelha: um estudo de caso da aplicação do conceito de cidades esponjas para atenuação de alagamentos.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

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

GUIMARÃES, J. M. F. et al. (2013) **Desagregação e permeabilidade de concretos asfálticos drenantes com ligantes modificados.** IAG279-01-2013. Programación de Trabajos Técnicos XVII Cila 2013, Casa Santo Domingo, Antigua Guatemala, Lunes.

HAMET, J.-F.; BESNARD, F. **Noise reduction of porous pavements: measurement methods and acoustic properties.** Road Materials and Pavement Design, v. 8, n. 2, p. 329–345, 2007. DOI: 10.1080/14680629.2007.9690074.

JACQUES, G. E. (2018) **Aplicabilidade de misturas mornas em revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA).** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

KASEER, F.; MARTONO, W.; AURANGZEB, Q.; AL-QADI, I. L. **Blending efficiency of reclaimed asphalt binder in high RAP mixtures.** Construction and Building Materials, v. 201, p. 231–241, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.160.

KNABBEN, R. M. (2012) **Estudo do Ruído Pneu Pavimento e da Absorção Sonora em Diferentes Revestimentos de Pavimento.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

LI, B.; CAO, K.; ZHOU, J.; LI, A.; SUN, M. **Laboratory investigation on influence of mixture parameters on noise reduction characteristics of porous asphalt concrete.** International Journal of Pavement Engineering, v. –, p. –, 2023. DOI: 10.1080/10298436.2022.2092619.

LI, B.; SUN, M.; ZHU, X.; CAO, K.; KONG, Y. **Investigation of permeability persistence of porous asphalt concrete under coupled conditions of clogging and cleaning.** Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, v. 149, p. 05023001, 2023. DOI: 10.1061/JPEODX.PVENG-1252.

LIU, X.; ZHANG, Z.; YANG, X. e LIU, Z. (2018) **Influence of asphalt chemical composition on moisture susceptibility of asphalt mixtures.** Petrol Sci. Technol., 36 (16), pp. 1258-1264. DOI: 10.1080/10916466.2018.1468775

LO PRESTI, D.; JENKINS, K.; MOHAMMAD, L.; ZAUMANIS, M. **Rejuvenator mechanisms and their effects on binder–RAP interaction.** Road Materials and Pavement Design, v. 20, n. 5, p. 1131–1152, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2018.1436462.

MA, Y; CHEN, X; GENG, Y; ZHANG, X. **Effect of clogging on the permeability of porous asphalt pavement.** Advances in Materials Science and Engineering, v. 2020, Article ID 4851291, 2020. DOI: 10.1155/2020/4851291.

MANSOUR, T. N.; PUTMAN, B. J. **Influence of aggregate gradation on the performance properties of porous asphalt mixtures**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 25, n. 2, p. 281–288, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000602.

MASSEY, B. S. (2002). **Mecânica dos fluidos.** Tradução: Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.

MCDANIEL, R. S.; ANDERSON, R. M.; D'ANGELO, J. A. **Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method.** NCHRP Report 452. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2000.

MEDINA, J. DE; MOTTA, L. M. G. DA. **Mecânica dos pavimentos**. 3ª Ed., Rio de Janeiro. Interciência, 2015.

MELO NETO, O. M; SILVA, I., M.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, L. F. L.; DUARTE, A. M.; LIMA, R. K. B. (2022). **Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid.** Construction and Building Materials. 349. 128728. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128728.

MELO NETO, O. M. **Abordagem multidimensional de misturas asfálticas com elevado teor de RAP rejuvenescidas com óleo de babaçu.** 2025. 336 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2025.

MEURER FILHO, E. (2001**) Estudos de granulometria para concretos asfálticos drenantes.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

MIRHOSSEINI, A; ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B. **Comparison of asphalt binder extraction and recovery methods and their influence on measured rheological properties.** Construction and Building Materials, Amsterdam, v. 188, p. 100–110, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.093.

MOGAWER, W. S.; BOULOS, P.; AUSTERMAN, A.; BONAQUIST, R.. **Evaluation of high RAP mixtures and their performance characteristics.** Construction and Building Materials, v. 95, p. 288–296, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.033.

MUNIZ, M. F.; ROSENO, J. L.; CARVALHO, J. C. (2004). **Anisotropia das propriedades hidráulicas de asfaltos drenantes com agregados calcários**. In: 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ.

NOFERINI, L.; DI BENEDETTO, H.; MARCHIONNA, V.; CARO, S. **High RAP mixtures for surface layers: performance considerations.** Road Materials and Pavement Design, v. 18, p. 186–204, 2017. DOI: 10.1080/14680629.2017.1389083.

OLIVEIRA, C. G. M. (2003**) Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas de concreto asfáltico drenante.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasilia, DF.

OLIVEIRA, J. R. M. **Environmental and economic impacts of using recycled asphalt materials.** Construction and Building Materials, 2013.

PINHEIRO, J. H. M. (2004) **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (Processos úmido e seco).** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

PINTO, S; PREUSSLER, Er. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro: Synergia, 2010.

SALES, P. M. (2015) **Avaliação das características físicas e mecânicas de misturas asfalticas modificadas com adição do CCBit.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.

SANDERS, P.; SANDERS, L. **The effects of porous asphalt on traffic noise. Applied Acoustics**, v. 67, n. 11–12, p. 1193–1202, 2006. DOI: 10.1016/j.apacoust.2006.04.001.

SANTOS, K. R. dos. **Distribuição espacial das inundações em Goiânia (GO) e análise desse fenômeno na bacia do Córrego Pedreira [manuscrito].** 2010. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SILVA JÚNIOR, C. G. da; LIMA, R. G.; VIEIRA, Z. C.; SANTOS, C. M. S. dos. **Impactos dos Resíduos Sólidos Lançados na Microdrenagem Urbana: Uma Abordagem em Pontos Suscetíveis a Alagamentos em Aracaju/SE.** Revista Tecnologia, [S. l.], v. 46, p. 1–12, 2025. DOI: 10.5020/23180730.2025.15792.

SILVA LOPES, A. M. da. **Avaliação dos efeitos da temperatura, radiação UV e umidade nas propriedades de ligantes e misturas asfálticas.** 2023. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2023.

SONG, W.; ZHANG, M.; WU, H. **Gray correlation analysis between mechanical performance and pore characteristics of permeable concrete**. Journal of Building Engineering, v. 86, p. 108793, 2024. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.108793.

SOUSA, T. M. **Análise do efeito da adição de agregado poroso saturado em óleo de soja residual no rejuvenescimento de camadas porosas de atrito.** 2024. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2024.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABBACH JÚNIOR, F. I. (2013) **Drenagem subsuperficial de pavimentos conceitos e dimensionamento.** [s.l: s.n.]

TAREFDER, A., SENGOZ, H., ABDULSHAFI, M., & AHMED, A. (2019). **Selection of Asphalt Binder for Warm Mix Asphalt based on Performance Grade and Temperature Susceptibility.** Journal of Materials in Civil Engineering, 31(9), 04019174. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002784

WANG, C.; HOU, J.; MILLER, D.; BROWN, I.; JIANG, Y. (2019). **Flood risk management in sponge cities: The role of integrated simulation and 3D visualization.** International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 39, 101139. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2019.101139

WU, H.; YU, J.; SONG, W.; ZOU, J.; SONG, Q.; ZHOU, L. (2020). **A critical state-of-the-art review of durability and functionality of open-graded friction course mixture**s. Construction and Building Materials 237, 117759. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117759.

WURST, J. E.; PUTMAN, B. J. (2013) **Laboratory Evaluation of Warm-Mix Open Graded Friction Course Mixtures.** Journal of Materials in Civil Engineering, [s.l.], v. 25, n. 3, p.403-410. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000611.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.

ZAUMANIS, M.; ARRAIGADA, M.; PLESE, I.; MALLICK, R**. Influence of aged binder activation on high RAP mixture performance.** Construction and Building Materials, v. 271, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121549.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B**. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements.** Construction and Building Materials, v. 100, p. 245–260, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. **Performance-based design of mixtures with reclaimed asphalt pavement**. Construction and Building Materials, v. 232, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117256.

ZAUMANIS, M; CAVALLI, M. C.; POULIKAKOS, Lily D. **Effect of rejuvenator addition location in plant on mechanical and chemical properties of RAP binder.** International Journal of Pavement Engineering, v. 21, n. 4, p. 507–515, 2020. DOI: https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1492133.

ZHANG, J.; HUANG W.; ZHANG, Y.; CAI, Q.; YAN, C.; LV, Q. (2021) **Investigation on the durability of OGFC-5 ultra-thin friction course with different mixes.** Construction and Building Materials, v. 288. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123049.

ZHANG, K.; WU, H.; LI, H.; WANG, D. **Durability and performance degradation of porous asphalt mixtures under aging and clogging effects**. Construction and Building Materials, v. 269, p. 121312, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121312.

ZHANG, S.; LI, Y.; MA, M.; SONG, T.; SONG, R. (2018). **Storm Water Management and Flood Control in Sponge City Construction of Beijing.** Water. 10(8):1040. DOI: 10.3390/w10081040