Viviane Zorio Peixoto Arima
Murilo Macane Arima Zorio

UTILIZAÇÃO DE VIDRO MOÍDO COMO AGREGADO MIÚDO EM MISTURAS ASFÁLTICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

VIVIANE ZORIO PEIXOTO ARIMA
MURILO MACANE ARIMA ZORIO

Utilização de Vidro Moído como Agregado Miúdo em Misturas Asfálticas: Uma Revisão Sistemática

1ª ed.

Goiâna-GO
Editora Conhecimento Livre

Copyright© 2026 por Editora Conhecimento Livre

1ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

ARIMA, VIVIANE ZORIO PEIXOTO
A294U Utilização de Vidro Moído como Agregado Miúdo em Misturas Asfálticas: Uma Revisão Sistemática
/ VIVIANE ZORIO PEIXOTO ARIMA. MURILO MACANE ARIMA ZORIO. – Goiâna-GO

Editora Conhecimento Livre, 2026

67 f.: il
DOI: 10.37423/2026.edcl1263
ISBN: 978-65-5367-747-0
Modo de acesso: World Wide Web
Incluir Bibliografia

1. vidro-moído 2. misturas-asfálticas 3. agregado-miúdo I. ARIMA, VIVIANE ZORIO PEIXOTO II. ZORIO, MURILO MACANE ARIMA III. Título

CDU: 625

https://doi.org/10.37423/2026.edcl1263

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Conselho Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

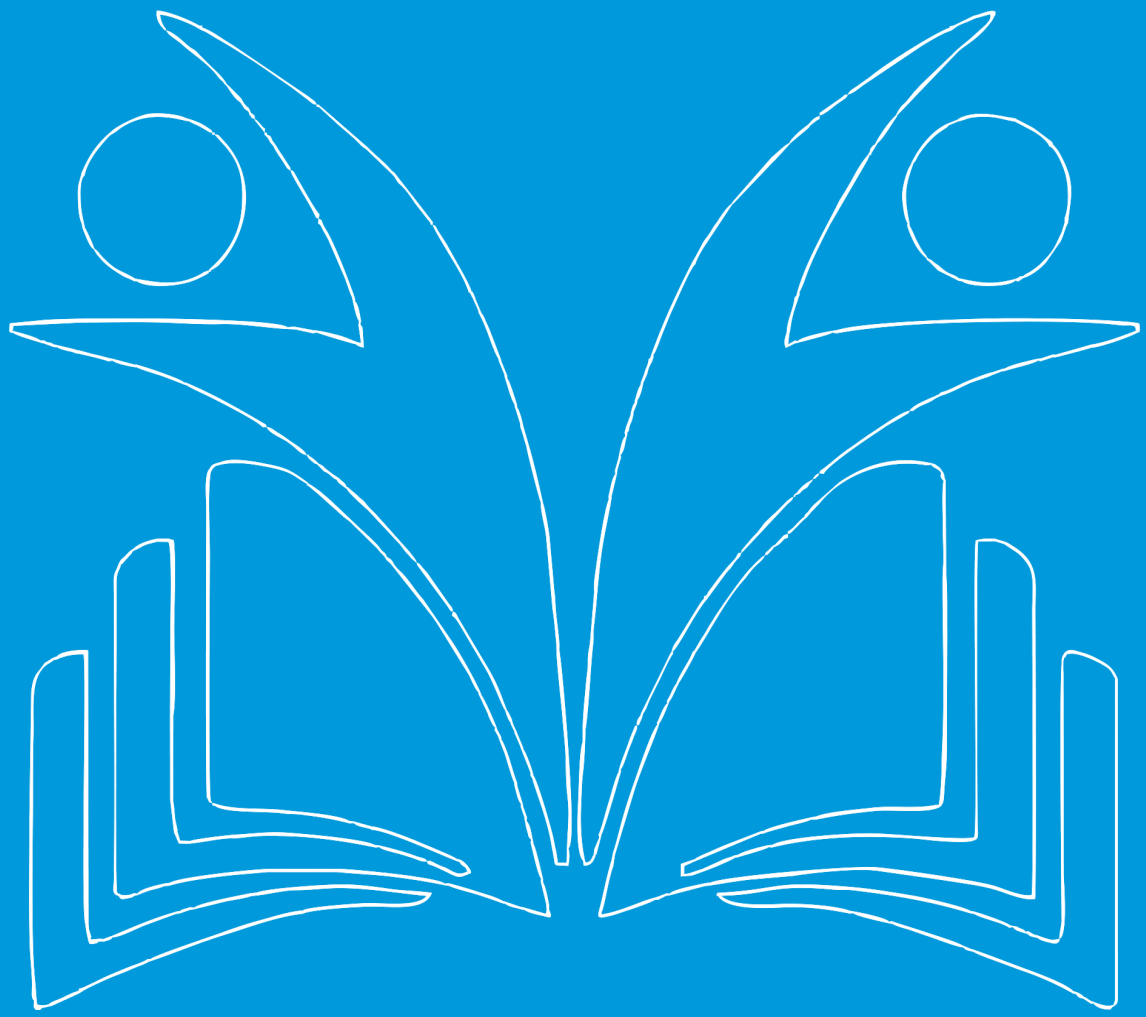
Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos

Editora Conhecimento Livre
Goiânia-GO
2026

Utilização de Vidro Moído como Agregado Miúdo em Misturas Asfálticas: Uma Revisão Sistemática

10.37423/2026.edcl1263



RESUMO

O estudo, a compreensão e a dinamização da malha viária são interesses globais de importância ainda maior no Brasil, devido ao uso frequente do meio de transporte rodoviário. Para atingir uma suficiente proposta de elevação da viabilidade e expansão das rodovias brasileiras, considerando as necessidades econômicas e ambientais, a reciclagem de insumos industriais ou domésticos com propriedades vantajosas para a melhoria do desempenho, longevidade e recuperação de pavimentos pode oferecer uma solução para o problema do uso de materiais com impacto ambiental prejudicial e alto custo. O objetivo central desta dissertação foi avaliar a influência da adição de vidro moído como agregado miúdo, em diferentes proporções, nas misturas asfálticas. Como objetivo secundário, foram investigadas as propriedades mecânicas, como resistência, rigidez e durabilidade da mistura, para avaliar a viabilidade de sua aplicação. Trata-se de uma revisão sistemática da literatura, com 18 publicações compreendidas entre 2012 e 2022, nas bases de dados Scientific Electronic Library Online (SciELO), Scopus e Web of Science. Observou-se que a mistura do vidro moído aos pavimentos asfálticos pode melhorar a resistência e flexibilidade das misturas asfálticas, dependendo da porcentagem de mistura ajustada para o uso desejado. Para fins tradicionais, uma porcentagem entre 10% e 15% foi sugerida para resultados ótimos, combinados com outros componentes para reduzir a vulnerabilidade e aumentar a longevidade. Além disso, há um senso de economia sistêmica neste material, pois não só reduz os custos diretos, mas também ajuda a reduzir os custos ambientais, gerando menos resíduos e, dessa maneira, promovendo menor impacto ambiental.

Palavras-chave: Reciclagem. Pavimentação. Vidro. Materiais Alternativos. Engenharia.

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - - Classificação dos principais tipos de vidro 19
Quadro 2 - Aplicação de critério de qualidade para seleção de evidência 31
Quadro 3 - Aplicação de critério de qualidade para seleção de evidência 31

Tabela 1 - Quantidade de trabalhos selecionados 30
Tabela 2 - Principais aspectos investigados nos artigos em análise (2012-2022) 34
Tabela 3 - Tipos de vidro moído utilizados nos estudos analisados (2012-2022) 35

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABEDA: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ABRELPE: Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANP: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
Ca^{++}: Íons Cálcio
CaO: Cal
CAP: Cimentos Asfálticos de Petróleo
CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEMPRE: Compromisso Empresarial para Reciclagem
CMC: Carga Mineral de Calcário
CNT: Confederação Nacional dos Transportes
CO2: Dióxido de Carbono
EUA: Estados Unidos da América
G0: Módulo de cisalhamento inicial
GRADE: Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation
HMA: Hot Mix Asphalt
IBP: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
INFI: Instituto de Física
ISSA: International Slurry Surfacing Association
IST: Índice de Suscetibilidade Térmica
MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura
MV: Microesferas de Vidro
Na2CO3: Carbonato de Sódio
Na2O: Soda
PRISMA: Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RAP: Reclaimed Asphalt Pavement
RCC: Resíduos da Construção Civil
RCS: Resistência à Compressão Simples
SCIELO: Scientific Electronic Library Online
SiO2: Sílica/ Dióxido de Silício
SP: São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 13

2.1 PAVIMENTO 14

2.2 ASFALTO 15

2.3 RECICLAGEM 17

2.4 VIDRO 19

2.4.1 Estrutura do vidro 20

2.4.2 Reciclagem do vidro 21

2.5 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS 22

2.5.1 Estabilização granulométrica 23

2.5.2 Estabilização física 25

2.5.3 Reações pozolânicas 25

3 METODOLOGIA 26

3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA 26

3.1.1 Critérios de inclusão e exclusão 29

3.1.2 Levantamento dos artigos 29

3.1.3 Extração de dados e síntese 30

3.1.4 Critérios de Qualidade 30

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 33

4.1 BENEFÍCIOS FÍSICOS DA INCLUSÃO DO VIDRO MOÍDO NA MISTURA ASFÁLTICA.....51

4.2 PROPORÇÃO IDEAL DE VIDRO MOÍDO PARA A MISTURA ASFÁLTICA.....54

4.3 VIABILIDADE ECONÔMICA 55

4.4 BENEFÍCIOS / GANHOS AMBIENTAIS DO USO DO VIDRO MOÍDO EM MISTURAS ASFÁLTICAS...56

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 58

REFERÊNCIAS.....61

1 INTRODUÇÃO

O estudo, compreensão e dinamização da malha viária são interesses globais que, no Brasil, têm maior importância devido ao uso frequente do transporte rodoviário. Segundo Medina e Motta (2005), neste país, este tipo de transporte é o mais utilizado para cargas e passageiros. Uma pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (CNT) de 2021 estima que 65% da carga e 95% dos passageiros são transportados pelas rodovias brasileiras. No entanto, mesmo com as dimensões continentais, o país poderia dividir a demanda com outros meios de transporte de forma mais eficiente. Portanto, é fundamental o desenvolvimento de conhecimento e práticas para melhorar e preservar o sistema rodoviário (CNT, 2021).

Apesar de o transporte rodoviário ser amplamente utilizado no Brasil, segundo a CNT em 2021, apenas 12,4% das 1.720.909,0 km de rodovias nacionais são pavimentadas. Além disso, as vias com pavimento são afetadas pela intensa demanda de tráfego e precisam de manutenção constante. Isto destaca a necessidade de melhorias contínuas e desenvolvimento estrutural das rodovias, bem como a importância crescente de novas soluções e materiais para ampliar e recuperar a pavimentação das estradas.

Para propor soluções e novas tecnologias para a viabilidade e ampliação das rodovias brasileiras, considerando as necessidades econômicas e ambientais do país, é importante compreender suas características. De acordo com Pires (2014), há um aumento de estudos sobre o uso de materiais, redução de custos energéticos, rapidez de intervenções e restaurações em vias pavimentadas, entre outros. Do ponto de vista ambiental, os principais interesses de investigação incluem a redução do consumo de agregados naturais, movimentação de terras e combustíveis, entre outros temas relevantes.

Neste contexto, em que se faz presente a intensa prática mundial de consumo, seguida pelo interesse em práticas sustentáveis que contrabalanceiem esses efeitos em diferentes frentes, há também o interesse de investigação e testagem de alternativas de reciclagem e reutilização de resíduos para diferentes aplicações. Estas alternativas são necessárias e visam um perfil sustentável para manutenção, reabilitação e expansão das estradas (LINDSEY, 2011).

Na construção civil, a emissão de Dióxido de Carbono (CO2) devido às atividades diárias e a alta demanda por recursos naturais esgotáveis são duas das principais razões para o interesse em reutilizar resíduos. O objetivo é obter maior resistência e rigidez em agregados reciclado (MOHAMMADINIA; ARULRAJAH; D'AMICO, 2018). Embora os materiais provenientes da construção e da demolição, como o concreto reciclado, tijolo moído ou Material Asfáltico Fresado (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) possam ser aplicados de formas diferentes, nos últimos anos, houve um interesse constante em usá-los como aterro e camadas de base e sub-base em estradas e pavimentos (SAS, 2015).

O uso de materiais reciclados na pavimentação é uma alternativa ambientalmente sustentável e economicamente viável (DISFANI et al., 2012). Entre os materiais reciclados, o RAP é o mais amplamente estudado, obtido a partir da reciclagem do agregado de pavimentos antigos para uso em novas camadas pavimentares. A aplicação do RAP depende de considerações técnicas específicas e da capacidade de suporte, de acordo com as características da via de instalação. Anualmente, milhões de toneladas de RAP são geradas, com uma significativa parte sendo utilizada em novos pavimentos (HOYOS; PUPPALA; ORDONEZ, 2011).

No entanto, nem sempre é possível aumentar a capacidade de suporte de uma camada de base ou sub-base apenas com o agregado reciclado. Nesses casos, a adição de outros materiais à mistura é uma alternativa para estabilizar adequadamente a granulometria ou características químicas (LEITE et al., 2015).

Os materiais mais comumente utilizados para estabilização química possuem características aglomerantes, como cal hidratada ou cimento Portland, usados em camadas como solos-cal e solos-cimento. Entretanto, esses materiais causam impactos significativos ao meio ambiente, devido ao elevado consumo de recursos naturais e emissão de gases de carbono (INGLÊS, 1972). Esses materiais possuem frequentemente um desfavorável custo-benefício.

O uso de resíduos (subprodutos) industriais ou domésticos com características úteis para melhorar a camada pavimentar é uma solução para o problema da utilização de materiais com impacto ambiental e elevado custo. Entre as alternativas disponíveis, Scheurmann Filho (2019) destaca a pozolanicidade e a alta alcalinidade como fatores de escolha. Neste objetivo, Massazza (2004) descreve alguns exemplos possíveis, como cinza volante, cinza de casca de arroz, escória de alto forno, pó de vidro moído e outras pozolanas artificiais com atividade pozolânica significativa. Por outro lado, Saldanha et

al. (2018) descrevem a cal de carbureto, um resíduo proveniente da produção de gás acetileno, como altamente alcalina devido à grande quantidade de hidróxido de cálcio em sua composição.

Esta dissertação tem como objetivo avaliar, com base em estudos anteriores, a viabilidade de utilizar vidro moído como substituto de agregado miúdo em misturas asfálticas. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura existente para examinar as conclusões sobre a viabilidade e a adequação do uso do vidro em misturas asfálticas.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo principal fazer uma revisão sistemática sobre o uso de vidro moído como aditivo na construção de estradas. Como objetivo secundário, serão investigadas as propriedades mecânicas, como resistência, rigidez e durabilidade da mistura, para avaliar a viabilidade de sua aplicação.

Trata-se de uma revisão sistemática de literatura publicada entre 2012 e 2022 nas bases de dados Scientific Electronic Library Online (SciELO), Scopus e Web of Science. O objetivo da pesquisa foi selecionar artigos que abordassem o uso de vidro moído como agregado miúdo em misturas asfálticas. Os critérios de inclusão utilizados na seleção dos artigos incluíram títulos com os termos "vidro" e "pavimento em asfalto", e os critérios de exclusão foram artigos que mencionavam "concreto". As publicações relevantes foram incluídas e consideradas neste estudo.

Esta pesquisa foi conduzida com base nas seguintes perguntas norteadoras: Existem benefícios físicos na inclusão de vidro moído na mistura asfáltica? Qual é a proporção ideal de vidro moído para a mistura asfáltica? O uso de vidro moído em misturas asfálticas é viável economicamente? Há ganhos ambientais na inclusão de vidro moído na mistura asfáltica?

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção, são apresentados os conceitos fundamentais e as formulações teóricas necessárias para a análise proposta nesta dissertação. Os subtópicos foram utilizados para descrever conceitos relacionados a termos como pavimento, asfalto, material asfáltico fresado, reciclagem, vidro, estabilização de solos e correlatos.

2.1 PAVIMENTO

A definição de pavimento foi dada por Oliveira e Oliveira (2021, p. 56), como "[...] estrutura construída após terraplenagem e destinada [...] a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego, além de melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança".

Por sua vez, Pinto e Preussler (2002, p. 11) descrevem o pavimento como uma "[...] estrutura [...] [de] uma ou mais camadas, com características para receber as cargas aplicadas na superfície e distribuí-las, de modo que as tensões resultantes fiquem abaixo das tensões admissíveis dos materiais que constituem a estrutura".

Em relação aos tipos, os pavimentos podem ser classificados como rígidos, flexíveis e semirrígidos. Os pavimentos rígidos possuem uma camada superior de alta rigidez comparada à presente nas camadas inferiores, o que permite a absorção de todas as tensões da carga aplicada. Em pavimentos flexíveis, a carga é distribuída de forma relativamente uniforme em todas as camadas, com uma deformação elástica compatível. Já os pavimentos semirrígidos possuem uma base cimentada quimicamente, como é o caso do solo-cimento, revestida com camadas de material asfáltico (MAGALHÃES; PINHEIRO, 2021).

As camadas presentes no pavimento foram descritas por Santos, Mendes e Goltz (2019, p. 4) como:

> a) subleito: terreno de fundação do pavimento ou do revestimento;
> b) sub-base: camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplanagem;
> c) base: camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre o qual se constrói um revestimento;
> d) revestimento: camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada economicamente e simultaneamente: melhorar as condições do rolamento quando a comodidade e segurança e resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície do rolamento.

Os pavimentos flexíveis são compostos por uma mistura quente de agregado mineral graúdo e miúdo, material betuminoso e filler ou enchimento. Aditivos também podem ser adicionados à mistura, que é então espalhada e comprimida a quente (ORETO et al., 2021).

O desempenho de um pavimento flexível é otimizado quando a mistura asfáltica apresenta estabilidade e fluência adequadas à sua flexibilidade. Por exemplo, o desempenho do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) está relacionado tanto às propriedades individuais dos materiais utilizados quanto ao resultado obtido pela combinação de agregados e ligantes (VEGGI; MAGALHÃES, 2014).

Considerando estes fatores, a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (ABEDA, 2010), destaca que a funcionalidade, acabamento, desempenho e durabilidade de uma pavimentação estão relacionados a vários fatores. Alguns dos principais são a qualidade dos projetos básicos e executivos, o controle de materiais, a forma de execução e a geometria do empreendimento, para garantir que a construção seja consistente com as diretrizes projetadas e as especificações técnicas relevantes.

2.2 ASFALTO

O asfalto é um material de construção antigo utilizado pelo homem, que pode ser encontrado em jazidas naturais, como bolsões de asfalto formados pela evaporação de frações voláteis de petróleo em épocas passadas. Atualmente, a produção de petróleo é principalmente obtida através da destilação em refinarias industriais (ROBERTS et al., 1998).

O asfalto natural é conhecido por preservar animais pré-históricos em depósitos deste material. Esse tipo de asfalto foi encontrado em escavações arqueológicas e utilizado amplamente para alvenaria, rodovias, impermeabilização de banheiros e reservatórios de água na Mesopotâmia e Vale dos Hindus (THE ASFALT INSTITUTE, 1947).

Conforme dados do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), do ano de 2021, o asfalto derivado de petróleo tem sido utilizado desde 1909 devido à sua pureza e eficiência econômica em comparação com os tipos naturais. Atualmente, o petróleo é a principal fonte de suprimento para as pavimentações (IBP, 2021). No Brasil, o asfalto de petróleo era originalmente importado de Trinidad, mas somente a partir de 1944, o país passou a refinar petróleo pela Ipiranga Asfaltos S.A. e a produzir esse tipo de insumo (SENÇO, 1997).

Os asfaltos utilizados na pavimentação podem ser denominados ligantes, cimentos ou materiais asfálticos (ROBERTS et al., 1998). Independentemente da classificação, esses materiais possuem características aglutinantes, cor escura e derivam do petróleo, tendo como componente predominante o betume (99,5%). O betume, frequentemente usado como sinônimo de asfalto, é composto principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular e é solúvel em dissulfeto de carbono. Ele é amplamente utilizado na construção civil, especialmente na impermeabilização e pavimentação (PEREIRA; SILVA; VIEIRA, 2015).

De acordo com o IBP, o petróleo pode conter entre 10%-70% de asfalto, dependendo de suas características, especialmente densidade. O processo de refino do petróleo é conduzido de acordo com as características do asfalto: materiais com alto rendimento e cru, geralmente com características asfálticas, são tratados com destilação a vácuo. Petróleos intermediários, com rendimento médio, geralmente são submetidos a destilação em dois estágios (pressão atmosférica e vácuo). Já os petróleos leves são submetidos a destilação dupla, seguida de extração após a destilação (IBP, 2021).

A destilação em duas etapas é o processo mais comum utilizado para o asfalto devido à sua simplicidade, que dispensa instalações especiais e pode ser aplicado a diferentes tipos de petróleo. O processo baseia-se na separação física dos constituintes do petróleo através dos seus distintos pontos de ebulição e condensação (TIJANEROS, 2016). Uma definição dos principais materiais betuminosos empregados na pavimentação foi oferecida por Coelho Junior e Rocha (2013, p. 14):

> Asfalto
> Material cimentício, de cor preta a parda escura, no qual o constituinte predominante é o betume, que ocorre na natureza ou é obtido no processamento do petróleo, que amolece gradualmente pelo calor e com características apropriadas à pavimentação. [...]
> Betume
> Material cimentício de consistência sólida, semissólida ou viscosa, que pode ocorrer na natureza ou ser obtido por processo industrial, composto principalmente de hidrocarbonetos de alto peso molecular, completamente solúvel em bissulfeto de carbono, dos quais, asfaltos e alcatrões são típicos. [...]
> Cimento asfáltico de petróleo
> Asfalto obtido pela refinação do petróleo, de acordo com métodos adequados de maneira a apresentar as qualidades necessárias para a sua utilização em construções de pavimentos asfálticos.

Existem cinco tipos de asfalto disponíveis no mercado: asfaltos diluídos, emulsionados, oxidados/soprados, modificados por agentes rejuvenescedores e Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP). Os CAP são semissólidos à temperatura ambiente, viscosos e comportam-se termoplasticamente, e quando resfriados retornam ao seu estado original (KALAGAEVA, 2014).

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) classifica os CAP na Resolução ANP n. 19, de 11 de julho de 2006, a partir de ensaio de penetração. Os tipos apresentados são: CAP 30-45, 50-70, 85-100 e 150-200. Essa classificação é desenvolvida a partir de ensaios complementares e da consideração da consistência que o cimento asfáltico apresenta a 25ºC, considerada média da temperatura do pavimento em serviço (ABEDA, 2010).

Os materiais betuminosos apresentam comportamento de tensão- deformação dependente da carga aplicada e temperatura, e são termoplásticos, ou seja, sua consistência é afetada pela temperatura. As

principais propriedades destes materiais são versatilidade de usos, impermeabilização, aglutinação e durabilidade. O projeto de pavimentos asfálticos deve levar em conta a resistência do material selecionado a intemperismo e aquecimento das pistas para garantir uma durabilidade satisfatória. Reparos e manutenções são principalmente necessários para corrigir o endurecimento dos pavimentos com o passar do tempo, a perda de resistência e a diminuição da qualidade coesiva e plástica dos materiais (VEGGI; MAGALHÃES, 2014).

Os principais fatores que causam o endurecimento dos materiais betuminosos são difração (reação do oxigênio no ar com o ligante), polimerização (onde os CAP apresentam maior consistência em áreas com maior demanda de tráfego) e volatização (evaporação causada pela temperatura dos constituintes voláteis do material) (BERBIER; ZOFKA; YUT; 2016).

Godoi et al. (2019) afirmam que as trincas prematuras na superfície dos pavimentos são o principal efeito do endurecimento do ligante. Esse problema geralmente pode ser restringido através do controle de qualidade do material betuminoso, e suas principais causas são decorrentes das temperaturas aplicadas no refino e do quão vulnerável o ligante betuminoso produzido é à temperatura.

2.3 RECICLAGEM

O reuso de materiais é uma tendência atual que busca atender às necessidades atuais sem comprometer a capacidade do meio ambiente de suprir as demandas futuras. Segundo Lindsey (2011), uma sociedade sustentável é aquela que atende suas necessidades sem comprometer a capacidade do meio ambiente de suprir as demandas futuras. O reuso de materiais descartados é uma estratégia para reduzir os impactos ambientais da atividade humana e promover sustentabilidade.

A reciclagem de materiais é uma estratégia para diminuir a geração de resíduos e sua disposição em aterros sanitários. Além disso, a reciclagem também pode proporcionar benefícios econômicos, como a redução de custos de transporte e energia (DISFANI et al., 2012).

De acordo com Ali et al. (2011), o resíduo é definido como qualquer subproduto gerado pela atividade humana ou industrial sem valor duradouro. O reuso de materiais aplicados à pavimentação asfáltica é considerado uma alternativa eficaz para a redução destes resíduos, como exemplificado por dados de São Paulo (SP) de 2002, onde aproximadamente 400 mil toneladas de pavimento asfáltico reciclado

foram utilizadas, gerando uma economia em agregados novos em torno de R$ 12 milhões (BALBO, 2007).

O agregado RAP, assim como outros a exemplo do tijolo moído e concreto reciclado, possui alto interesse para reuso na construção civil. No entanto, as incertezas sobre a qualidade, longevidade, desempenho e padronização de uso dos agregados é uma barreira para o avanço do seu uso nesse setor (MOHAMMADINIA, ARULRAJAH; D'AMICO, 2018).

O esgotamento dos recursos naturais e o acúmulo de resíduos de construção em aterros urbanos, combinados com o aumento das restrições e custos de extração de agregados naturais, exigiram o uso do RAP na construção de estradas como uma alternativa sustentável. O uso de RAP reduz significativamente o custo total da construção de pavimentos, ao mesmo tempo em que fornece uma solução viável para as preocupações ambientais associadas à extração de rochas geradoras naturais para uso como base rodoviária (HOYOS; PUPPALA; ORDONEZ, 2011).

O vidro é o segundo material mais reciclado do mundo, depois do papel, com aproximadamente 7% de todos os resíduos sólidos urbanos nos Estados Unidos da América (EUA) são atribuídos a ele. No entanto, devido à sua natureza não biodegradável, o vidro tornou-se uma fonte de geração de resíduos sólidos em muitos países, enfatizando a necessidade de opções para reutilizar o vidro descartável. Segundo dados do Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), 3% do volume de resíduos urbanos gerados no Brasil é composto por produtos de vidro, sendo que um terço é composto por garrafas e embalagens (CEMPRE, 2022).

Aproximadamente 47% das embalagens de vidro no Brasil são recicladas anualmente, totalizando 470 mil toneladas, segundo a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). Essas iniciativas de reciclagem envolvem principalmente o setor de embalagens, com apenas 20% do vidro sendo enviado para aterros sanitários (SALES, 2014).

Conforme Tebecharani Neto (2020), o vidro utilizado em automóveis e construção civil, como pedaços de cristal, lâmpadas e espelhos, não pode ser reciclado para a produção de garrafas ou embalagens devido à sua composição química distinta que pode causar rachaduras e defeitos. No entanto, algumas indústrias de vidro conseguiram incorporar porcentagens de vidro plano em seus processos de produção.

2.4 VIDRO

O vidro é um material incolor e frágil, cientificamente definido como um sólido não cristalino produzido por meio de resfriamento rápido (SALES, 2014). Foram encontrados registros de contas de vidro coloridas e opacas originárias do Egito, que remontam a cerca de 5000 a. C, que representam a forma mais comum sendo uma tonalidade esverdeada translúcida devido à presença de impurezas de ferro (PETRUCCI, 1987).

Atualmente, existem vários tipos de vidro, cada um adequado para uma finalidade específica e distinguido por pequenas variações em sua composição química. Exemplos incluem vidros à base de sulfetos, fluoretos e ligas metálicas (ASKELAND; WRIGHT, 2019).

O Quadro 1 abaixo, obtido de Tebechrani Neto (2020), descreve as principais características dos vidros comercializados atualmente disponíveis no mercado. Dos vários tipos, o vidro-cálcio destaca-se como o mais proeminente, representando cerca de 85% de todo o vidro produzido globalmente. Isso se deve à sua versatilidade em aplicações como janelas e garrafas. Consequentemente, o vidro-cálcio é um dos materiais mais frequentemente descartados.

Quadro 1 - - Classificação dos principais tipos de vidro

Tipo de vidro	Características
Soda – Cal	Tipo mais comum de vidro produzido. Utilizado na fabricação de produtos como embalagens, janelas e itens que não necessitam de grande resistência química e/ou ao calor
Chumbo	Dotados de elevado índice de refração, brilho e densidade. São comumente utilizados como proteção para radiação e invólucros de lâmpadas fluorescentes
Boro-Silicatos	Tem baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e grande estabilidade química, sendo empregado em situações que requerem alta durabilidade do material vítreo
Ópticos	Possuem alta densidade e grande índice de refração. Majoritariamente usados na fabricação de lentes e afins
Alumino-Silicatos	Tem resistência a altas temperaturas e baixos coeficientes de expansão

Fonte: Tebechrani Neto (2020, p. 30).

O principal subproduto da reciclagem do vidro é o vidro moído. Apesar de ser um substrato viável para a construção civil - particularmente obras rodoviárias - sua aplicação é dificultada pela falta de conhecimento sobre suas características geotécnicas e potenciais riscos ambientais (DISFANI et al., 2012). Assim, mais pesquisas sobre este material são necessárias para avaliar sua adequação para tais aplicações.

Ainda Disfani et al. (2012) demonstram que o vidro moído, sozinho ou em combinação com outros agregados naturais ou reciclados, pode ser efetivamente utilizado como uma subcamada de base em aplicações rodoviárias, bem como material de aterro e meios de drenagem em estradas. Da mesma forma, Basu e Pupalla (2015) mostram que o vidro também pode ser empregado como um agregado fino em misturas de pavimentação asfáltica, comumente conhecidas como glassphalt.

2.4.1 Estrutura do vidro

O silício e o oxigênio estão entre os elementos mais prevalentes na superfície da Terra e são os dois principais componentes dos silicatos, uma classe de material que compreende a maioria das rochas e solos, como argilas e areias. Um dos silicatos mais simples é a Sílica (SiO2), frequentemente utilizada como base para muitos materiais e vidros vitrocerâmicos (ASKELAND; WRIGHT, 2019).

A sílica, quando em forma cristalina, apresenta um átomo de silício cercado por quatro átomos de oxigênio dispostos em uma forma tetraédrica. Isso permite que cada átomo de oxigênio se ligue a dois átomos de silício, e assim forme a estrutura cristalina regular encontrada no quartzo. Apesar dessa estrutura, os átomos não são densamente compactados, pois o quartzo tem densidade baixa, de 2,65 g/cm3 (CALLISTER, 2006). O vidro, em contraste, tem uma estrutura atômica distinta que o designa como um líquido super-resfriado, pois não exibe as mesmas propriedades que um líquido ou um sólido cristalino (PETRUCCI, 1987).

A sílica fundida é empregada em uma variedade de aplicações devido à sua baixa expansão térmica. Todavia, sua moldagem é desafiadora devido a viscosidade. Este material é produzido pelo aquecimento do quartzo a uma temperatura superior a 1700ºC, quando o coeficiente de viscosidade da sílica é cerca de 108 vezes maior do que o da água líquida, resultado de poderosas ligações covalentes. Todavia, quando em estado líquido, algumas dessas ligações se modificam ou quebram e, com resfriamento rápido, a sílica se torna amorfa (VAN VLACK, 1996).

O vidro é um sólido amorfo ou não cristalino, distinto de outros sólidos cristalinos devido à sua falta de átomos empilhados e estruturas regulares ou repetidas. Isso o torna um material excepcional definido como um sólido amorfo ou não cristalino (KULA; TERNAUX, 2013).

A fusão de Dióxido de Silício (SiO2), Carbonato de Sódio (Na2CO3) e Carbonato de Cálcio (CaCO3) a uma temperatura de aproximadamente 1.250°C produz vidro. Para aumentar a viabilidade econômica

do material, modificadores como Soda (Na2O) podem ser adicionados, e desempenham papel na ruptura da estrutura da rede e formação eutética em pontos de fusão mais baixos. Além disso, a Cal (CaO) pode ser incorporada, para reduzir a solubilidade do vidro em água e, assim, transformar o produto no vidro comum, conhecido como vidro soda-cal. Este tipo de vidro tem uma composição química estimada de aproximadamente 75% de SiO2, 15% de Na2O e 10% de CaO (CALLISTER, 2006). Após esse processo, a estrutura perde sua natureza cristalina e se torna amorfa, composta por uma única ordem anatômica de curto alcance (ASKELAND e WRIGHT, 2019).

Assim, reforçam Sichieri et al. (2010), que o vidro é um material fisicamente homogêneo, formado a partir do resfriamento e endurecimento de uma massa inorgânica. Durante este processo, a viscosidade aumenta, o que impede que o vidro cristalize. Com isso, ele se caracteriza como um sólido cristalino com uma transição vítrea.

2.4.2 Reciclagem do vidro

O vidro é um material reciclável que pode ser derretido/reciclado sem qualquer perda de qualidade. Uma tonelada de cacos de vidro pode ser transformada em uma tonelada de vidro novo. Este processo é muitas vezes restrito à mesma fábrica que produziu o vidro original devido ao seu conhecimento da composição exata. Vidros de diferentes origens, no entanto, são incapazes de passar por este processo devido a diferentes componentes químicos. Os resíduos de vidro são gerados por consumidores e processadores de vidro, e podem ser reutilizados em outras aplicações, como enchimento ou como material abrasivo, espuma ou fibra de vidro, tinta reflexiva, arte e até mesmo como matéria-prima na produção de asfalto (ROUSE, 2000).

Ainda Rouse (2000) reforça que uma proporção considerável de resíduos urbanos consiste em embalagens de vidro, a exemplo de garrafas, potes e embalagens de sucos e refrigerantes, entre outros. Consequentemente, este material pode ser reciclado, particularmente na indústria da construção.

Disfani et al. (2012) realizaram ensaios de lixiviação para avaliar as características geotécnicas e qualidades ambientais de duas granulometrias de vidro (finas e médias) para uso em bases e sub-bases de pavimentos. Os testes revelaram que o vidro tem boa trabalhabilidade, condutividade e resistência ao cisalhamento, e seu comportamento foi comparável ao das areias naturais e partículas angulares. Além disso, os resultados de lixiviados mostraram que, mesmo na presença de chuva ou chuva ácida,

as camadas compostas por vidro reciclado não apresentavam sinais de risco para as águas subterrâneas durante sua vida útil.

Em outro estudo, Ali et al. (2011) investigaram o uso de misturas com partículas de vidro moído de até 4,75 mm de tamanho para aplicação em sub-bases de pavimento. Após compactação com energia modificada, não foram observadas alterações significativas no tamanho de grão do vidro reciclado, sugerindo sua adequação para uso em aplicações de engenharia, como compactação e espalhamento. O estudo constatou que a umidade ótima e o peso específico aparente seco das amostras foram de 9,2% e 18 kN/m3, respectivamente. Adicionalmente, os testes de peso específico de grão revelaram uma variância em seus valores, aproximadamente 15% menores em comparação ao agregado natural (2,49 g/cm3).

O estudo de Ali et al. (2011) enfatizou a importância dos ensaios de cisalhamento direto com amostras de 100 mm x 100 mm x 40 mm de resíduo de vidro. Os resultados do teste mostraram uma diminuição no ângulo de atrito interno de 55º para 46º quando a tensão normal foi alterada de 25 kPa para 400 kPa. Portanto, pode-se concluir que o vidro reciclado pode ser usado em diferentes aplicações de engenharia geotécnica, pois apresenta comportamento de atrito satisfatório. No entanto, o teste de cisalhamento direto também revelou uma falta de coesão entre as partículas.

2.5 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O solo é um material complexo e variável que, devido à sua natureza universalmente disponível e de baixo custo, pode ser modificado ou tratado para diferentes fins de engenharia. O solo modificado ou tratado é comumente mencionado na literatura como solo estabilizado, melhorado ou tratado (INGLÊS; METCALF, 1972; FOPPA, 2005). Alguns dos fins viáveis deste material à Engenharia são:

> a) Aceitar o material encontrado in situ, projetando a estrutura com padrões suficientes para atender as restrições impostas pela qualidade do solo;
> b) Remover o material local e substituir por um de melhor qualidade;
> c) Alterar as propriedades geotécnicas existentes no solo local, criando um material capaz de atingir as exigências de projeto (INGLÊS; METCALF, 1972, [s.p.]).

Em complemento, Yoder e Witczak (1975) enfatizaram que a análise econômica e de desempenho de um material é essencial para um uso efetivo na engenharia. Em muitos casos, o uso do material em sua localização original pode ser muito oneroso ou mesmo inviável, devido a restrições ambientais ou logísticas. Portanto, quando o local de obtenção está longe do local de construção, as bases granulares

não são recomendadas. Consequentemente, a estabilização do solo (que envolve a mudança de propriedades existentes) se tornou cada vez mais popular na engenharia civil.

Nunez (1991) apresentou um estudo que propôs o uso do arenito de Botucatu para estabilização físico-química do solo para sua melhoria, pois os métodos mecânicos não eram adequados para a camada de pavimento. Uma vez que este é um material abundante na natureza e solo local, o seu uso seria facilitado, com um menor consumo de energia para adaptação e implementação do trabalho.

Conforme observado por Inglês e Metcalf (1972), vários tratamentos térmicos, mecânicos e químicos podem alterar as propriedades dos solos. Yoder e Witczak (1975) fornecem um exemplo de um subleito que inicialmente era inadequado, mas foi melhorado com misturas (adição de agregados) ou compactação, e isso tornou o solo mais adequado para construção e reduziu a espessura da camada de pavimento. Os autores também mencionam que o solo pode ser estabilizado na base, sub-base e, ocasionalmente, na superfície de apoio do pavimento.

2.5.1 Estabilização granulométrica

De acordo com a regulamentação do DNIT (2006), as camadas de base e sub-base granulometricamente estabilizadas podem ser compostas de cascalho, solos, escória de alto forno ou uma combinação desses elementos. O objetivo é criar uma estrutura que tenha a flexibilidade necessária, alcançada pela compactação da mistura de materiais para atender aos índices geotécnicos estabelecidos e tamanhos de partículas de acordo com as exigências regulamentares.

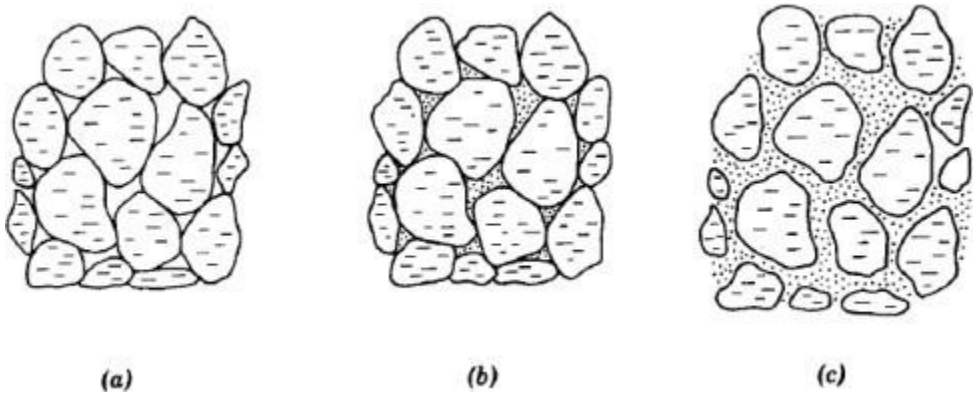
Este tipo de estabilização visa alcançar uma mistura bem graduada de dois ou mais materiais de taxas de partículas finas limitadas para compactação adicional. Consequentemente, as propriedades do solo podem ser alteradas pela combinação ou separação de suas partículas, tornando-o mais apropriado para as aplicações de engenharia em que será utilizado (VIZCARRA, 2010).

De acordo com Yoder e Witczak (1975), a estabilidade de uma mistura solo- agregado é amplamente dependente de vários fatores, incluindo distribuição de tamanho de partícula, forma, densidade relativa, ângulo de atrito e coesão. A densidade, forma e distribuição granulométrica das partículas são todas instrumentais na determinação do ângulo de atrito e resistência ao cisalhamento, sendo este último necessário para resistir a qualquer deformação induzida por carga. Destes elementos, a

distribuição de tamanho de partícula é amplamente considerada como o principal determinante da interação entre as frações grossa e fina da mistura.

A partir da Figura 1 abaixo, de autoria de Yoder e Witzczak (1975), é possível identificar um modelo de três estados físicos de misturas solo-agregado, ilustrando a relação entre a quantidade de finos presentes e o desempenho da mistura. Este modelo fornece evidências sobre como a quantidade de finos pode afetar a estrutura do composto.

Figura 1: Estados físicos de misturas solo-agregado.



Fonte: Yoder e Witczak (1975).

No desdobramento da representação, Yoder e Witczak (1975) distinguem os três estados retratados da seguinte forma:

a) Solo-agregado com mínima ou nenhuma presença de material fino, exibindo estabilidade do contato grão a grão, com baixa densidade e alta permeabilidade, mas manipulação complexa devido à falta de finos, é a descrição do agregado do solo;

b) Solo-agregado com material fino que preenche os vazios da fração grossa, resultando em um solo de alta densidade, mas menos permeável, com uma estabilidade otimizada. O contato grão a grão está presente e a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade são elevadas em comparação, e;

c) Mistura de agregados, com uma grande proporção de materiais finos, em que o contato grão a grão é evitado e o agregado flutua no solo. Isso resulta em uma densidade e permeabilidade diminuídas quando comparadas ao caso anterior (b) e a impermeabilidade pode ocorrer. Como a umidade pode ser altamente variável, a estabilidade do solo é comprometida, mas o processo de construção é facilitado devido à maior facilidade de compactação.

Bernucci et al. (2006) verificaram que o uso de bases de pavimento compostas por materiais especificados como "a" e "b" oferecem preservação de contato grão a grão, mistura bem graduada e preenchimento de vazios. O resultado do uso, dessa forma, é a estabilização do tamanho das partículas.

Todavia, ainda Bernucci et al. (2006) também observaram que, em particular no caso de materiais finos do tipo “c”, é viável sua utilização em solos lateríticos, devido à baixa expansão, bom suporte e propriedades de coesão desses solos. Consequentemente, os materiais do tipo "c" podem ser utilizados em condições de baixo tráfego ou mesmo como um subleito para faixas de tráfego médio a pesado, embora haja a possibilidade de rachaduras se mais de 50% em peso do solo for usado. As rotas de tráfego médio a pesado poderiam se beneficiar de misturas solo- cimento frágil com um resultado satisfatório na proporção de 80% de cascalho e 20% ou, no máximo, 70% de cascalho e 30% de solo, utilizando cimento entre 3% e 6% do peso atual.

2.5.2 Estabilização física

Cristelo (2001) descreve a estabilização física como um meio de alterar as propriedades do solo através do uso de eletricidade, calor e outros recursos similares. Camadas de solo moles e compressíveis em aterros sanitários podem ter uma taxa mais lenta de consolidação devido à sua baixa permeabilidade, que pode ser acelerada através do emprego de técnicas como eletro-osmose, drenos verticais e sobrecargas temporárias. Contudo, estratégias como estabilização térmica e eletro-osmose (física) podem ser onerosas e, por essa razão, elas raramente são implementadas.

2.5.3 Reações pozolânicas

A atividade pozolânica é uma forma de estabilização química que considera as interações entre elementos ativos de pozolanas (compostos inorgânicos de sílica- alumínio), água e cal. Pozolanas são materiais de origem natural ou artificial que, quando combinados com água e óxido de cálcio, causam enrijecimento e formam compostos cimentícios (PACHECO, 2017).

Pozolanas naturais, muitas vezes de origem vulcânica ou sedimentar, geralmente não precisam passar por processamentos como moagem ou modificações químicas/estruturais. Por outro lado, as pozolanas artificiais estão sujeitas a processamento e compreendem materiais que passaram por

tratamento térmico ou se originam de subprodutos industriais, como argilas calcinadas e cinzas volantes (MASSAZZA, 2004).

Os materiais pozolânicos podem ser identificados por três características principais: alto teor de sílica, partículas amorfas e uma grande área superficial específica. Quando comparado à sílica ativa e cinzas volantes, o vidro tem uma quantidade adequada de sílica e, quando moído, atende aos requisitos essenciais de uma pozolana para exibir seu comportamento pozolânico (SHAO et al., 2000).

O estudo de Consoli et al. (2018) investigou as reações pozolânicas entre a sílica de vidro de garrafa moído e Íons Cálcio (Ca++) da cal de carboneto em areia mal graduada com siltes (areia Osório). As proporções de vidro fosco e carboneto de cal utilizadas no estudo foram de 10%, 20% e 30% e 3%, 5% e 7%, respectivamente, com cura por sete dias. Os resultados do estudo mostraram que maiores quantidades das duas pozolanas aumentaram os ganhos em Resistência à Compressão Simples (RCS) e G0 (módulo de cisalhamento inicial), e reduziram as perdas de massa acumuladas conforme observado através do teste de durabilidade de umectação e secagem.

O estudo de Metwally (2007) sugere que a incorporação de características pozolânicas em misturas de concreto aumenta a resistência mecânica e o tempo de cura, mas reduz a trabalhabilidade. Para serem adequadas, as pozolanas devem apresentar uma alta taxa de sílica e ampla área superficial.

Massaza (2004) relata que compostos nos quais alumínio e silício são situados em estruturas amorfas ou sem ordem atômica podem reagir com a cal em situações normais de pressão e temperatura. Assim, de acordo com o aumento dos novos arranjos da estrutura do material, há também elevação da reação pozolânica.

A partir dessa perspectiva, Carraro (1997) observou que materiais com altos traços pozolânicos são mais comumente utilizados, pois aumentam e otimizam efetivamente a resistência dos solos em tarefas de construção civil, como barragens, rodovias, fundações e outros.

3 METODOLOGIA

3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

Esta pesquisa lançou mão da Revisão Sistemática para tratar da questão da utilização de vidro moído como agregado miúdo em revestimentos asfálticos. Este modelo de análise é um meio para que se

possa localizar, avaliar e organizar as revisões. Amplamente empregada na área médica, esta técnica vem, ao longo do tempo, ganhando espaço em diversas áreas do conhecimento, pois tem a capacidade de utilizar os dados primários para criar uma narrativa que descreve os principais métodos e resultados em torno de um tema, com a capacidade de suscitar tópicos ainda não respondidos ou que necessitam de maiores informações (PETTICREW, 2001).

Ainda conforme Petticrew (2001), a revisão sistemática se destaca pelas seguintes características:

a) Redução de vieses ao selecionar, incluir e avaliar estudos de forma qualitativa e quantitativa;

b) Dispensa da presença de especialistas para a execução da pesquisa;

c) Possibilidade de ser executada por qualquer indivíduo que esteja interessado em determinado tema, e;

d) Capacidade de ser reproduzida, independentemente do tempo e do local, pois apresenta critérios bem delineados.

Desta maneira, as pesquisas que empregam a revisão sistemática devem ser metódicas, explícitas e passíveis de reprodução por qualquer pessoa que cumpra a metodologia descrita, independente do tempo ou do modo que outros pesquisadores possam repetir o experimento. Sendo assim, são estudos que demandam uma pergunta clara, a definição de uma estratégia de busca, o estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão de estudos, assim como, especialmente, uma análise minuciosa da qualidade da literatura selecionada (GALVÃO; PEREIRA, 2014).

O desenvolvimento deste tipo de pesquisa passa pela caracterização de cada estudo selecionado, a avaliação de suas qualidades, a identificação de conceitos importantes e a conclusão sobre o que a literatura aponta em relação a determinada intervenção, ressaltando ainda problemas e questões que exigem novos estudos (SAMPAIO; MANCINI, 2007).

São frequentes os casos em que pesquisadores de revisões sistemáticas terminam por comunicar unicamente os resultados positivos dos estudos analisados. Todavia, é primordial que os resultados negativos também sejam salientados, pois tais aspectos foram essenciais na evolução de conhecimento sobre o tema e da limitação das técnicas (LAW; MACDERMID, 2008).

Conforme Galvão e Pereira (2014), revisões sistemáticas demandam, geralmente, oito etapas. São elas:

a) Elaboração da pergunta de pesquisa;

b) Busca na literatura;

c) Seleção dos artigos;

d) Extração dos dados;

e) Avaliação da qualidade metodológica;

f) Síntese dos dados;

g) Avaliação da qualidade dos estudos; e

h) Redação e publicação dos resultados.

Neste estudo, conforme indicações de Liberati et al. (2009), foi utilizada a lista de verificação Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta- Analyses (PRISMA, traduzido à língua portuguesa como Principais Itens para Relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises) para direcionar o processo de busca e análise das publicações. PRISMA é um conjunto de diretrizes desenvolvidas com o objetivo de melhorar a qualidade e a transparência das revisões sistemáticas e meta-análises. Ao estabelecer uma estrutura padronizada, facilita a comparação e avaliação das revisões sistemáticas, auxiliando na identificação de possíveis limitações e pontos fortes de cada estudo. A metodologia é composta por 27 itens que estão organizados em uma lista de verificação e um diagrama de fluxo. Os componentes da PRISMA são divididos em sete seções, a saber: título (deve indicar de maneira clara que o estudo é uma revisão sistemática, uma meta-análise ou ambos), resumo (é necessário incluir um resumo estruturado que descreva os objetivos, métodos, resultados e conclusões do estudo), introdução (seção contém o contexto e a justificativa para a revisão sistemática, incluindo os objetivos e a formulação das perguntas de pesquisa), métodos (descreve o processo de seleção de estudos, critérios de inclusão e exclusão, busca nas bases de dados, avaliação da qualidade dos estudos incluídos e métodos estatísticos utilizados), resultados (apresenta os resultados da revisão sistemática, incluindo o número de estudos incluídos, os achados e a síntese dos dados), discussão (fornece uma interpretação e análise dos resultados, identificando limitações e implicações práticas para a pesquisa e a prática clínica) e financiamento (que inclui informações sobre o financiamento da revisão sistemática e possíveis conflitos de interesse).

Assim, a partir da PRISMA, isso envolveu a consideração das diferentes etapas que formam um estudo, desde o seu título até aspectos de seu financiamento e envolvimento dos autores, a fim de determinar pareceres isentos e reduzir o risco de viés.

3.1.1 Critérios de inclusão e exclusão

Para a análise foram buscados artigos científicos completos, que apresentaram como temática primária a aplicação do vidro moído como agregado miúdo em revestimentos asfálticos, que tenham sido publicados entre os anos de 2012 e 2022, publicados em inglês.

A busca foi feita a partir das palavras contidas no tópico do trabalho. O tópico agrega os campos título, palavras-chave e resumo. Como os termos desta pesquisa incluem materiais muito comuns e abrangentes (vidro, pavimento e asfalto) o resultado da pesquisa traz uma quantidade enorme de artigos (mais de 400), e a grande maioria deles não tem relação com o tema pretendido.

3.1.2 Levantamento dos artigos

Os artigos foram buscados em três bases de dados eletrônicas, a saber: Web of Science, Scopus e Scielo, selecionadas por concentrar a maioria das publicações voltadas ao objeto de estudo, oferecendo assim maior possibilidade de acesso. Para a busca foram utilizados os seguintes parâmetros: título que inclua glass E pavement E asphalt.

Ao aplicar a busca na base de dados foram escritas strings, pois com elas a definição dos parâmetros termina por ser mais precisa, relacionando as diversas palavras chaves e os seus conectores.

Na base de dados Web of Science, a string de pesquisa foi feita da seguinte maneira: TS=(glass) AND (pavement) AND (asphalt)).

Na base de dados Scopus, a string de pesquisa foi feita da seguinte maneira: ABS (glass) AND (pavement) AND (asphalt).

Na base de dados Scielo, a string de pesquisa foi feita da seguinte maneira: ABS (glass) AND (pavement) AND (asphalt).

3.1.3 Extração de dados e síntese

Com os parâmetros utilizados na busca, foram encontrados 274 artigos na base Web of Science, 906 artigos na Scopus e nenhum artigo na base de dados Scielo (antes de qualquer tratamento ou exclusão de duplicatas), conforme Passo 1, exibido na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Quantidade de trabalhos selecionados

Base de dados	Passo 1	Passo 2	Passo 3
Web of Science	274	5	5
Scopus	906	15	13
Scielo	0	0	0
Total	1.180	20	18

Após uma seleção inicial (Passo 2), que levou em conta a pertinência do artigo para esta análise, com verificação de título e resumo e agrupamento de artigos duplicados, bem como exclusão de publicações indisponíveis para leitura integral diretamente nas bases, foram selecionadas 18 publicações, que se encontram descritas no Quadro 4, anexo a esta pesquisa (Artigos selecionados para análise), e que foram objeto da análise principal deste estudo. Os dois artigos excluídos da filtragem foram justificados pela divulgação com impossibilidade de tradução em idioma oriental (1) e por se tratar de um relato de experiência (1). Os 18 trabalhos foram lidos integralmente (passo 3), e assim integrados à análise aplicada.

3.1.4 Critérios de Qualidade

O Sistema Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation (GRADE) foi projetado para avaliar a qualidade geral das evidências de forma sistemática, com quatro níveis de certeza (alto, com baixo risco de alteração dos conceitos discutidos; para muito baixo, em que as evidências são incertas) (LEOPOLDINO et al., 2016). Este estudo considerou ainda o fator de interesse e a abordagem específica adotada em cada publicação, pois muitos dos interesses estavam presentes nos estudos, mas com diferentes abordagens metodológicas e graus de avaliação, dependendo da finalidade de cada publicação. Para melhorar os dados coletados, foram desenvolvidas escalas de consistência com base nas referências no Sistema GRADE, conforme exposto no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 - Aplicação de critério de qualidade para seleção de evidência

Interesse	Número de estudos	Qualidade de evidência
Benefícios físicos da inclusão de vidro moído na mistura asfáltica	18 estudos referentes: Afonso *et al.* (2019), Bilondi, Toufigh e Toufigh (2018), Cheng *et al.* (2021), Abdulamer *et al.* (2021), Du *et al.* (2020a), Du *et al.* (2020b), Ferrão e Moizinho (2017), George e Anochie-Boateng (2016), Iskender *et al.* (2020), Issa (2016), Kumar *et al.* (2020) , Lachance-Tremblay *et al.* (2017), Sanji *et al.* (2019), Simone *et al.* (2019) , Thamoorian *et al.* (2020), Udomchai *et al.*, (2021), Vicent, Criado e García Ten (2019) e You *et al.* (2020).	●●●○ Moderado
Percentual ideal de vidro moído para uso na mistura asfáltica	9 estudos referentes: Afonso *et al.* (2016) , Bilondi, Toufigh e Toufigh (2018); Cheng *et al.* (2021); Abdulamer *et al.* (2021); Du *et al.* (2020a); Du *et al.* (2020b); Iskender et al. (2020); Lachance-Tremblay *et al.* (2017) e You *et al.* (2020).	●●●○ Moderado
Viabilidade econômica	5 estudos sobre o tema: Afonso *et al.* (2016); Bilondi, Toufigh e Toufigh (2018); George e Anochie-Boateng (2016); Lachance-Tremblay et al. (2017) ;Sanji *et al.* (2019).	●○○○ Muito baixo

Quadro 3 - Aplicação de critério de qualidade para seleção de evidência

Interesse	Número de estudos	Qualidade de evidência
Benefícios/ganhos ambientais no uso do vidro moído em misturas asfálticas.	6 estudos sobre o tema: George e Anochie-Boateng (2016); Udomchai et al. (2021); Vicent, Criado e García Ten (2019); You *et al.* (2020).	●○○○ Muito baixo

GRADE é construída com uma faixa de quatro níveis de evidência: I – Alto, forte confiança de que o verdadeiro efeito esteja próximo daquele estimado, implicando ser improvável que trabalhos adicionais modifiquem a confiança na estimativa do efeito; II – Moderado, há confiança moderada no efeito estimado, implicando que trabalhos futuros poderão modificar a confiança na estimativa do efeito, podendo, inclusive, modificar a estimativa; III – Baixo, a confiança no efeito é limitada, implicando que trabalhos futuros provavelmente terão um impacto importante na confiança na estimativa de efeito; IV – muito baixo, a confiança na estimativa do efeito é muito limitada, e há importante grau de incerteza nos achados apresentados, implicando que qualquer estimativa de efeito é incerta.

A maioria dos estudos considerados apresenta consistência nos percentuais ou efeitos indicados, com um consenso na maioria das pesquisas sobre o tema pesquisado, bem como riscos implicados;

Há uma moderada heterogeneidade nos resultados, e não é possível uniformizar a previsão de respostas do item

apurado, com uma imprecisão que pode afetar a consistência dos achados;
Os resultados não permitem mensurar com total precisão os critérios de influência ou resultado, e/ou não há possibilidade de estimar riscos precisos associados e suas variáveis dependentes, bem como existe a possibilidade de desdobramentos desconhecidos que não foram investigados, que se somam a imprecisões de resultado ou metodologia que tornam complexo estimar os resultados e desfechos;
Há imprecisões ou variações entre os estudos, com alto risco de viés e baixa ou inexistente consistência conclusiva.

A respeito deste quadro, observa-se que a pesquisa baseada em evidências envolve a coleta, análise e síntese de informações provenientes de estudos científicos para fundamentar decisões e práticas em uma determinada área. A qualidade das evidências pode variar de muito baixo a alto, dependendo da metodologia empregada, da consistência dos resultados, do tamanho da amostra e de outros fatores. No contexto apresentado, temos diferentes temas relacionados à inclusão de vidro moído na mistura asfáltica, com variações na qualidade das evidências disponíveis:

a) Benefícios físicos da inclusão de vidro moído na mistura asfáltica: com 18 estudos de nível moderado, é possível concluir que há evidências razoáveis para apoiar a ideia de que a adição de vidro moído à mistura asfáltica pode proporcionar benefícios físicos. No entanto, seria ideal realizar mais pesquisas de alta qualidade para fortalecer essa conclusão.

b) Percentual ideal de vidro moído para uso na mistura asfáltica: há 9 estudos moderados sobre o tema, o que indica que existe algum conhecimento sobre o percentual ideal de vidro moído na mistura asfáltica. No entanto, seria benéfico conduzir estudos adicionais de alta qualidade para determinar com mais precisão o percentual ideal e garantir resultados mais consistentes.

c) Viabilidade econômica: com apenas 5 estudos de nível muito baixo, a evidência disponível sobre a viabilidade econômica da inclusão de vidro moído na mistura asfáltica é insuficiente. Isso significa que é difícil tirar conclusões sólidas sobre a viabilidade econômica dessa prática sem realizar mais pesquisas de qualidade superior.

d) Benefícios/ganhos ambientais no uso do vidro moído em misturas asfálticas: a presença de apenas 6 estudos de nível muito baixo indica que a compreensão atual dos benefícios ambientais associados ao uso de vidro moído em misturas asfálticas é limitada. Seria necessário realizar mais pesquisas de alta qualidade para fornecer evidências robustas e confiáveis sobre os benefícios ambientais dessa prática.

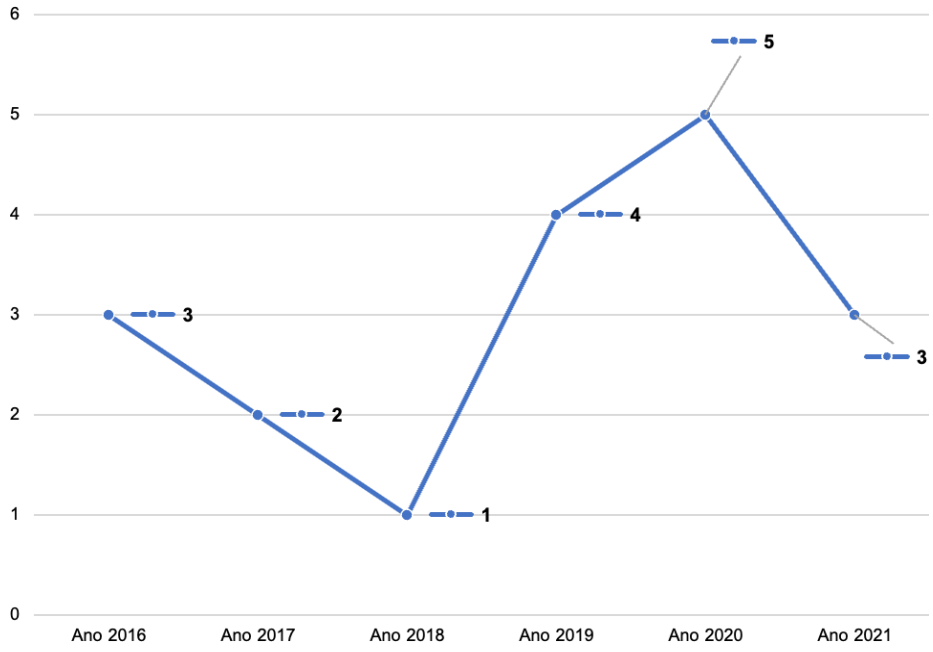
Sendo dessa forma, uma pesquisa baseada em evidências neste contexto sugere que há alguma evidência para apoiar os benefícios físicos da inclusão de vidro moído na mistura asfáltica e alguma

compreensão do percentual ideal de vidro moído. No entanto, são necessárias mais pesquisas de alta qualidade para abordar as lacunas no conhecimento relacionadas à viabilidade econômica e aos benefícios ambientais dessa prática.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram coletadas ao todo 18 publicações no intervalo de pesquisa, cujo período de coleta estabelecido se estendem de 2012 a 2022. Todavia, o intervalo de publicações selecionados a partir dos critérios de metodologia descritos concentraram as publicações entre os anos de 2016 a 2021, conforme apresentado no Gráfico 1 abaixo:

Gráfico 1 – Publicações coletadas para análise.



A análise dos levantamentos publicados entre 2016 e 2021 mostra um pequeno e pouco significativo aumento no interesse por materiais alternativos para revestimentos asfálticos e estratégias de reaproveitamento, com a maior concentração de publicações ocorrendo em 2020. Em 2016, três pesquisas foram publicadas, seguidas por duas em 2017, uma em 2018, quatro em 2019 e cinco em 2020 e três em 2021. Especificamente, 5 pesquisas foram publicadas em 2020, respondendo por 25% do total. Isso indica um crescimento acentuado no interesse do tema de 2019 a 2020.

Embora a maioria das publicações tenha sido recuperada do Scopus (72,2%, n=13), e uma proporção menor foi obtida em Web of Science (27,8%, n=5), é preciso considerar que algumas publicações

podem se encontrar duplicadas nestas bases, e assim, não justificar necessariamente maior prevalência, e sim identificação em primeiro caso. Essa prevalência de extração no Scopus se deve à sua capacidade de concentrar também muitas publicações que se encontram também nas demais bases de pesquisa utilizadas, de forma que somente nos casos de duplicadas em que a identificação ocorreu primeiro na base anterior é que a incidência foi retirada de seu escopo.

Os dezoito estudos avaliados apresentaram variações na metodologia e no desenvolvimento, impossibilitando o uso de metanálise devido ao risco de viés, e os temas centrais tratados no corpo de pesquisa foram sintetizados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Principais aspectos investigados nos artigos em análise (2012-2022)

Tópico	**n**	**%**
Resiliência / resistência	15	23,8
Aspectos térmicos/ Degelo de água/ Congelamento	6	9,5
Fluência ou fluxo	4	6,3
Rigidez	4	6,3
Desempenho	3	4,8
Pontos diversos (amolecimento, inflamação, penetração)	3	4,8
Teores diversos (betume/umidade)	3	4,8
Absorção/danos de água	2	3,2
Carga	2	3,2
Densidade	2	3,2
Descamação/decapagem	2	3,2
Formato/aspectos de partícula	2	3,2
Lixiviação	2	3,2
Outros *	13	20,6
Total	**63**	**100%**

* Abrasão, condutividade térmica, custos de construção, deformação, estabilidade, informações microestruturais, informações mineralógicas, fadiga, flexão, força compressiva, gravidade, pressão, tempo de cura.

Em 18 artigos analisados, 63 temas ou abordagens de avaliação foram identificados e abordados nos objetivos. Isso equivale a uma média de 3,5 temas por artigo, indicando que muitos estudos incorporam múltiplos temas em seus objetivos.

Do total de publicações examinadas, cada uma apresentou as especificidades dos testes aplicados, com uma variedade de apresentação e execução. Adicionalmente, os tipos de vidro moído variaram, com descrição do potencial de reutilização, sendo a maioria resíduos gerais de vidro triturado, entretanto, evidências de estudos demonstraram o potencial para aplicações alternativas de resíduos de lâmpadas fluorescentes e vidros de para-brisa, conforme consta descrito na Tabela 3:

Tabela 3 - Tipos de vidro moído utilizados nos estudos analisados (2012-2022)

Tópico	N	%
Vidro reciclado triturado	6	33,3
Pó de vidro	3	16,7
Microesferas de vidro	2	11,1
Vidro residual (oriundo de fábricas de vidro)	2	11,1
Outros tipos de vidro moído*	5	27,7
Total	18	100

* Vidro moído de para-brisas (com as camadas temperadas), resíduos de vidro quebrado, vidro moído de garrafas (fresado), vidro cortado de resíduos de lâmpadas fluorescentes e resíduos de lâmpadas fluorescentes em pó e vidro reciclado de tubos de raios catódicos.

A literatura abordou uma variedade de materiais, sendo o vidro reciclado moído o mais frequentemente abordado e o mais abundante no meio de descarte. Outros tipos de vidro, como vidro moído de para-brisas, resíduos de vidro quebrado, vidro moído de garrafas e resíduos de lâmpadas fluorescentes e pó de vidro reciclado de tubos de raios catódicos, também foram discutidos, fornecendo uma gama diversificada de tópicos. Esses estudos foram então sintetizados em sequência.

O desempenho do vidro moído incorporado em argamassas cimentícias como um pavimento semirrígido pesado foi avaliado por Afonso et al. (2016). Usando o cone de Marsh, o tempo de escoamento e as medições do reômetro a uma temperatura de 20ºC, o estudo revelou módulo de rigidez à tração direta, estabilidade Marshall, resistência abrangente e deformabilidade permanente. Os resultados deste estudo fornecem mais informações sobre o potencial do vidro moído em pavimentos semirrígidos. O estudo revelou que a incorporação de vidro moído na argamassa S30MG rendeu desempenho superior nos testes. Além disso, a mistura a frio de 8/12,5 com granito alterado e argamassa cimentícia (30% de vidro moído) demonstrou um desempenho mecânico mais vantajoso. Consequentemente, tanto para a construção de estradas quanto de aeroportos, a utilização de reciclados e resíduos foi viável e produziu resultados consistentes com os regulamentos vigentes.

A pesquisa conduzida por George e Anochie-Boateng (2016) explorou o potencial do uso de materiais de construção alternativos para substituir agregados naturais na África do Sul. O estudo demonstrou que o vidro triturado em porcentagens de 10-15% era uma opção viável para a recuperação da pavimentação; no entanto, o uso de mais de 15% da mistura poderia levar à deterioração do revestimento devido à remoção e aglutinante do vidro. A mistura foi considerada sustentável e economicamente viável, pois poderia reduzir a quantidade de vidro em aterros sanitários. O uso de vidro moído foi atraente, pois não contém contaminantes como papel, plástico, detritos de sujeira ou

metais tóxicos, o que poderia representar riscos ambientais. No geral, o padrão de uso desses materiais é semelhante ao dos agregados de granito fino.

Os efeitos da inclusão de agregado de vidro moído oriundo de para-brisas em diferentes proporções de betume foram avaliados por Issa (2016). O estudo focou na estabilidade e vazios de ar da mistura, considerando proporções de 4,5%, 5,0% e 5,5% de betume, além da adição de vidro moído em proporções de 5%, 10% e 15% do peso total do agregado, sem contar a não adição deste material. Vários testes, como análise de granulometria, massa específica e ensaio de abrasão Los Angeles foram utilizados para avaliar as misturas. Os resultados indicaram que a adição de 10% de vidro a baixas porcentagens de betume (menores que 5%) geralmente produziram os resultados mais positivos, com uma melhora de estabilidade aproximada de 15%. Foi observado que uma diminuição na massa específica do volume ocorre quando a porcentagem de vidro é aumentada, enquanto os vazios de ar são reduzidos com uma porcentagem maior de betume. Neste estudo, os benefícios da mistura deixaram de aumentar após 10% de reposição de betume. Consequentemente, é essencial considerar o betume para melhorar a estabilidade e a fluidez do produto, mantendo uma taxa de substituição ideal de 10% dos agregados totais, a fim de obter os melhores resultados para o uso de vidro em revestimentos asfálticos.

O estudo realizado por Lachance-Tremblay et al. (2017) avaliou o comportamento de degradação de misturas asfálticas as quais foram agregadas por vidro em diferentes percentuais de mistura e, após isso, submetidas a ciclos de congelamento e descongelamento. Os testes foram aplicados a misturas secas e saturadas em condições variáveis, como imersão em água quente e ciclos repetidos de congelamento e descongelamento sob o modelo reológico 2S2P1D. A mistura de asfalto utilizada no estudo consistiu em um agregado de 0,10 mm (EDG10) e um polímero comumente usado PG70-28 na região de Quebec, onde o estudo foi aplicado. A substituição de 20% dos agregados calcários por vidro foi adotada em três tamanhos diferentes, sendo 6% (1,25 mm-2,5 mm), 7% (0,630 mm-1,25 mm) e 7% (0,315-0,630 mm) do teor de aglutinante volumétrico efetivo para todas as misturas. Para reduzir problemas de perda de resistência das misturas durante os ciclos de congelamento e descongelamento, 2% do peso total dos agregados foi substituído por cal hidratada, que também tem um efeito positivo em evitar problemas de decapagem.

Lachance-Tremblay et al. (2017) desenvolveram um estudo que envolveu o aquecimento de vidro e cal hidratada a 180 °C, bem como um aglutinante a 169 °C, com margem de tolerância de 2°C. Em seguida,

os aglutinantes foram homogeneizados e curados em um forno fechado e ventilado por uma duração entre 30 minutos e 2 horas, para evitar a oxidação. As amostras foram então submetidas a moldes compactadores rotativos de 150 mm de diâmetro e 170 mm de altura para produzir um material vazio de 5,5% com amostras de 75 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento. Os resultados mostraram que a água nos vazios da mistura aumentou a rigidez a temperaturas abaixo de zero. Independentemente da mistura utilizada neste estudo, todas as amostras apresentaram danos relativos aos ciclos de congelamento e descongelamento após dez ciclos. Qualitativamente, danos mais insidiosos ocorreram com mais frequência nas misturas que apresentavam vidro, o que traz um traço de atenção ao possível uso em países com temperaturas frias.

Ferrão e Moizinho (2017) realizaram um estudo para avaliar a eficácia do emprego de preenchedores não convencionais em Hot Mix Asphalt (HMA), como alternativa aos aglutinantes convencionais como cimento Portland e cal hidratada, que possuem boa resistência às intempéries. Os preenchedores foram testados a 0%, 5% e 10% em peso, de acordo com as normas brasileiras e CAP 50/70. O vidro moído foi pulverizado em um moinho por 30 minutos. O Índice de Suscetibilidade Térmica (IST) do vidro moído foi de -0,69 para 5% e -0,75 para 10% de peso de carga, o que é consistente com os padrões brasileiros estabelecidos pelo DNIT, com melhores resultados quando comparado aos materiais comparativos utilizados no teste, como pó de laterita (-0,61 para 5% e 0,32 para 10%).

Ainda em Ferrão e Moizinho (2017), tanto a laterita quanto o pó de vidro demonstraram eficácia como substitutos do cimento Portland em testes de ponto de amolecimento, penetração e ponto de fulgor. Notavelmente, o pó de vidro produziu resultados mais favoráveis a temperaturas mais baixas, exibindo uma diminuição no ponto de amolecimento e penetração da mistura. Por outro lado, a laterita foi mais adequada para climas mais quentes devido à sua capacidade de endurecimento, maior ponto de amolecimento e menor penetração, sugerindo um resultado mais efetivo em regiões de maiores flutuações de temperatura.

O estudo de Bilondi, Toufigh e Toufigh (2018) explorou experimentalmente os efeitos do geopolímero à base de pó de vidro reciclado no comportamento mecânico de solos argilosos. Através da análise de raios-X dos elementos químicos dos solos e do ensaio de resistência à compressão não confinada, os parâmetros avaliados incluíram o teor de pó de vidro reciclado no solo coletado a 5 m de profundidade e o teste de gradação realizado de acordo com os padrões ASTM- D422 e D2487. O vidro triturado foi pulverizado em um moinho planetário até se tornar um pó de vidro fino que poderia passar por uma

peneira nº 200, com partículas menores que 75 µm usadas como polímero. O hidróxido de sódio foi empregado como ativador alcalino, que foi preparado com água da torneira um dia antes do uso e adicionado ao solo, agregado e vidro para obter uma umidade ideal de 20% em uma mistura uniforme.

Bilondi, Toufigh e Toufigh (2018) identificaram em pesquisa que a adição de vidro moído para estabilizar as amostras aumentou significativamente a resistência à compressão não confinada; a maior melhora foi observada com uma mistura de 15% de agregado de vidro. Além disso, foi mostrado ainda no estudo que quanto maior o tempo de cura para amostras estabilizadas, maiores os valores de resistência à compressão; os maiores valores foram observados após 91 dias de cura. No entanto, observou-se que as melhorias alcançadas após 28 dias de cura não foram significativas. Amostras não estabilizadas exibiram maior deformação, indicando a necessidade de uma fonte rica em sílica em uma fase amorfa, como pó de vidro, para estabilizar o solo e formar um gel polimérico. Uma temperatura de síntese de 70ºC aumentou a resistência à compressão de amostras estabilizadas com geopolímero. Todavia, sua sustentabilidade e custo-efetividade são questionáveis e sugerem que a temperatura ambiente é preferível. Assim, o uso de agregados de vidro é benéfico para a estabilização do solo argiloso e fornece uma alternativa ecológica.

Em seu estudo, Sanji et al. (2019) avaliaram o desempenho e a sensibilidade à umidade de uma mistura de asfalto quente contendo vidro modificado por Zycotherm como aditivo de decapagem. A preparação das amostras envolveu um teor de vidro triturado de 10% do peso total dos agregados, com partículas menores que 4,75 mm. O aditivo a base de organosilano Zycotherm foi utilizado em quantidades proporcionais ao teor de betume a 0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20% para avaliar seu efeito. Para avaliar as propriedades da mistura de asfalto, foram aplicados testes de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier, ensaios de asfalto, ensaio de Lottman modificado, ensaio de Módulo de Resistência e ensaio de Fluência. Os resultados do estudo mostraram que a adição de vidro triturado a misturas de asfalto quente tem um potencial considerável, com o Zycotherm fornecendo modificação de betume e aumentando a resistência ao desgaste. Esta inclusão de vidro aumenta a resistência à umidade e fluência devido ao revestimento amplificado e capacidade de promover liga presente no Zycotherm. O adesivo modifica de forma permanente a superfície à qual é agregado e faz com que sua compatibilidade com o asfalto seja aumentada, com formação de uma liga total com o agregado. Isso beneficia a longevidade do betão asfáltico, reduz a oxidação e melhora a trabalhabilidade da mistura, além da resistência à água da mistura final resultante. No entanto, as misturas contendo vidro moído têm menor elasticidade,

pois há baixa adesão entre o betume e as partículas de vidro triturado. O uso de Zycotherm ajuda a contrabalançar esse problema e melhora a suscetibilidade à umidade quando a porcentagem de Zycotherm é superior a 0,15%. Este aditivo, portanto, melhora o desempenho de misturas de asfalto contendo até 10% de agregado de vidro quando testadas.

Simone et al. (2019) investigaram a utilização de vidro em pó como enchimento em misturas de asfalto reciclado com gradação densa. O estudo aplicou o vidro moído como substituto do enchimento de calcário, e utilizou testes químicos e físicos (análise de tamanho de partícula por fotossedimentação; teste de vazio de Ridgen para determinar o volume de enchimento vazio quando compactado; teste de densidade aparente, para medir a gravidade do enchimento; teste de azul de metileno para avaliar a absorção por grama de carga fina; teste de sensibilidade à água para medir a resistência à solubilidade; e teste Anel e Bola para avaliar o efeito de enrijecimento dos enchimentos minerais em misturas de asfalto) para verificar sua equivalência. O estudo utilizou o CAP modificado por polímero SBS (3% de betume em peso) e o CAP 50/70 em sua forma pura. As misturas de asfalto incorporaram 7% de vidro e o ligante (também denominado de mástique) incorporou 66% de vidro, com o respectivo betume para agregar porcentagens de agregado ao peso total de 5,5% e 44%.

Os achados de Simone et al. (2019) não revelam efeitos adversos na utilização de vidro moído e sugerem que o material resultante apresentava menores vazios de ar em comparação com misturas convencionais de calcário. Assim, o vidro moído pode ser efetivamente empregado na forma de um enchimento fino em aglutinantes tipo padrão ou modificados, em particular em pavimentos rodoviários, como um substituto para o calcário. O material não exibe um efeito negativo na taxa de compensação da mistura, fornece maior rigidez ao ligante e, quando combinado com o polímero SBS, aumenta o desempenho da resposta à tensão de cisalhamento elástico. Além disso, o vidro moído pode aumentar a capacidade de carga e resistência a deformações permanentes do pavimento.

Vincent, Criado e García-Ten (2019) realizaram um estudo para avaliar a aplicação de vidro de lâmpadas fluorescentes como enchimentos asfálticos, especificamente os materiais ativados por álcalis ou geopolímeros. Resíduos de enchimentos de asfalto e lâmpadas de fluorescência foram transformados em pó e, em seguida, submetidos a difração a laser e análise de decomposição química por fluorescência de raios-X dispersiva de comprimento de onda. Em combinação, a solução de hidróxido de sódio foi utilizada como um agente de ativação.

As amostras foram inicialmente ativadas com NaOH em proporções variáveis de líquido para mistura em solução alcalina por 10 minutos em um misturador de lâminas, com concentrações de 9,9 M e 8,8 M de NaOH para comparação. Subsequentemente, as pastas resultantes foram moldadas em pequenos baldes e curadas em um forno a 85°C em uma atmosfera saturada de água por 20 horas. Após a desmoldagem, as amostras foram secas à temperatura ambiente por 24 horas. Testes subsequentes de lixiviação, medições de força de flexão de três pontos, avaliações de densidade aparente e análises de absorção de água foram realizados nas amostras.

Os resultados apresentados por Vincent, Criado e García-Ten (2019) indicaram o papel determinante do ativador alcalino em materiais de estudo. Uma porcentagem maior de resíduos de lâmpadas fluorescentes sugeriu a capacidade de criar microestruturas mais densas e compactas. Quando substratos de lâmpadas fluorescentes foram adicionados a misturas de asfalto, as simulações sugeriram flexão melhorada devido ao aumento do teor de sílica no material resultante (até 25% do material adicional). Tal condição pode aumentar a flexão em até 5,6 vezes em comparação com amostras sem a adição. Esses achados sugerem a potencial aplicação desse método na pavimentação urbana, com o benefício adicional de conter a lixiviação de metais pesados.

O laboratório de Du et al. (2020a) investigou os comportamentos das microesferas de vidro como mistura para pavimentos asfálticos em termos de requisitos térmicos e de desempenho. Para avaliar o material, foi realizada uma comparação entre três agregados: microesferas de vidro, agregados calcários e agregados diabásicos, na mistura asfáltica SMA-13. As microesferas foram aplicadas à mistura nas proporções de substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, juntamente com uma proporção ideal de agregado asfáltico de 6,2%. A aplicação dos ensaios de condutividade térmica, fluência dinâmica repetida, flexão de três pontos, módulo dinâmico, fadiga e flexão semicircular revelou que o uso de microesferas de vidro foi eficaz na redução da condutividade térmica e, portanto, da temperatura do pavimento, em até 23,4%.

No entanto, Du et al. (2020a) observaram uma diminuição significativa na densidade de energia de fluxo e deformação da mistura asfáltica em pontos extremos de temperatura, com uma queda de 59,5% e 22,8%, respectivamente. Além disso, a inclusão de microesferas de vidro foi ligada a redução da resistência à carga dinâmica e o desempenho de fadiga da mistura. Portanto, embora as microesferas de vidro auxiliem no resfriamento da superfície do pavimento, elas podem contribuir para

a queda no desempenho de fluência e elasticidade da mistura e, assim, reduzir seu potencial de longevidade.

A afirmação destaca que, apesar das microesferas de vidro terem um efeito positivo no resfriamento da superfície do pavimento, elas também podem resultar em uma diminuição no desempenho de fluência e elasticidade da mistura asfáltica. Essa conclusão é baseada nos resultados do estudo de Du et al. (2020a), que observaram aspectos negativos das microesferas de vidro, como a diminuição na densidade de energia de fluxo. Essa energia é uma medida da capacidade de um material de resistir à deformação sob tensão aplicada. A redução de 59,5% na densidade de energia de fluxo indica que a mistura asfáltica se torna menos resistente à deformação quando submetida a cargas, como o tráfego de veículos. Também há redução na deformação da mistura asfáltica, que é de 22,8% na deformação da mistura e indica que a capacidade do material em se deformar e voltar ao seu formato original após a remoção da tensão aplicada diminuiu. Essa perda de elasticidade pode levar a rachaduras e falhas no pavimento. Por fim, também foi evidenciada redução da resistência à carga dinâmica e desempenho de fadiga, uma vez que a inclusão de microesferas de vidro resultou em uma menor resistência da mistura asfáltica a cargas dinâmicas (cargas que variam com o tempo), bem como um pior desempenho de fadiga. Isso significa que a mistura é menos capaz de suportar cargas repetidas, como o tráfego de veículos, aumentando o risco de falhas no pavimento. Assim, embora as microesferas de vidro possam ter benefícios em termos de resfriamento da superfície do pavimento, elas também podem comprometer a fluência e elasticidade da mistura asfáltica. Essa redução no desempenho pode, por sua vez, impactar negativamente a longevidade do pavimento.

Em Du et al. (2020b), o comportamento térmico de uma mistura asfáltica foi avaliado com a adição de microesferas de vidro em lugar do enchimento mineral, e uma aplicação de camada superior para redução da radiação solar no pavimento asfáltico. As misturas foram formuladas e preparadas usando asfalto de tamanho máximo nominal com um tamanho de partícula de 12,2 mm e asfalto modificado com SBS. Agregados graúdos de basalto com partículas entre 9,5-13,2 mm e 2,36-9,5 mm e calcário com partículas entre 0-2,36 mm foram utilizados no experimento. A densidade de Carga Mineral de Calcário (CMC) e Microesferas de Vidro (MV) foi de 2,78 g/cm3 e 0,43 g/cm3, respectivamente, e foram usadas como cargas para preparar cinco proporções diferentes de mistura de asfalto com uma razão de agregado de asfalto de 6,2%. Essas proporções incluíram uma mistura de controle com 0% de substituição e misturas subsequentes com 25%, 50%, 75% e 100% de substituição de CMC por MV. Os testes de parâmetros mecânicos foram realizados nas temperaturas de 20º C, 30º C, 40º C, 50º C e 60º

C, sendo avaliados com base no módulo de fluência e resistência à compressão. Testes de irradiação interna e avaliações de parâmetros de transferência de calor também foram realizados.

A respeito dos testes mencionados ao final do parágrafo anterior, sobre testes adicionais mencionados no estudo de Du et al. (2020b), os pesquisadores também conduziram experimentos para investigar o comportamento térmico das misturas asfálticas. Esses testes adicionais são importantes para entender como a adição de microesferas de vidro e a aplicação de uma camada superior afetam a transferência de calor e a absorção de radiação solar no pavimento asfáltico. Os testes de irradiação interna envolvem a exposição das misturas asfálticas a uma fonte de radiação controlada, como a luz solar ou outra fonte de radiação eletromagnética. Os pesquisadores medem a quantidade de energia absorvida pelas misturas e a quantidade de energia que é refletida ou transmitida de volta. Isso permite avaliar a eficácia das microesferas de vidro e da camada superior na redução da absorção de radiação solar pelas misturas asfálticas. Nas avaliações de parâmetros de transferência de calor, os testes analisam como o calor é transferido dentro das misturas asfálticas e entre o pavimento e o ambiente. Um dos objetivos desses testes é avaliar a eficiência das microesferas de vidro e da camada superior em diminuir a transferência de calor para a superfície do pavimento, reduzindo, assim, a temperatura do pavimento. As avaliações podem incluir a medição de propriedades térmicas, como condutividade térmica, difusividade térmica e capacidade térmica específica. Esses testes e avaliações complementam os testes de parâmetros mecânicos, fornecendo uma compreensão mais completa do desempenho das misturas asfálticas com microesferas de vidro e a aplicação de uma camada superior. Juntos, esses experimentos ajudam a determinar se a substituição do enchimento mineral por microesferas de vidro e a aplicação de uma camada superior são eficazes na redução da temperatura do pavimento e quais podem ser os impactos no desempenho mecânico e térmico do pavimento asfáltico.

Dessa forma, Du et al. (2020b) verificaram que a substituição de uma mistura asfáltica por microesferas de vidro reduziu sua condutividade térmica em 23,8%, enquanto sua capacidade térmica específica foi aumentada em 10,6%. Isto ocorre porque as microesferas ocas são preenchidas com gás, o que reduz seu poder condutor e reduz a densidade da mistura. Estes resultados indicam que o pavimento possui maior resistência térmica e capacidade de armazenamento de calor, levando a menos calor sendo transferido para a estrutura do pavimento e suas camadas, evitando assim ranhuras e outros problemas decorrentes de tais transferências.

A substituição de agregados tradicionais por microesferas de vidro resulta em uma redução proporcional na resistência à deformação. Além disso, o uso deste agregado alternativo reduz a absorção de calor e melhora as temperaturas gerais do asfalto, o que possibilita sulcos mais rasos em camadas intermediárias e inferiores, embora estes sulcos na camada superior possam se tornar mais profundos.

O estudo realizado por Iskender et al. (2020) investigou o uso de vidro moído como substituto de agregados naturais em pavimentos asfálticos, a fim de evitar danos causados pela água. Foram realizadas aplicações experimentais do CAP modificado com cal hidratada e polímero SBS, em combinação com partículas de dois tamanhos diferentes, como o material de preenchimento de 2mm, e diferentes proporções de adição (20%, 30% e 40%) com o uso de CAP 50/70. As amostras foram testadas usando o método AASHTO T-283 em dois grupos: o primeiro condicionado (com saturação de água entre 70% - 80% com picnômetro a vácuo) e o segundo não condicionado. Durante os testes, amostras de maior saturação foram descartadas à medida que se apresentavam. As amostras foram envoltas em filme plástico, colocadas em saco plástico contendo 10 ml de água e congeladas a -18ºC. Quando não condicionadas, foram colocadas em banho-maria a aproximadamente 60ºC por 24 horas. Quando condicionadas, foram expostas a uma temperatura de 25ºC por duas horas. Posteriormente, vários testes foram aplicados, incluindo resistência máxima à compressão e resistência à tração, bem como análises químicas.

Os resultados de Iskender et al. (2020) demonstraram que 10-15% de vidro reciclado triturado podem ser usados como um substituto apropriado para agregado fino na construção de pavimentos. O clima e as chuvas do local de aplicação devem ser levados em consideração devido à natureza hidrofílica da superfície do vidro e sua incapacidade de absorver o betume, o que pode causar danos causados pela água. Apesar disso, o material é altamente resistente à fadiga e deformações, e sua rigidez entre 20°C e 40°C garante resistência à deformação em níveis ideais. O estudo sugere que o uso de um enchimento de vidro em uma proporção de 20% fornece maior resistência à água do que uma mistura de agregado natural. No entanto, a porcentagem ideal de vidro a ser usada depende da granulometria, sendo possível maior percentual conforme a condição. Pavimentações com vidro moído apresentaram menores vazios de ar e menores teores de CAP. Os resultados do estudo sugerem que até uma adição de 15% de vidro a resistência à tração indireta do material é mantida, enquanto sua resistência aos danos causados pela água é ajustada.

Kumar et al. (2020) realizaram um estudo para examinar a estabilização de dois tipos de solo (algodão preto e franco) com a incorporação de pavimento asfáltico e resíduos de vidro reciclado triturado. A investigação empregou quatro porcentagens diferentes de RAP (30%, 50%, 55% e 65%) com a adição de 5% de vidro triturado. O vidro reciclado usado no estudo era de várias cores e composições, principalmente provenientes da produção de garrafas. Em relação ao RAP, foram utilizadas amostras abaixo de 12,5 mm e acima de 4,5 mm com densidade de 2,63. Foi realizado um estudo de estabilização para avaliar os efeitos da adição de 55% de RAP e 5% de vidro moído ao solo de algodão preto, o que resultou em uma densidade máxima aumentada de 12,52%. A proporção ótima de 65% RAP e 5% de vidro moído levou o solo a um estado muito próximo ao do vidro vermelho, com uma redução do teor de umidade ideal em 46,06%. Além disso, o ensaio de Índice de Suporte Califórnia revelou um resultado aumentado de 9,682% com a mistura 65% RAP mais 5% de vidro moído, que foi aproximadamente 3,57 vezes maior que o resultado do solo vermelho e indicou um solo mais denso após esse processo.

Kumar et al. (2020) relataram ainda que foi explorada a utilização de RAP e vidro moído para estabilização do solo em solo franco. Neste caso, foi verificado que a densidade seca máxima neste solo aumentou de 1,913 g/cm3 sem o uso de RAP e vidro moído para 2,03 g/cm3, com uma mistura de 50% de RAP e 5% de vidro, representando um aumento de 5,76% em comparação com o solo vermelho (1,99 g/cm3). Além disso, o teor de umidade ideal diminuiu de 11,885% para 4,383% quando uma mistura de 65% RAP e 5% de vidro foi usada, fato sugestivo de uma menor estabilização do solo granular. O estudo sugere que embora o RAP e o vidro moído não possuam a capacidade de se unir às partículas do solo, eles ainda são adequados para estabilização do solo em certas aplicações de médio e baixo tráfego.

O estudo realizado por Thamoorian et al. (2020) explorou a rigidez de misturas asfálticas que continham Resíduos da Construção Civil (RCC), especificamente, basalto e vidro moído. Ao longo do período de coleta de 12 meses, a análise da composição das amostras de RCC revelou que o vidro e o basalto constituíam cerca de 19% do material. Os resultados demonstraram que, quando a composição da mistura era de 10% com um teor de betume ótimo de 5,4%, o produto resultante tinha resistência aumentada e capacidade compressiva superior em comparação com um agregado sem vidro. Essas conclusões também foram apoiadas quando o hidróxido de cálcio foi adicionado como enchimento, proporcionando maior durabilidade, controle de risco de decapagem, resiliência ideal e adesão aprimorada entre o RCC e o aglutinante.

Em estudo realizado por You et al. (2020), foi avaliado o desempenho da lixiviação de misturas asfálticas contendo vidro proveniente de tubos de raios catódicos reciclados. O vidro foi utilizado como substituto de agregados comuns de 4,75 mm de tamanho, em proporção de 21,5%. Para melhorar a resistência à umidade, o pó de cal nano-hidratado foi incorporado em uma composição de 90% de hidróxido de cálcio, 3% de carbonato de cálcio, 1,5% de dióxido de silício e 1,2% de óxido de cálcio, com um padrão de 100 nm e formato de quartzo polimorfo cúbico e densidades de 12,4 g/cm3 e 2,24 g/cm3, respectivamente. Foram realizados testes de condicionamento de umidade, rachaduras em baixa temperatura, testes de desempenho em alta temperatura, testes de lixiviação e testes de desempenho em estrada.

Os resultados do estudo de You et al. (2020) indicaram vários pontos de interesse, particularmente a perspectiva ambiental, que foi destacada pelo potencial de alta lixiviação de chumbo no produto resultante. Embora seja inconclusivo se esta é uma consequência irreversível, é possível evitar temperaturas extremas na mistura de asfalto para limitar a liberação de chumbo. Verificou-se que o material era viável na proporção de 21,5% de substituição com a adição de nano cal em pó. O risco de lixiviação é contido pelo revestimento completo com asfalto de petróleo diluído, formando uma barreira que impede o contato do vidro com o meio. Apesar disso, o desempenho das misturas asfálticas é comprometido ao usar esse agregado; no entanto, a nano cal pode mitigar esse problema, com maior durabilidade e resistência à temperatura.

O estudo realizado por Abdulamer et al. (2021) enfocou aspectos térmicos e não forneceu informações metodológicas adequadas para permitir uma discussão aprofundada da influência de proporções variáveis de vidro fosco como um pequeno agregado. Os resultados mostraram que o uso de tais agregados é encorajador, particularmente em relação à radiação solar e seu efeito no pavimento e na composição do material resultante. Ainda, foi sugerido que misturas de base de 10%-15% de vidro moído foram capazes de fornecer boa proteção contra a radiação solar e reduzir a dissipação de calor.

Udomchai et al. (2021) examinaram o potencial de uma equação de resistência ao cisalhamento para interfaces de pavimento asfáltico recuperadas com geogrelhas. A moagem a frio foi usada para obter amostras com teor de betume de 3-5% em peso. Além disso, foram desenvolvidas geogrelhas manuais para determinar a sustentabilidade da recuperação do asfalto. Os autores enfatizaram o potencial de utilizar materiais alternativos e ecológicos para suporte de cisalhamento e tensão, no entanto, uma avaliação abrangente de seu fluxo e necessidade de uso é vital para determinar se o material proposto

é adequado para a tarefa. Características como tamanho de partícula, morfologia, elementos e estabilidade mecânica devem ser levadas em consideração para qualquer material ecológico, sendo que uma análise aprofundada do desempenho torna essencial para sua aplicação adequada.

Cheng et al. (2021) avaliaram o efeito do uso de agregado de vidro residual no desempenho do microrrevestimento asfáltico tipo III. O estudo foi conduzido de acordo com a norma ASTM D6372, tendo como agregados basalto e resíduos de vidro, sendo o vidro composto principalmente por dióxido de silício e outras toxinas, na forma de vidro residual proveniente de fábricas de beneficiamento. As frações de tamanho agregado utilizadas foram 0-2,36 mm, 2,36-4,75 mm e 4,75-9,5 mm. Pesquisas anteriores dos mesmos autores indicaram que as partículas de vidro com um tamanho de 0-2,36 mm não apresentaram boa adesão e requerem uma maior entrada de energia para o processamento. Portanto, para este estudo, foram utilizadas apenas partículas de 2,36-4,5 mm e 4,75-9,5 mm. A taxa de substituição de basalto do vidro testado foi de 5%, 10%, 15% e 20% da mistura total. Foram realizados testes de morfologia agregada, decapagem, abrasão, carregamento e resistência ao deslizamento do microrrevestimento.

O estudo de Cheng et al. (2021) demonstrou que os resíduos de vidro reciclado possuem uma morfologia irregular e abundante em relação ao basalto, sendo que este último apresenta bordas mais nítidas. Testes mostraram que o vidro pode reduzir a resistência a danos causados pela água, independentemente do seu tamanho. Apesar desse potencial, o desempenho geral do material ainda cumpriu os parâmetros estabelecidos pela International Slurry Surfacing Association (ISSA). Especificamente, quando a proporção de vidro residual estava em 20%, uma redução de sulcos de 74% foi observada em média, indicando que as proporções ideais para este fim seriam entre 15% de vidro fino ou 10% de vidro grosso para manter um desempenho mecânico satisfatório. A incorporação de resíduos de vidro pode aumentar a resistência à derrapagem, particularmente de partículas finas com uma forma bidimensional, que é mais passível de formar asperezas na superfície das misturas preparadas.

Em conclusão, a literatura analisada demonstra que o vidro reciclado moído e outros tipos de vidro têm potencial significativo como material de construção sustentável e alternativo. Estudos como os de Afonso et al. (2016) e George e Anochie-Boateng (2016) destacam o desempenho promissor de agregados de vidro moído em pavimentos semirrígidos e na recuperação de pavimentos, enquanto Issa (2016) e Lachance-Tremblay et al. (2017) avaliam os efeitos de adição de vidro moído em misturas

de betume. Ferrão e Moizinho (2017) exploram o uso de preenchedores não convencionais em HMA, e Bilondi, Toufigh e Toufigh (2018) investigam o uso de geopolímero à base de pó de vidro reciclado na estabilização de solos argilosos. Sanji et al. (2019) abordam o uso de vidro modificado por Zycotherm em misturas de asfalto quente.

Os resultados desses estudos indicam que o uso de vidro moído e reciclado em pavimentos e infraestruturas de transporte é viável e pode atender aos regulamentos e padrões vigentes. Além disso, a aplicação desses materiais oferece benefícios ambientais e econômicos, reduzindo a quantidade de vidro descartado em aterros sanitários e diminuindo a demanda por agregados naturais. No entanto, é importante considerar os desafios e limitações associados a esses materiais, como os efeitos negativos de baixas temperaturas e a necessidade de proporções adequadas de aditivos e betume. Ao abordar essas questões, o uso de vidro reciclado pode continuar a evoluir como uma opção sustentável e eficiente para a indústria da construção.

Em conclusão, os estudos apresentados demonstram o potencial do vidro moído e das microesferas de vidro como substitutos de agregados e enchimentos convencionais em pavimentos asfálticos. Os achados de Simone et al. (2019) e Vincent, Criado e García-Ten (2019) sugerem que o uso de vidro moído pode resultar em menores vazios de ar, maior rigidez do ligante e aumento da capacidade de carga e resistência a deformações permanentes. No entanto, Du et al. (2020a) e (2020b) apontam que a adição de microesferas de vidro pode levar à diminuição do desempenho de fluência e elasticidade da mistura asfáltica, afetando potencialmente a longevidade do pavimento. Apesar disso, a redução da condutividade térmica e a melhoria das temperaturas gerais do asfalto com a adição de microesferas de vidro são aspectos positivos que não podem ser ignorados.

É importante considerar os benefícios e as limitações desses materiais alternativos ao avaliar sua aplicação em pavimentos asfálticos. Além disso, pesquisas futuras podem se concentrar em otimizar a proporção e a combinação de vidro moído e microesferas de vidro com agregados convencionais, a fim de alcançar o equilíbrio ideal entre desempenho mecânico, térmico e ambiental. Dessa forma, será possível desenvolver soluções mais sustentáveis e eficientes para a construção de pavimentos, ao mesmo tempo em que se promove a reutilização de materiais descartados, como o vidro.

Os resultados de Iskender et al. (2020) demonstraram que 10-15% de vidro reciclado triturado podem ser usados como um substituto apropriado para agregado fino na construção de pavimentos. O clima e as chuvas do local de aplicação devem ser levados em consideração devido à natureza hidrofílica da

superfície do vidro e sua incapacidade de absorver o betume, o que pode causar danos causados pela água. Apesar disso, o material é altamente resistente à fadiga e deformações, e sua rigidez entre 20°C e 40°C garante resistência à deformação em níveis ideais. O estudo sugere que o uso de um enchimento de vidro em uma proporção de 20% fornece maior resistência à água do que uma mistura de agregado natural. No entanto, a porcentagem ideal de vidro a ser usada depende da granulometria, sendo possível maior percentual conforme a condição. Pavimentações com vidro moído apresentaram menores vazios de ar e menores teores de CAP. Os resultados do estudo sugerem que até uma adição de 15% de vidro a resistência à tração indireta do material é mantida, enquanto sua resistência aos danos causados pela água é ajustada.

Kumar et al. (2020) realizaram um estudo para examinar a estabilização de dois tipos de solo (algodão preto e franco) com a incorporação de pavimento asfáltico e resíduos de vidro reciclado triturado. A investigação empregou quatro porcentagens diferentes de RAP (30%, 50%, 55% e 65%) com a adição de 5% de vidro triturado. O vidro reciclado usado no estudo era de várias cores e composições, principalmente provenientes da produção de garrafas. Em relação ao RAP, foram utilizadas amostras abaixo de 12,5 mm e acima de 4,5 mm com densidade de 2,63. Foi realizado um estudo de estabilização para avaliar os efeitos da adição de 55% de RAP e 5% de vidro moído ao solo de algodão preto, o que resultou em uma densidade máxima aumentada de 12,52%. A proporção ótima de 65% RAP e 5% de vidro moído levou o solo a um estado muito próximo ao do vidro vermelho, com uma redução do teor de umidade ideal em 46,06%. Além disso, o ensaio de Índice de Suporte Califórnia revelou um resultado aumentado de 9,682% com a mistura 65% RAP mais 5% de vidro moído, que foi aproximadamente 3,57 vezes maior que o resultado do solo vermelho e indicou um solo mais denso após esse processo. Ainda Kumar et al. (2020) relataram que foi explorada a utilização de RAP e vidro moído para estabilização do solo em solo franco. Neste caso, foi verificado que a densidade seca máxima neste solo aumentou de 1,913 g/cm3 sem o uso de RAP e vidro moído para 2,03 g/cm3, com uma mistura de 50% de RAP e 5% de vidro, representando um aumento de 5,76% em comparação com o solo vermelho (1,99 g/cm3). Além disso, o teor de umidade ideal diminuiu de 11,885% para 4,383% quando uma mistura de 65% RAP e 5% de vidro foi usada, fato sugestivo de uma menor estabilização do solo granular. O estudo sugere que embora o RAP e o vidro moído não possuam a capacidade de se unir às partículas do solo, eles ainda são adequados para estabilização do solo em certas aplicações de médio e baixo tráfego.

O estudo realizado por Thamoorian et al. (2020) explorou a rigidez de misturas asfálticas que continham RCC, especificamente, basalto e vidro moído. Ao longo do período de coleta de 12 meses, a análise da composição das amostras de RCC revelou que o vidro e o basalto constituíam cerca de 19% do material. Os resultados demonstraram que, quando a composição da mistura era de 10% com um teor de betume ótimo de 5,4%, o produto resultante tinha resistência aumentada e capacidade compressiva superior em comparação com um agregado sem vidro. Essas conclusões também foram apoiadas quando o hidróxido de cálcio foi adicionado como enchimento, proporcionando maior durabilidade, controle de risco de decapagem, resiliência ideal e adesão aprimorada entre o RCC e o aglutinante.

Em estudo realizado por You et al. (2020), foi avaliado o desempenho da lixiviação de misturas asfálticas contendo vidro proveniente de tubos de raios catódicos reciclados. O vidro foi utilizado como substituto de agregados comuns de 4,75 mm de tamanho, em proporção de 21,5%. Para melhorar a resistência à umidade, o pó de cal nano-hidratado foi incorporado em uma composição de 90% de hidróxido de cálcio, 3% de carbonato de cálcio, 1,5% de dióxido de silício e 1,2% de óxido de cálcio, com um padrão de 100 nm e formato de quartzo polimorfo cúbico e densidades de 12,4 g/cm3 e 2,24 g/cm3, respectivamente. Foram realizados testes de condicionamento de umidade, rachaduras em baixa temperatura, testes de desempenho em alta temperatura, testes de lixiviação e testes de desempenho em estrada.

Os resultados do estudo de You et al. (2020) indicaram vários pontos de interesse, particularmente a perspectiva ambiental, que foi destacada pelo potencial de alta lixiviação de chumbo no produto resultante. Embora seja inconclusivo se esta é uma consequência irreversível, é possível evitar temperaturas extremas na mistura de asfalto para limitar a liberação de chumbo. Verificou-se que o material era viável na proporção de 21,5% de substituição com a adição de nano cal em pó. O risco de lixiviação é contido pelo revestimento completo com asfalto de petróleo diluído, formando uma barreira que impede o contato do vidro com o meio. Apesar disso, o desempenho das misturas asfálticas é comprometido ao usar esse agregado; no entanto, a nano cal pode mitigar esse problema, com maior durabilidade e resistência à temperatura.

O estudo realizado por Abdulamer et al. (2021) enfocou aspectos térmicos e não forneceu informações metodológicas adequadas para permitir uma discussão aprofundada da influência de proporções variáveis de vidro fosco como um pequeno agregado. Os resultados mostraram que o uso de tais

agregados é encorajador, particularmente em relação à radiação solar e seu efeito no pavimento e na composição do material resultante. Ainda, foi sugerido que misturas de base de 10%-15% de vidro moído foram capazes de fornecer boa proteção contra a radiação solar e reduzir a dissipação de calor.

Udomchai et al. (2021) examinaram o potencial de uma equação de resistência ao cisalhamento para interfaces de pavimento asfáltico recuperadas com geogrelhas. A moagem a frio foi usada para obter amostras com teor de betume de 3-5% em peso. Além disso, foram desenvolvidas geogrelhas manuais para determinar a sustentabilidade da recuperação do asfalto. Os autores enfatizaram o potencial de utilizar materiais alternativos e ecológicos para suporte de cisalhamento e tensão, no entanto, uma avaliação abrangente de seu fluxo e necessidade de uso é vital para determinar se o material proposto é adequado para a tarefa. Características como tamanho de partícula, morfologia, elementos e estabilidade mecânica devem ser levadas em consideração para qualquer material ecológico, sendo que uma análise aprofundada do desempenho torna essencial para sua aplicação adequada.

Cheng et al. (2021) avaliaram o efeito do uso de agregado de vidro residual no desempenho do microrrevestimento asfáltico tipo III. O estudo foi conduzido de acordo com a norma ASTM D6372, tendo como agregados basalto e resíduos de vidro, sendo o vidro composto principalmente por dióxido de silício e outras toxinas, na forma de vidro residual proveniente de fábricas de beneficiamento. As frações de tamanho agregado utilizadas foram 0-2,36 mm, 2,36-4,75 mm e 4,75-9,5 mm. Pesquisas anteriores dos mesmos autores indicaram que as partículas de vidro com um tamanho de 0-2,36 mm não apresentaram boa adesão e requerem uma maior entrada de energia para o processamento. Portanto, para este estudo, foram utilizadas apenas partículas de 2,36-4,5 mm e 4,75-9,5 mm. A taxa de substituição de basalto do vidro testado foi de 5%, 10%, 15% e 20% da mistura total. Foram realizados testes de morfologia agregada, decapagem, abrasão, carregamento e resistência ao deslizamento do microrrevestimento.

O estudo de Cheng et al. (2021) demonstrou que os resíduos de vidro reciclado possuem uma morfologia irregular e abundante em relação ao basalto, sendo que este último apresenta bordas mais nítidas. Testes mostraram que o vidro pode reduzir a resistência a danos causados pela água, independentemente do seu tamanho. Apesar desse potencial, o desempenho geral do material ainda cumpriu os parâmetros estabelecidos pela ISSA. Especificamente, quando a proporção de vidro residual estava em 20%, uma redução de sulcos de 74% foi observada em média, indicando que as proporções ideais para este fim seriam entre 15% de vidro fino ou 10% de vidro grosso para manter

um desempenho mecânico satisfatório. A incorporação de resíduos de vidro pode aumentar a resistência à derrapagem, particularmente de partículas finas com uma forma bidimensional, que é mais passível de formar asperezas na superfície das misturas preparadas.

Em conclusão, parte representativa da literatura consultada demonstra que o uso de vidro reciclado triturado e outros resíduos na construção de pavimentos é uma alternativa viável e ambientalmente responsável. As pesquisas de Iskender et al. (2020) e Cheng et al. (2021) indicam que a adição de vidro reciclado como substituto do agregado fino pode melhorar a resistência à fadiga e deformação e aumentar a resistência à derrapagem. Contudo, é determinante considerar as condições climáticas e a granulometria do vidro. Kumar et al. (2020) e Thamoorian et al. (2020) destacam a possibilidade de utilizar vidro moído e RAP para estabilização do solo em aplicações de médio e baixo tráfego e melhorar o desempenho de misturas asfálticas com RCC. O estudo de You et al. (2020) levanta preocupações ambientais sobre a lixiviação de chumbo, mas propõe soluções como a adição de nano cal em pó. Abdulamer et al. (2021) e Udomchai et al. (2021) abordam o potencial de uso de vidro moído na proteção contra radiação solar e na resistência ao cisalhamento, respectivamente. A partir dessas informações, mostra-se importante realizar análises aprofundadas do desempenho desses materiais e das condições específicas de cada aplicação para garantir a eficácia e a segurança dos pavimentos construídos com resíduos reciclados.

4.1 BENEFÍCIOS FÍSICOS DA INCLUSÃO DO VIDRO MOÍDO NA MISTURA ASFÁLTICA

O primeiro questionamento foi sobre os benefícios físicos na inclusão do vidro moído na mistura asfáltica. O vidro moído em misturas asfálticas pode oferecer uma gama de benefícios físicos, como afirmado por Afonso et al. (2019). Esses benefícios incluem melhor desempenho mecânico, viável para uso rodoviário e aeroportuário e cumprimento de padrões. Bilondi, Toufigh e Toufigh (2018) observaram um aumento na resistência à compressão não confinada, particularmente quando tempos de cura mais longos são incorporados. O uso de vidro moído também é benéfico para o meio ambiente, como destacado pelos autores. Vincent, Criado e García-Ten (2019) sugeriram que o vidro moído pode ser usado como alternativa para melhorar a flexão em pavimentos, devido ao teor de sílica que fornecem.

Em mesmo sentido, a literatura revisada indicou que o vidro moído é eficaz para pavimentação e estabilização do solo, oferecendo excelente resistência à fadiga e deformação, conforme a mistura

utilizada. Iskender et al. (2020) destacaram o potencial desse material, observando que ele pode conferir maior resistência à água e tração indireta do material. No contexto da estabilização do solo, Kumar et al. (2020) enfatizaram que o vidro moído não é adesivo às partículas do solo, podendo ainda estabilizar e ser utilizado em ambientes de médio e baixo tráfego. Além disso, Thamoorian et al. (2020) sugeriram que o vidro moído, quando usado na proporção correta com um teor de CAP ajustada para os melhores resultados, pode criar uma mistura que é mais eficiente e funcional do que aquelas misturas que não incluem vidro moído.

Os benefícios seriam ainda voltados a menor risco de decapagem e ótima resiliência. Sobre isso, o estudo de Abdulamer et al. (2021) sugeriu que a incorporação de vidro moído na pavimentação asfáltica pode proporcionar melhor desempenho do pavimento e redução da dissipação de calor sob radiação solar, além de menor risco de decapagem e aumento da resiliência.

Os efeitos do uso de vidro moído em uma mistura asfáltica foram destacados por Udomchai et al. (2021) e Cheng et al. (2021), que enfatizaram seu potencial para reduzir derrapagens com partículas finas e morfologia 2D complexa. Embora os benefícios físicos sejam reconhecidos, George e Anochie-Boateng (2016) postularam que o maior benefício está no ganho ambiental, pois evita se tornar material de aterro. Issa (2016) sugeriu adicionalmente que, com proporções apropriadas de mistura, esses agregados podem reduzir os vazios de ar, ao mesmo tempo em que proporcionam desempenho comparável aos materiais tradicionais sem um aumento significativo no desempenho.

Lachance-Tremblay et al. (2017) avaliaram a eficácia do vidro moído quando submetido a temperaturas extremas e pontos de congelamento. Os autores identificaram que, quando exposta a baixas temperaturas, a água presa dentro da mistura com esse agregado pode causar um aumento na temperatura abaixo do ponto de congelamento e, consequentemente, levar à deterioração mais rápida do material. No entanto, a taxa de degradação estabiliza após um certo número de ciclos de congelamento. Du et al. (2020a) complementaram essa abordagem, com a indicação de que o vidro moído deve ser usado com cautela em temperaturas extremas altas e baixas, especialmente quando as microesferas estão presentes.

Assim, embora as microesferas de vidro possam resfriar o pavimento, elas causam maior deformação e menor longevidade, bem como menor fluência e elasticidade na mistura. Além disso, Du et al. (2020b) determinaram que as microesferas de vidro podem reduzir a condutividade térmica de

misturas de asfalto e o potencial condutor; no entanto, um aumento na substituição leva a uma diminuição na resistência à deformação.

Ferrão e Moizinho (2017) destacaram o potencial do vidro moído como agregado em pavimentos para proporcionar bom desempenho em temperaturas mais baixas devido ao seu IST negativo, tornando-se assim um substituto adequado para o cimento Portland com maior benefício ambiental. No entanto, para climas mais quentes, não houve melhora significativa. Sanji et al. (2019) sugeriram que o desempenho do agregado de vidro moído na aplicação do pavimento pode ser potencializado pela incorporação de materiais que equilibrem sua resistência, como o Zycotherm, o que pode melhorar a aderência e a elasticidade.

Simone et al. (2019) ressaltaram o potencial dos materiais para melhorar o desempenho e a longevidade, especificamente o ligante asfáltico. Além disso, também foi observado que o polímero SBS poderia ser utilizado para aumentar a reação de tensão de cisalhamento elástico. You et al. (2020) destacaram a necessidade de investigação ecológica dos substratos, mas sugeriram que as potenciais diminuições nas misturas asfálticas com vidro moído podem ser remediadas utilizando produtos específicos, como nano cal, que reforçam a resistência à alta temperatura e corrosão.

É possível afirmar que, em geral, os autores não sugerem que o vidro moído cause um pior desempenho do material do que o esperado pelas normas internacionais. No entanto, a eficácia desta alternativa e a variedade a ser utilizada dependem da avaliação do pavimento e podem ser otimizadas, em termos de desempenho, através da adição de aditivos e outros tipos de melhoradores para remediar possíveis fragilidades.

Em conclusão, a inclusão do vidro moído em misturas asfálticas apresenta diversos benefícios físicos e ambientais, e tais benefícios englobam melhor desempenho mecânico, viabilidade para uso rodoviário e aeroportuário, cumprimento de padrões e redução do impacto ambiental. No entanto, é importante considerar as limitações do material em temperaturas extremas e buscar formas de otimizar seu desempenho através da utilização de aditivos e melhoradores. A eficácia do vidro moído como agregado depende da avaliação adequada do pavimento e das condições específicas do projeto. Ao equilibrar esses fatores, o vidro moído pode ser uma alternativa promissora e sustentável para a construção e manutenção de pavimentos, atendendo aos padrões internacionais e contribuindo para a preservação do meio ambiente.

4.2 PROPORÇÃO IDEAL DE VIDRO MOÍDO PARA A MISTURA ASFÁLTICA

Sobre a proporção ideal de uso do vidro moído, este tópico traz a discussão dos autores consultados que, de forma específica, abordaram este tema. O estudo de Kumar et al. (2020) sobre estabilização do solo sugeriu uma quantidade máxima de 1,913 g/cm3 sem o uso do RAP e vidro moído e 2,03 g/cm3 com 50% do RAP e 5% de vidro, indicando um limite de diminuição de benefícios. Simone et al. (2019) demonstraram ainda que uma substituição de 7% em misturas asfálticas foi suficiente para observar melhorias na capacidade de carga e resistência a deformações permanentes, fornecendo assim uma visão sobre a proporção ideal de uso de vidro moído.

George e Anochie-Boateng (2016) identificaram que a proporção mais comum para o uso de vidro como agregado substituto em misturas asfálticas varia de 10% a 15%, pois oferece sustentabilidade econômica e compatibilidade com os agregados tradicionais. No entanto, Issa (2016) observou que o desempenho e os benefícios estruturais do vidro não se apresentaram mais em misturas asfálticas quando a proporção excede 10%. Posteriormente, Thamoorian et al. (2020) concluíram que o uso de um agregado de vidro a 10% com 5,4% de CAP produz uma mistura de resistência superior e capacidade de compressão. Por sua vez, Sanji et al. (2019) também constataram que a proporção ideal de 10% de vidro mais Zycotherm resulta em desempenho satisfatório.

Na mesma linha, Ferrão e Moizinho (2017) relataram resultados mais positivos com base no uso de vidro moído como enchimento em mistura asfáltica de 10% em proporção de peso. Bilondi, Toufigh e Toufigh (2018) inferiram em seu estudo que um maior desempenho foi alcançado com uma mistura de 15%, o que poderia ser visto como a faixa ideal para maior resistência à compressão não confinada. Esta faixa (10-15%) foi apoiada por Abdulamer et al. (2021) em relação ao uso de vidro moído em misturas asfálticas para pavimentação, pois poderia proporcionar bons resultados em termos de proteção solar e dissipação térmica. De forma semelhante, Cheng et al. (2021) concluíram que em termos de morfologia e desempenho, uma faixa de 15% de vidro fino ou 10% de vidro grosso poderia ser uma porcentagem apropriada para melhorar o desempenho de misturas de asfalto com tal adição.

Iskender et al. (2020) observaram que a incorporação de 20% de vidro moído em revestimentos asfálticos poderia melhorar a resistência em comparação com misturas sem esse material. You et al. (2020) destacaram ainda que o vidro de tubo de raios catódicos reciclado poderia servir como enchimento em até 21,5%, juntamente com nano cal, para mitigar possíveis fragilidades eventuais deste material.

Du et al. (2020a) observaram em seu estudo uma proporção de 25% de vidro moído reciclado como agregado no substrato, e isso resultou em uma diminuição na longevidade e deformabilidade do material. No entanto, é essencial considerar que o material examinado neste estudo foram microesferas de vidro, que podem demonstrar uma resposta diferente quando comparadas ao vidro moído reciclado. Du et al. (2020b) mediram a mesma porcentagem de substrato e demonstraram resultados semelhantes; no entanto, ambos os estudos constataram que a condutividade térmica e a transferência de calor do pavimento foram potencializadas pelo uso do substrato.

Em seu estudo, Afonso et al. (2016) sugeriram que uma adição de 30% de vidro moído a argamassas cimentícias poderia proporcionar um desempenho satisfatório quando usado com pavimentos semiflexíveis. No entanto, mais pesquisas podem ser necessárias para determinar se uma porcentagem maior de vidro moído seria benéfica. Lachance-Tremblay et al. (2017) exploraram a adição de vidro como um substituto agregado com até 20%, mas notaram uma diminuição no desempenho quando expostos a ciclos de congelamento e descongelamento.

Vincent, Criado e García-Ten (2019) não abordaram essa questão. Da mesma forma, Udomchai et al. (2021) não forneceram uma exploração aprofundada do tema. Portanto, a proporção de vidro moído usado como agregado em misturas asfálticas pode variar, embora uma faixa mais consistente seja de 10% a 15%.

Em suma, a proporção ideal de vidro moído utilizado como agregado em misturas asfálticas varia de acordo com os estudos analisados, mas a faixa mais comumente sugerida é de 10% a 15%. Essa proporção parece oferecer um equilíbrio entre sustentabilidade econômica, compatibilidade com agregados tradicionais e benefícios estruturais, como maior resistência e capacidade de carga. No entanto, é importante considerar que fatores específicos do projeto e condições ambientais podem influenciar a proporção ideal. Mais pesquisas podem ser necessárias para determinar o desempenho e a viabilidade do vidro moído em diferentes cenários e proporções. O uso consciente e adequado do vidro moído em misturas asfálticas tem o potencial de melhorar o desempenho das pavimentações e contribuir para a sustentabilidade ambiental e econômica.

4.3 VIABILIDADE ECONÔMICA

A maioria dos estudos consultados nesta revisão bibliográfica não abordou a viabilidade econômica, com exceção de George e Anochie-Boateng (2016), que destacaram objetivamente sua dependência

de condições gerais como granulação, disponibilidade, transporte e correções ao material. Afonso et al. (2016) mostraram que a substituição de agregados tradicionais pode reduzir significativamente os custos de trabalho, particularmente se a acessibilidade for aumentada.

Lachance-Tremblay et al. (2017) e Sanji et al. (2019) apresentaram alternativas que melhoram o desempenho do material, mas devem ser avaliadas levando em consideração critérios de custo e comparação. De acordo com Bilondi, Toufigh e Toufigh (2018), a economia deve ser avaliada com base no acesso ao substrato tradicional e ao substituto, bem como os custos gerais e ambientais que poderiam potencialmente alterar a análise de custo final.

Em resumo, a revisão bibliográfica realizada revelou que a viabilidade econômica da substituição de agregados tradicionais ainda não é amplamente discutida na literatura. No entanto, é possível identificar a importância de fatores como granulação, disponibilidade e transporte do material. Ainda, a substituição pode resultar em redução significativa nos custos de trabalho, principalmente se a acessibilidade for aumentada. Alternativas que utilizem esse recurso devem ser avaliadas em termos de custos e a a economia deve ser analisada considerando tanto os custos tradicionais quanto os custos ambientais. Portanto, é fundamental avaliar cuidadosamente a viabilidade econômica da substituição de agregados tradicionais para garantir que a solução adotada seja viável e sustentável a longo prazo

4.4 BENEFÍCIOS / GANHOS AMBIENTAIS DO USO DO VIDRO MOÍDO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Os aspectos ambientais não foram tratados por uma significativa quantidade de autores. George e Anochie-Boateng (2016) destacaram que a sustentabilidade do vidro moído decorre da demanda mínima por recursos finitos e à falta de componentes contaminantes, como sujeira e metais tóxicos, na maioria dos casos.

No entanto, isso foi limitado ao vidro reciclado da fábrica e ao vidro do para-brisa e não pode ser aplicado a itens como lâmpadas fluorescentes e afins. Udomchai et al. (2021) ressaltaram que os recursos ecologicamente corretos devem ser utilizados sempre que possível, destacando que isso evita a geração de novos resíduos e reduz a pressão sobre o meio ambiente.

De acordo com Vincent, Criado e García-Tem (2019) e You et al. (2020), o uso de materiais alternativos como lâmpadas fluorescentes e vidro de tubo de raios catódicos reciclados tem potencial para lixiviar chumbo. Portanto, é imprescindível o controle no uso de temperaturas extremas para evitar a liberação

do metal, e cobertura total por asfalto diluído para evitar contaminação do solo e de outras áreas por metais pesados. Portanto, o uso de vidro reciclado de para-brisas, fábricas de vidro e resíduos regulares é mais ambientalmente viável, embora novos avanços nesse uso possam ser realizados com maior conhecimento científico e consistência de alternativas substitutas.

A partir das observações ainda de Vincent, Criado e García-Tem (2019) e ponderações de Yout et al. (2020), a lixiviação ocorre quando substâncias dissolvidas são transportadas pela água que passa através do material. No caso do vidro reciclado que contém metais pesados, como lâmpadas fluorescentes e vidro de tubo de raios catódicos, existe o risco de que o chumbo presente no vidro lixivie para o solo, a água ou outras áreas, causando contaminação e possíveis danos à saúde humana e ao meio ambiente. Para minimizar esse risco, é importante adotar medidas de controle, como evitar o uso de temperaturas extremas: A lixiviação de metais pode ser acentuada em condições de temperatura elevada. Portanto, controlar a temperatura durante o processamento e a utilização desses vidros é crucial para reduzir a liberação de metais pesados. Também é indicado uso de cobertura total por asfalto diluído, uma vez que usar vidro reciclado em misturas asfálticas, garantir que os materiais de vidro estejam completamente encapsulados pelo asfalto pode ajudar a evitar a contaminação do solo e de outras áreas por metais pesados. Por fim, evita essa condição ainda o uso de vidro reciclado de fontes mais seguras: optar por vidro reciclado de para-brisas, fábricas de vidro e resíduos regulares pode ser mais ambientalmente viável, pois esses tipos de vidro geralmente contêm menores concentrações de metais tóxicos.

A esse respeito cabe considerar que o desenvolvimento de alternativas substitutas e avanços científicos. Com um maior conhecimento científico e aprimoramento das tecnologias, é possível desenvolver alternativas mais seguras e eficientes para a utilização de vidro reciclado, reduzindo ainda mais o risco de contaminação por metais pesados. Com isso, é importante gerenciar adequadamente os riscos associados ao uso de vidro reciclado contendo metais potencialmente tóxicos, adotando medidas de controle e buscando soluções mais seguras e sustentáveis.

Em conclusão, a utilização de materiais alternativos como vidro reciclado pode oferecer benefícios ambientais significativos, reduzindo a demanda por recursos finitos e diminuindo a geração de resíduos. No entanto, é importante considerar cuidadosamente os riscos associados ao uso de vidro reciclado que contém metais pesados, como lâmpadas fluorescentes e vidro de tubo de raios catódicos, que podem lixiviar para o solo, a água ou outras áreas, causando contaminação e possíveis

danos à saúde humana e ao meio ambiente. Para minimizar esses riscos, é necessário adotar medidas de controle, como evitar temperaturas extremas e usar cobertura total por asfalto diluído para encapsular completamente os materiais de vidro. Além disso, é importante continuar aprimorando as tecnologias e desenvolver alternativas substitutas mais seguras e eficientes para a utilização de vidro reciclado. Com um gerenciamento adequado de riscos e avanços científicos, é possível maximizar os benefícios ambientais e minimizar os riscos associados ao uso de vidro reciclado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo representa uma revisão sistemática sobre a utilização do vidro moído como agregado miúdo em revestimentos asfálticos. Como limitação reside o fato da restrição à literatura acessada e não possibilidade de testagem de hipóteses adicionais a respeito dos temas ligados ao objeto. Em atendimento ao objetivo geral, foi possível avaliar que a mistura deste material pode melhorar aspectos como resistência e flexibilidade das misturas asfálticas, sendo condicionado ao percentual de mistura, que varia conforme a finalidade de uso. Assim, para as finalidades mais tradicionais, entre 10% a 15% de mistura tem sido apontado como um percentual que assegura melhores resultados, com o possível uso, em casos de alta demanda, de complementos que reduzam a vulnerabilidade do material e menor longevidade geral usualmente apresentada. Todavia, há senso de economicidade sistêmico no uso deste material, pois não somente representa a possibilidade de menor custo direto, como pode haver custos ambientais reduzidos pela menor geração de resíduos e menor impacto ao meio.

Os estudos considerados nesta pesquisa mostraram que o uso de vidro moído como agregado miúdo em pavimentações asfálticas tem sido estudado como uma alternativa sustentável e ecologicamente correta para o gerenciamento de resíduos de vidro e a redução do impacto ambiental causado pela extração de materiais naturais. No entanto, a quantidade de estudos sobre essa aplicação ainda é relativamente limitada. As propriedades mecânicas das misturas asfálticas que utilizam vidro moído como agregado miúdo podem variar, dependendo de fatores como a proporção de vidro na mistura, o tipo de vidro utilizado e as condições de processamento. Algumas pesquisas sugerem que a incorporação de vidro moído pode melhorar a resistência ao desgaste, a durabilidade e a resistência à tração das misturas asfálticas, enquanto outras indicam que pode haver uma redução na resistência à carga dinâmica e no desempenho de fadiga.

Em uma análise do que oferece a literatura consultada nesta dissertação, observa-se que o uso de vidro moído como agregado miúdo em pavimentações asfálticas pode trazer benefícios econômicos, tanto para os fabricantes de asfalto quanto para a sociedade em geral. No entanto, é importante levar em consideração alguns fatores ao analisar as implicações econômicas dessa prática. A utilização de vidro moído, que é um material reciclado, pode reduzir os custos com matéria-prima, já que ele pode substituir parcialmente os agregados naturais, como areia ou pedra britada. Isso pode resultar em economia de recursos naturais e menores custos de extração e transporte desses materiais. Além disso, tal medida pode ajudar a gerenciar os resíduos de vidro, que de outra forma seriam destinados a aterros sanitários ou outras formas de disposição final. Isso pode reduzir os custos associados à gestão de resíduos e contribuir para a preservação do meio ambiente.

Todavia, também há fatores que podem afetar negativamente a economia do uso de vidro moído em pavimentações asfálticas. Por exemplo, a preparação do vidro moído para uso como agregado miúdo pode exigir processos adicionais, como a separação de contaminantes e a moagem do material até a granulometria adequada. Esses processos adicionais podem aumentar os custos de produção. Além disso, a mistura de vidro moído com asfalto pode exigir ajustes nas técnicas e proporções de fabricação, o que pode levar a custos adicionais de pesquisa e desenvolvimento. Também é possível que a durabilidade e o desempenho das misturas asfálticas com vidro moído possam ser afetados, levando a custos adicionais de manutenção e reparo a longo prazo.

Dessa maneira, o uso de vidro moído como agregado miúdo em pavimentações asfálticas tem potencial para gerar benefícios econômicos, como a redução dos custos com matéria-prima e gestão de resíduos. No entanto, também há desafios e custos adicionais associados à sua implementação. Portanto, é importante avaliar cuidadosamente os aspectos econômicos, técnicos e ambientais antes de adotar essa prática em larga escala.

Como percepção geral do desenvolvimento deste estudo, é possível afirmar que o uso de vidro moído como agregado miúdo em pavimentações asfálticas é um tema promissor, com potencial para oferecer benefícios ambientais, econômicos e de sustentabilidade. No entanto, ainda existem áreas que precisam ser aprimoradas e discussões que devem ser realizadas para garantir a viabilidade e a eficácia dessa prática. Primeiramente, é necessário realizar mais pesquisas para compreender completamente o desempenho e a durabilidade das misturas asfálticas contendo vidro moído. Isso inclui investigar a

resistência à carga dinâmica, ao desgaste, ao envelhecimento e às variações de temperatura, bem como analisar o impacto dessas misturas na vida útil das pavimentações.

Além disso, é importante avaliar a relação entre a granulometria do vidro moído e o desempenho da mistura asfáltica, além de determinar as proporções ideais de substituição dos agregados convencionais por vidro moído para garantir a qualidade e a durabilidade do pavimento. Outro aspecto determinante é a padronização e a regulamentação do uso de vidro moído em pavimentações asfálticas. As agências reguladoras e os órgãos de normalização devem estabelecer diretrizes claras e padrões para o uso de vidro moído como agregado miúdo, garantindo a qualidade, a segurança e a durabilidade das misturas asfálticas.

Assim, a conscientização e a educação do público e dos profissionais do setor sobre os benefícios do uso de vidro moído em pavimentações asfálticas também são fundamentais. É preciso promover o diálogo entre os profissionais da indústria, os pesquisadores e as autoridades para compartilhar informações, experiências e melhores práticas. Deve-se considerar a viabilidade econômica do uso de vidro moído como agregado miúdo. Isso inclui analisar os custos de coleta, processamento e transporte do vidro moído, bem como os custos associados à pesquisa, desenvolvimento e adaptação das técnicas de produção de asfalto.

Logo, o uso de vidro moído como agregado miúdo em pavimentações asfálticas é um campo de estudo com potencial significativo. No entanto, para estudos futuros, é necessário aprofundar a pesquisa, promover o diálogo entre os interessados e garantir a viabilidade técnica, ambiental e econômica dessa prática antes de sua adoção em larga escala.

REFERÊNCIAS

ABDULAMER, D. et al. Impact of Asphalt Layer and Glass Thickness on the Thermal Storage of Pavement. In: 2021 International Conference on Communication & Information Technology (ICICT). IEEE, 2021. p. 234-239.

AFONSO, M. L. et al. Development of a semi-flexible heavy duty pavement surfacing incorporating recycled and waste aggregates–Preliminary study. Construction and Building Materials, v. 102, p. 155-161, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. ANP. Resolução ANP N° 19, de 11.07.2005 DOU 12.07.2005 republicada DOU 13.07.2005: Retificada 17.3.2006 - Dispõe sobre as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP), comercializados pelos diversos agentes econômicos em todo o território nacional. Brasília: ANP, 2006. Disponivel em: <http://www.abeda.org.br/wp-content/uploads/2018/10/resoluo-anp-n-19-de-11.7. 2005 - atualizao-das-especificaes-do-cap.pdf>. Acesso em: 28 março 2022.

ALI, M. M. Y. et al. Application of recycled glass: crushed rock blends in road pavements. Australian Geomechanics, v. 46, n. 1, p. 113-122, mar. 2011.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. Ciência e Engenharia dos materiais. São Paulo: Cengage, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. ABEDA. Manual básico de emulsões asfálticas. 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010. Disponivel em: <https://www.wbl-nkn.com.br/assets/biblioteca/manual- ema.pdf>. Acesso em: 28 março 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. Terminologia e classificação de pavimentação: NBR7207. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. Materiais betuminosos para emprego em pavimentação: NBR7208. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

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

BASU, D.; PUPPALA, A. Principles of sustainability and their applications in geotechnical engineering. 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Buenos Aires: [s.n.]. 2015. p. 162-183.

BERNIER, A.; ZOFKA, A.; YUT, I. Laboratory evaluation of rutting susceptibility of polymer-modified asphalt mixtures containing recycled pavements. Construction and Building Materials, v. 31, p. 58-66, 2012.

BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2006. Disponivel em:<https://www.wbl-nkn.com.br/assets/biblioteca/pavi-asfaltica/cap1.pdf>. Acesso em: 28 março 2022.

BILONDI, M. P.; TOUFIGH, M. M.; TOUFIGH, V. Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. Construction and building Materials, v. 170, p. 302-313, 2018.

CALLISTER, W. D. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CARRARO, J. A. H. Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito. Porto Alegre: Dissertação (mestrado) - Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 1997. Disponivel em:<http://hdl.handle.net/10183/159291>. Acesso em: 15 abril 2022.

CHENG, M. et al. Effect of waste glass aggregate on performance of asphalt micro- surfacing. Construction and Building Materials, v. 307, p. 125133, 2021.

COELHO JUNIOR, M. L. P.; ROCHA, P. H. T. Estudo preliminar de misturas asfálticas à quente utilizadas em obras de pavimentação na região metropolitana de Goiânia. 2013. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. CEMPRE. Vidro.CEMPRE, 2022. Disponível em: <https://cempre.org.br/vidro/>. Acesso em: 28 março 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. CNT. Pesquisa CNT de rodovias 2021. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2021. Disponivel em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/Pesquisa_CNT_Rodovias_2021_Web.pdf>. Acesso em: 28 março 2022.

CONSOLI, N. C. et al. Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, [online], v. 144, n. 9, p. 1-10, Set. 2018.

CRISTELO, N. Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. Braga: Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT. Manual de pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2006.

DISFANI, M. M. et al. Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications. Journal of Cleaner Production, [online], v. 20, n. 1, p. 170-179, 2012. Disponivel em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S09596526110027 45>. Acesso em: 28 março 2022.

DU, Y. et al. Laboratory investigation on thermal and road performances of asphalt mixture containing glass microsphere. Construction and Building Materials, v. 264,p. 120710, 2020a.

DU, Y. et al. Evaluation of thermal and anti-rutting behaviors of thermal resistance asphalt pavement with glass microsphere. Construction and Building Materials, v. 263, p. 120609, 2020b.

FERRÃO, W. C.; MOIZINHO, J. C. The influence of unusual materials as prospective fillers in the hot mix asphalt. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2017. p. 022067.

FOPPA, D. Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, UFRGS, 2005. Disponivel em: <http://hdl.handle.net/10183/7845>. Acesso em: 28 março 2022.

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília, v. 23, n. 1, p. 183-184, mar. 2014. Disponivel em:

<http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679- 49742014000100018>. Acesso em: 15 abril 2022.

GEORGE, T. B.; ANOCHIE-BOATENG, J. Assessment on the sustainable use of alternative construction materials as a substitute to natural aggregates. 2016. Disponível em: http://researchspace.csir.co.za/dspace/handle/10204/9153. Acesso em: 10 ago. 2022.

GODOI, L. C. et al. Utilização do ensaio de flexão sobre amostra semicircular para avaliação da propagação do trincamento em misturas com diferentes ligantes. Transportes, v. 27, n. 4, p. 159-171, 2019.

HOYOS, L. R.; PUPPALA, A. J.; ORDONEZ, C. A. Characterization of Cement-Fiber- Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates: Preliminary Investigation. Journal of Materials in Civil Engineering, [online], v. 23, n. 7, p. 977-989, Jul. 2011. Disponivel em: <https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000267>. Acesso em: 28 março 2022.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. Soil Stabilization: Principles and Practice. Melbourne: Butterworths, 1972.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. IBP. A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas. Rio de Janeiro: IBP, 2021. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/ 2021/05/2021-ebook-ibp-informacoes-basicas-sobre-materiais-asfalticos.pdf>. Acesso em: 28 março 2022.

ISAIA, G. C. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, v. 1 e 2, 2007.

ISKENDER, E. et al. Evaluation of the Effect of Glass Granule Size on Water Damage Performance of Asphalt Mixtures. Teknik Dergi, v. 31, n. 6, p. 10399- 10411, 2020.

ISSA, Y. Effect of adding crushed glass to asphalt mix. Archives of Civil Engineering, v. 62, n. 2, p. 35--44, 2016.

KALAGAEVA, K. Bitumen fumes, impacts on human health and natural environment. Reduction, prevention, and control of bitumen fumes in road construction industry. 2014. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/20366224.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

KULA, D.; TERNAUX, E. Materiology: The Creative Industry's Guide to Materials and Technologies. London: Walter de Gruyter, 2013.

KUMAR, C. R. et al. Stabilization of black cotton soil and loam soil using reclaimed asphalt pavement and waste crushed glass. Materials Today: Proceedings, v. 24, p. 379-387, 2020.

LACHANCE-TREMBLAY, É. et al. Degradation of asphalt mixtures with glass aggregates subjected to freeze-thaw cycles. Cold Regions Science and Technology, v. 141, p. 8-15, 2017.

LAW, M. C.; MACDERMID, J. Evidence-Based Rehabilitation: A Guide to Practice. 2. ed. Thorofare: Slack Incorporated, 2008.

LEITE, C. A. V. G. et al. Análise de melhoramento de solo com brita e resíduos de construção e demolição para camadas de pavimentos no estado do Ceará. Conexões-Ciência e Tecnologia, v. 10, n. 2, p. 17-23, 2015.

LEOPOLDINO, A. A. O. et al. Prevalência de lombalgia na população idosa brasileira: revisão sistemática com metanálise. Revista Brasileira de Reumatologia, v. 56, p. 258-269, 2016.

Ivo LIBERATI, A. et al. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration. Research Methods & Reporting, [online], v. 339, n. b2700, Jul. 2009. Disponivel em: <https://doi.org/10.1136/bmj.b2700>. Acesso em: 15 abril 2022.

LINDSEY, T. C. Sustainable principles: common values for achieving sustainability. Journal of Cleaner Production, [online], v. 19, n. 5, p. 561-565, Mar. 2011. Disponivel em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261000 4324>. Acesso em: 28 março 2022.

MAGALHÃES, V. C. O.; PINHEIRO, É. C. N. M.; MIRANDA, W. P. O pavimento rígido como solução construtivo de uma obra de pavimentação no distrito industrial da cidade de Manaus: estudo de caso Rigid pavement as a constructive solution for a paving work in the industrial district of the city of Manaus: case study. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 12, p. 118169-118179, 2021.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4. ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, 2004. Cap. 10, p. 471-602.

MEDINA, J. D.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos pavimentos. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005.

METWALLY, I. M. Investigations on the Performance of Concrete Made with Blended Finely Milled Waste Glass. Advances in Structural Engineering, [online], v. 10, n. 1, p. 47-53, Fev. 2007.

MOHAMMADINIA, A.; ARULRAJAH, A.; D'AMICO, A. Alkali-activation of fly ash and cement kiln dust mixtures for stabilization of demolition aggregates. Construction and Building Materials, [online], v. 186, p. 71-78, out. 2018.

NUNEZ, W. P. Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, UFRGS, 1991. Disponivel em: <http://hdl.handle.net/10183/151325>. Acesso em: 28 março 2022.

OLIVEIRA, J. W. de; OLIVEIRA, B. D. de. Identificação de patologias de pagimentação asfáltica de um trecho BR-421 do quilômetro 47 ao 51 do município de Monte Negro – RO. 2021. Disponível em: https://repositorio.faema.edu.br/handle/123456789/3109. Acesso em: 10 ago. 2022.

ORETO, C. et al. Investigating the environmental impacts and engineering performance of road asphalt pavement mixtures made up of jet grouting waste and reclaimed asphalt pavement. Environmental Research, v. 198, p. 111277, 2021.

PACHECO, R. F. R. Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer. 2017. Tese de Doutorado. Universidade

de São Paulo. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-28112017-082247/en.php. Acesso em: 11 ago. 2022.

PEREIRA, A. G.; SILVA, R. L.; VIEIRA, C. da S. Ligantes asfálticos modificados: Uma análise bibliográfica. Research, Society and Development, v. 10, n. 4, p. e35710414321-e35710414321, 2021.

PETRUCCI, E. G. R. Materiais de construção. 8. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987.

PETTICREW, M. Systematic reviews from astronomy to zoology: myths and misconceptions. BMJ (Clinical research ed.), [online], v. 322, n. 7278, p. 98-101, Jan. 2001. Disponivel em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/ PMC1119390/>. Acesso em: 15 abril 2022.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002.

PIRES, G. M. Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos. Santa Maria: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSM, 2014.

ROBERTS, F. L. et al. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design & Construction. Greenbelt: Natl Asphalt Pavement Assn, 1998.

ROUSE, C. G. Vidro. In: VILHENA, A. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 4. ed. São Paulo: CEMPRE, 2000. Cap. V. Disponivel em: <https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo_Municipal_2018.pdf>. Acesso em: 28 março 2022.

SALDANHA, R. B. et al. Physical-mineralogical-chemical characterization of carbide lime: An environment-friendly chemical additive for soil stabilization. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 30, n. 6, p. 06018004, 2018.

SALES, F. A. Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda- cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compóstos de cimento Portland. Belo Horizonte: Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, UFMG, 2014. Disponivel em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9LEFBP>. Acesso em: 28 março 2022.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. Brazilian Journal of Physical Therapy, [online], v. 11, n. 1, p. 83-89, Fev. 2007. Disponivel em: <https://www.scielo.br/j/rbfis/a/79nG9Vk3syHhnSgY7VsB6jG/?lang=pt#>. Acesso em: 15 abril 2022.

SANIJ, H. K. et al. Evaluation of performance and moisture sensitivity of glass- containing warm mix asphalt modified with zycothermTM as an anti-stripping additive. Construction and Building Materials, v. 197, p. 185-194, 2019.

SAS, W. Application of recycled concrete aggregate in road engineering. Acta Scientarium Polonorum Architectura, [online], v. 14, n. 4, p. 49-59, 2015. Disponível em: <https://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro- 1b6154a4-0ce7-41f1-9e32-2f31f8f8ced1>. Acesso em: 28 março 2022.

SCHEUERMANN FILHO, H. C. Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2019. Disponivel em:<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/194336>. Acesso em: 28 março 2022.

SENÇO, W. D. Manual de técnicas de pavimentação. São Paulo: PINI Ltda, 1997. SHAO, Y. et al. Studies on Concrete Containing Ground Waste Glass. Cement and Concrete Research, Montreal, v. 30, n. 1, p. 91-100, Jan. 2000.

SICHIERI, E. P.; CARAM, R.; SANTOS, J. C. P. Vidros na construção Civil: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2010.

SIMONE, A. et al. Experimental application of waste glass powder filler in recycled dense-graded asphalt mixtures. Road Materials and Pavement Design, v. 20, n. 3, p. 592-607, 2019.

TAHMOORIAN, F.; YEAMAN, J.; MIRZABABAEI, M. Comparisons of the resilient moduli of asphalt mixes containing recycled materials through empirical and experimental methods. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 32, n. 9, p. 04020255, 2020.

TEBECHRANI NETO, A. Avaliação das propriedades mecânicas de uma mistura de material asfáltico fresado e vidro moído com a adição de cal de carbureto. 2020. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/212229. Acesso em: 10 ago. 2022.

THE ASPHALT INSTITUTE. The Asphalt Handbook. Maryland: Asphalt Institute, 1947.

TINAJEROS, R. A. P. Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente convencional e modificada com polímero. 2016. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

UDOMCHAI, A. et al. Generalized Interface Shear Strength Equation for Recycled Materials Reinforced with Geogrids. Sustainability, v. 13, n. 16, p. 9446, 2021.

VAN VLACK, L. H. Princípios de ciência e tecnologia dos materiais. Rio de Janeiro: Campus, 1996.

VEGGI, E. dos S.; MAGALHÃES, S. L. M. Análise comparativa de custos entre concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) e tratamento superficial duplo (TSD). ES Engineering and Science, v. 2, n. 1, p. 03-22, 2014.

VICENT, M.; CRIADO, María; GARCÍA-TEN, J. Alkali-activated materials obtained from asphalt fillers and fluorescent lamps wastes. Journal of Cleaner Production, v. 215, p. 343-353, 2019.

VIZCARRA, G. O. C. Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos. Rio de Janeiro: Dissertação (mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, PUC Rio, 2010.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. Principles of pavement design. New York: John Wiley & Sons Inc., 1975.

YOU, Lingyun et al. Leaching evaluation and performance assessments of asphalt mixtures with recycled cathode ray tube glass: A preliminary study. Journal of Cleaner Production, v. 279, p. 123716, 2021.

Viviane Zorio Peixoto Arima
Murilo Macane Arima Zorio

UTILIZAÇÃO DE VIDRO MOÍDO COMO AGREGADO MIÚDO EM MISTURAS ASFÁLTICAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

conhecimentolivre.org/home
contato@conhecimentolivre.org
editoraconhecimentolivre

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE