

UNIGUAÇU – UNIÃO DE ENSINO SUPERIOR DO IGUAÇU LTDA.
FACULDADE UNIGUAÇU
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
PROJETO FINAL DE CURSO II

ÂNTONY MARCON COLOMBO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURA ASFÁLTICA
UTILIZANDO VIDRO MOÍDO COMO AGREGADO MIÚDO**

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU
2025


ANTONY MARCON COLOMBO

ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURA ASFÁLTICA UTILIZANDO VIDRO MOÍDO COMO AGREGADO MIÚDO

Trabalho de graduação apresentado à disciplina de Projeto final de curso II do curso Superior de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU, sob orientação do Prof. Me. Daniela Kunz

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU

2025


CC BY-NC-SA 4.0
4.0 Intenacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO

ÂNTONY MARCON COLOMBO

ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURA ASFÁLTICA UTILIZANDO VIDRO MOÍDO COMO AGREGADO MIÚDO

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil apresentado, sob a orientação da professora Daniela Kunz, aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel no curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU, pela seguinte banca examinadora:

Professora Orientadora Me. Daniela kunz
Faculdade UNIGUAÇU

Professora Me. Melissa Proença
Faculdade UNIGUAÇU

Professora Me. Jaqueline Tomasini Orth
Faculdade UNIGUAÇU

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU, 16 DE JUNHO DE 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por sempre acreditar na educação, agradeço aos ensinamentos, ao apoio nos momentos necessários e por nunca deixarem de acreditar em mim. Aos meus amigos, que me orientaram e aconselharam e tornaram essa jornada mais leve. Obrigado por me ajudarem a seguir em frente. Aos meus colegas de curso, pela colaboração e pela caminhada que nos guiou até este trabalho. A minha orientadora, Daniela Kunz, pela paciência, dedicação e conhecimento para me guiar na construção deste trabalho, sou imensamente grato pelo seu apoio e incentivo. Aos professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, que me moldaram em cada ensinamento, por compartilharem conhecimento e contribuírem para o meu crescimento profissional e pessoal e a todos que, fizeram e fazem parte dessa pequena história, meu sincero muito obrigado.

“Nunca ande por trilhas, pois assim só irá até onde outros já foram.”

(Alexander Graham Bell)

RESUMO

Os pavimentos asfálticos desempenham papel fundamental na mobilidade urbana e rodoviária, devendo proporcionar segurança e conforto ao tráfego de veículos. A construção desses pavimentos frequentemente demanda a extração de agregados naturais, o que gera impactos ambientais significativos. Paralelamente, resíduos como o vidro, após o uso primário, são descartados em aterros sanitários, onde permanecem por longos períodos contaminando o solo e ocupando volume considerável, apesar de serem materiais 100% recicláveis. Neste contexto, surge a necessidade de buscar materiais alternativos que reduzam o impacto ambiental decorrente da construção da malha viária brasileira. O vidro moído, que apresenta granulometria semelhante à da areia fina, se mostra uma opção viável para substituir parte do agregado fino tradicionalmente utilizado em misturas asfálticas. Diante disso, este trabalho avaliou o impacto da incorporação do vidro moído nas misturas asfálticas, especificamente quanto à resistência à tração, analisando misturas com substituições de 5% e 10% de vidro em relação à areia, além de uma mistura referência sem incorporação do material reciclado. Os resultados obtidos demonstraram que a inclusão de vidro moído proporcionou melhorias expressivas nas propriedades mecânicas das misturas. Diferentemente do traço base, que apresentou uma redução na resistência à tração com o aumento do teor de CAP, as misturas modificadas com vidro tiveram comportamento não linear. Destacou-se particularmente a mistura com 10% de vidro moído, que obteve o melhor desempenho, alcançando resistência máxima em teor intermediário de CAP (4,5%), sugerindo uma interação ótima entre o vidro moído e o ligante asfáltico. Assim, conclui-se que a utilização de vidro moído em misturas asfálticas é técnica e ambientalmente viável, recomendando-se estudos adicionais para determinar aspectos como custo-benefício e durabilidade a longo prazo.

Palavras-chave: Pavimentação, Resíduos de vidro, Sustentabilidade.

ABSTRACT

Asphalt pavements play a fundamental role in urban and highway mobility, ensuring safety and comfort for vehicle traffic. The production of these pavements often requires the extraction of natural aggregates, causing significant environmental impacts. Concurrently, waste materials such as glass, after their primary use, are typically discarded in landfills, where they remain for extended periods, contaminating the soil and occupying substantial space, despite being 100% recyclable materials. Within this context, there arises the necessity to explore alternative materials capable of reducing the environmental impact associated with the construction of Brazil's road infrastructure. Ground glass, which has a granulometry similar to that of fine sand, presents itself as a viable option for partially replacing the fine aggregate traditionally used in asphalt mixtures. Therefore, this study evaluated the impact of incorporating ground glass into asphalt mixtures, particularly concerning tensile strength. Mixtures with replacements of 5% and 10% glass in relation to sand were analyzed, along with a reference mixture containing no recycled material. The results demonstrated significant improvements in the mechanical properties of the mixtures with the inclusion of ground glass. Unlike the base mixture, which exhibited reduced tensile strength with increased binder content, the glass-modified mixtures displayed a nonlinear behavior. Notably, the mixture containing 10% ground glass achieved the best performance, reaching maximum strength at an intermediate binder content (4.5%), suggesting an optimal interaction between ground glass and asphalt binder. Thus, the use of ground glass in asphalt mixtures is technically and environmentally viable. Further studies are recommended to assess additional aspects such as cost-effectiveness and long-term durability.

Keywords: Paving, Waste glass, Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cadeia do vidro.....	18
Figura 2: Vidro moído.	21
Figura 3: Camadas do pavimento flexível	23
Figura 4: Fluxograma da pesquisa.....	27
Figura 5: Cimento asfáltico de petróleo (CAP).	29
Figura 6: Pó de Pedra.....	30
Figura 7: Agregado Graúdo.	30
Figura 8: Areia.	30
Figura 9: Vidro Moído	31
Figura 10: Peneiras utilizadas ensaio de granulometria.	32
Figura 11: Pesagem do corpo de prova com superfície seca.....	33
Figura 12: Pesagem do corpo de prova submerso.....	33
Figura 13: Pesagem do material dentro do recipiente	34
Figura 14: Recipiente no agitador Kline com vácuo	34
Figura 15: Recipiente com amostra e cheio de água	34
Figura 16-a: Pesagem do material para composição do corpo de prova.....	36
Figura 16-b: Aquecimento do material para incorporação do ligante asfáltico.....	36
Figura 16-c: Pesagem e adição do CAP a mistura.....	36
Figura 16-d: Controle da temperatura da mistura com termômetro	36
Figura 16-e: Mistura dos agregados e CAP	36
Figura 16-f: Compactação da mistura no molde cilíndrico.....	36
Figura 16-g: Corpo de prova após o processo de compactação	36
Figura 16-h: Desforma do corpo de prova.....	36
Figura 16-i: Corpo de prova pronto para os ensaios laboratoriais	36
Figura 17: Curvas granulométricas os agregados.....	46
Figura 18: Curvas granulométricas da mistura.....	48
Figura 19: Relação volume de vazios e teor de ligante.	50
Figura 20: Relação massa específica aparente e Gmm.....	51
Figura 21: VFA.....	52
Figura 22: VMA.....	53
Figura 23: Resistência à tração media vs. Teor de CAP (%).....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resíduos recicláveis secos	7
Tabela 2: Tipo de vidros moídos utilizados (2012-2022).....	22
Tabela 3: Densidades dos materiais da mistura.....	40
Tabela 4: Granulometria da brita 3/4.....	41
Tabela 5: Granulometria da brita 3/8 (pedrisco).....	42
Tabela 6: Granulometria da areia.....	43
Tabela 7: Granulometria do pó de pedra.....	44
Tabela 8: Granulometria do vidro	45
Tabela 9: Dosagem de materiais.....	47
Tabela 10: Composição percentual de cada material por mistura.....	49
Tabela 11: Traço base – sem vidro	54
Tabela 12: Traço modificado – com 5% de vidro.	55
Tabela 13: Traço modificado - com 10% de vidro.	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	16
3.1.1 Vidro.....	17
3.1.2 Propriedades do vidro	19
3.1.3 Aplicação de resíduo de vidro na construção civil.....	21
3.2 PAVIMENTAÇÃO.....	23
3.2.1 Misturas asfálticas convencional	24
3.2.2 Misturas asfálticas modificadas com vidro	25
4 METODOLOGIA	27
4.1 SELEÇÃO E PREPARO DOS MATERIAIS.....	28
4.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)	28
4.1.2 Agregado graúdo, agregado miúdo e filler	29
4.1.3 Vidro.....	30
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	31
4.2.1 Ensaio de Granulometria.....	31
4.2.2 Densidade real e aparente	32
4.2.3 Densidade relativa máxima (método Rice).....	33
4.3 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS	34
4.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	35
4.5 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS	38
4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	40
5.1.1 Densidade	40
5.1.2 Análise granulométrica dos materiais.....	41
5.2 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MISTURA ASFÁLTICA	46
5.3 TRAÇOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	48

5.4 TEOR ÓTIMO DE LIGANTE	49
5.5 ENSAIOS DE ESTABILIDADE.....	54
6 CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos desempenham um papel essencial na infraestrutura de transporte, oferecendo superfícies adequadas e duráveis para o tráfego de veículos. Contudo, a durabilidade desses pavimentos continua sendo um desafio constante. Pavimentos de baixa qualidade ou com degradação acelerada exigem frequentes reparos e manutenções, o que acarreta custos elevados e provoca interrupções significativas no trânsito. Nesse contexto, a busca por materiais alternativos e inovadores que melhorem o desempenho mecânico das misturas asfálticas torna-se fundamental para aumentar a vida útil dos pavimentos e reduzir os custos associados à sua manutenção (GONÇALVES, 2021).

O vidro é um material amplamente utilizado em diversos produtos, como embalagens de alimentos e bebidas, materiais de construção e componentes eletrônicos. Sua popularidade deve-se a propriedades únicas, como transparência, impermeabilidade e resistência a reações químicas. Contudo, o vidro também representa desafios significativos no que diz respeito ao descarte e à gestão de resíduos (ABIVIDRO, 2019).

Um dos principais problemas relacionados ao vidro é sua natureza não biodegradável, o que significa que ele pode levar milhares de anos para se decompor naturalmente no meio ambiente. Esse fato, aliado ao aumento constante no consumo de produtos embalados em vidro, resulta em um volume de resíduos que necessitam de soluções adequadas para descarte. Em muitas regiões, a reciclagem de vidro ainda é ineficaz, o que leva à destinação de grandes quantidades desse material em aterros sanitários (Tabela 1). Além de ocupar espaço valioso nesses aterros, isso pode causar contaminação do solo e poluição visual (ABIVIDRO, 2019).

Tabela 1 Resíduos recicláveis secos

Material	Quantidade (t/ano)	Quantidade (t/dia)
Plástico	13.856.173,80	37.962,12
Papel e papelão	8.577.631,40	23.500,36
Vidro	2.226.885,08	6.101,06
Metais	1.896.976,18	5.197,20
Embalagens multímarcas	1.154.681,15	3.163,51

Fonte: Gandra, 2022.

Na construção civil, o vidro moído tem sido utilizado na produção de concretos e argamassas, conferindo-lhes propriedades como maior durabilidade e resistência à compressão. Além disso, sua reutilização em misturas asfálticas surge como uma solução promissora para os desafios da gestão de resíduos de vidro e da melhoria da durabilidade dos pavimentos. A incorporação de vidro moído como agregado em misturas asfálticas pode não apenas reduzir o volume de resíduos descartados inadequadamente, mas também proporcionar benefícios às misturas, como maior resistência e durabilidade (PEIXOTO, 2023).

Pesquisas realizadas por Peixoto (2023), Cerzósimo e Omido (2019) indicam que a adição desse tipo de resíduo às misturas asfálticas pode aumentar a resistência a trincas e deformações, melhorar a durabilidade e até oferecer um desempenho superior em condições climáticas adversas. No entanto, a aplicação de vidro moído em pavimentos ainda exige estudos detalhados para assegurar que não haja comprometimento de outras propriedades essenciais, como a aderência e a segurança das superfícies de rodagem.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho mecânico de misturas asfálticas que utilizam resíduos de vidro como substituição do agregado miúdo. Foram realizados três projetos de mistura, sendo que no primeiro (parâmetro da pesquisa), utilizou-se apenas agregados naturais (0% de resíduo de vidro), no segundo e terceiro substituiu-se 5% e 10% respectivamente, do agregado moído natural pelo agregado moído reciclado. Por fim a pesquisa busca contribuir para o desenvolvimento de soluções sustentáveis na área de pavimentação, enfatizando a reutilização de resíduos e a busca por alternativas mais duráveis que promovam benefícios ao meio ambiente.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O descarte inadequado de vidro é um problema crescente atualmente. Com o aumento do consumo de produtos embalados nesse material, como bebidas e alimentos, a quantidade de resíduos de vidro gerada tornou-se um desafio significativo para os sistemas de gestão de resíduos. Por ser um material que leva centenas de anos para se decompor naturalmente, o vidro pode causar uma série de problemas ambientais, incluindo a contaminação do solo e a poluição visual (GANDRA, 2022).

Oliveira et al. (2020) destacam que a reciclagem do vidro se apresenta como uma solução viável para mitigar esses impactos ambientais. Entretanto, em muitas regiões, a taxa de reciclagem ainda é insuficiente, e uma parcela considerável desse material é destinada a aterros sanitários. Diante disso, a busca por novas formas de reutilização do vidro descartado é essencial para reduzir a pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos e minimizar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

Outra preocupação relevante está relacionada à durabilidade dos pavimentos asfálticos. Pavimentos de baixa qualidade ou que se deterioram rapidamente geram elevados custos de manutenção e reparo, além de causar transtornos significativos aos usuários das vias. Esses problemas estão diretamente ligados à qualidade dos materiais utilizados em sua composição, bem como à resistência dos pavimentos às condições ambientais e ao tráfego intenso (PADULA, 1999).

Nesse contexto, a incorporação de vidro moído em misturas asfálticas surge como uma solução promissora para os desafios mencionados. Essa abordagem não apenas contribui para a redução dos resíduos de vidro, promovendo a sustentabilidade ambiental, como também pode melhorar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Contudo, é fundamental investigar profundamente os efeitos da adição de vidro moído para assegurar que essa prática não comprometa outras características essenciais dos pavimentos, como aderência e segurança. Além disso, é necessário avaliar a viabilidade econômica dessa solução, considerando os custos associados ao processamento do vidro e sua compatibilidade com os métodos de produção asfáltica existentes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade técnica da substituição parcial do agregado natural miúdo por resíduo de vidro moído em misturas asfálticas, avaliando o desempenho mecânico das misturas com diferentes teores de incorporação do resíduo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os agregados naturais e o agregado de resíduo de vidro quanto às suas propriedades físicas, como composição granulométrica e densidades real e aparente, utilizando as normas técnicas aplicáveis para pavimentos flexíveis;
- Realizar a dosagem da mistura asfáltica de referência sem incorporação de vidro moído;
- Realizar a dosagem das misturas asfálticas incorporando vidro moído em teores de 5% e 10% em massa do agregado miúdo;
- Avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas por meio de ensaios normativos, como estabilidade (Marshall);
- Comparar os resultados obtidos entre a mistura convencional e as misturas modificadas, analisando a influência do resíduo de vidro nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

De acordo com a Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, resíduos sólidos são materiais descartados após sua utilização, esta lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, estabelece diretrizes e instrumentos para a gestão e o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos. Entre seus principais objetivos estão a redução da geração de resíduos, o aumento da reciclagem e reutilização, a promoção da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, e a inclusão de catadores de materiais recicláveis nas ações de gestão de resíduos.

No Brasil, a ineficiência na reciclagem impacta em uma perda econômica anual de R\$ 14 bilhões, sendo que o vidro compõe cerca de 2,4% dos resíduos secos recicláveis, resultando em 6.101,06 toneladas por dia (GANDRA, 2022).

Segundo ABIVIDRO (2024), o vidro é um material inorgânico, levando muito tempo para se decompor na natureza, portanto, ocupando muito tempo e espaço em aterros sanitários.

Smith *et al.*, (2020), evidenciam uma mudança significativa no paradigma da construção civil, reconhecendo os ganhos ambientais, econômicos e sociais associados à adoção de resíduos como recursos construtivos. Segundo Johnson (2018), compreender os diferentes aspectos envolvidos na incorporação de resíduos na construção é fundamental para uma adoção eficaz e sustentável dessas práticas.

A utilização de resíduos no âmbito da construção não apenas preserva os recursos naturais ao minimizar a extração de matérias-primas, mas também contribui para a redução da quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários. Esta prática é reconhecida por seu potencial em diminuir o desperdício e promover a economia circular na indústria da construção (BROWN *et al.*, 2019).

A diversidade de resíduos disponíveis apresenta desafios específicos, exigindo uma caracterização detalhada para garantir sua segurança e eficácia na construção civil. A caracterização precisa dos resíduos é essencial para mitigar possíveis riscos à qualidade e durabilidade das estruturas construídas (GREEN, 2021).

Lee (2017) afirma que a aceitação por parte dos interessados da indústria da

construção civil, conhecidos como *stakeholders*, também é um aspecto a ser considerado, pois preocupações relacionadas à qualidade, na durabilidade e estética dos materiais produzidos a partir de resíduos podem influenciar sua aceitação e adoção. A aceitação social e a confiança dos grupos interessados são fundamentais para a implementação bem-sucedida de práticas sustentáveis na indústria da construção.

Para superar esses desafios, são necessárias estratégias abrangentes que abordem não apenas a reciclagem e reutilização de resíduos, mas também o desenvolvimento de tecnologias avançadas de processamento, políticas governamentais e certificações específicas. Todos esses aspectos desempenham um papel crucial na promoção e adoção de práticas sustentáveis na construção civil, impulsionando a transição para um modelo mais sustentável e resiliente (GARCIA e SILVA, 2022).

3.1.1 Vidro

Os vidros são considerados estruturas amorfas, ou seja, possuem arranjos atômicos sem divisão espacial. De aspectos uniformes são compostos por materiais vitrificáveis. Usados em diversos segmentos, como por exemplo a construção civil. Após a fusão, a composição pode variar de acordo com o tipo, uso ou alteração de uma propriedade específica do material (FOGAÇA, 2017).

O processo de produção do vidro (Figura 1) começa com a extração de minerais não-ferrosos, em especial a areia, que é composta principalmente de sílica e é o principal componente do vidro. Após a extração, a areia é enviada aos fabricantes de vidro, e então o material é direcionado para diferentes setores da indústria, conforme sua aplicação. O vidro utilizado em embalagens é enviado para as empresas de envase, onde é usado para acondicionar os produtos desejados. A partir daí, segue o fluxo de consumo, passando por distribuidoras e varejistas até chegar ao consumidor final (BATISTA, ALCANTARA e CASTRO, 2022).



Fonte: Batista, Alcantra e Castro, 2022.

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de vidro (ABIVIDRO), o vidro *float*, é produzido pelo processo de flutuação sobre uma camada de estanho derretido, resultando em uma superfície lisa e uniforme, sendo comumente utilizado em janelas, portas, fachadas de prédios e em outras aplicações arquitetônicas (ABIVIDRO, 2019). Além disso o vidro *float* é amplamente utilizado na construção civil devido à sua capacidade de proporcionar iluminação natural e estética visualmente agradável.

O vidro temperado é submetido a um tratamento térmico que aumenta sua resistência mecânica e térmica, sendo frequentemente empregado em portas, mesas, prateleiras e em aplicações automotivas. Este tipo de vidro é reconhecido por sua resistência e segurança, sendo uma escolha popular em aplicações onde a durabilidade é uma preocupação (SANTOS, 2018).

Composto por duas ou mais camadas de vidro unidas por uma película de polímero, o vidro laminado proporciona maior resistência e segurança, sendo utilizado em para-brisas de automóveis e em aplicações de segurança em construções. Possui propriedades que evitam sua fragmentação em pequenos pedaços afiados em caso de quebra, sendo utilizado em aplicações onde a segurança é primordial, como em portas de vidro e vitrines (LIMA *et al.*, 2021).

Nascimento e Petarnella (2017) determinaram que o vidro é um material altamente valorizado em diversas indústrias, mas também pode se tornar um resíduo após o fim de sua vida útil. Quando descartado inadequadamente, o vidro pode representar um problema ambiental devido à sua baixa degradabilidade e ao seu potencial de causar danos à fauna e flora. No entanto, quando corretamente coletado e reciclado, o vidro pode ser transformado em novos produtos, contribuindo para a redução da extração de matérias-primas e para a preservação dos recursos naturais.

A reciclagem de vidro, além de poupar uma boa parte dos recursos naturais, também consome menor quantidade de energia e emite menos material particulado se comparada com a fabricação do vidro sem a incorporação de cacos. Vale ressaltar que com um quilo de vidro se faz outro quilo de vidro, com perda zero de materiais. Outros aspectos a considerar ao se reciclar o vidro é a menor geração e descarte de resíduos sólidos urbanos, a redução nos custos de coleta urbana e o aumento de vida útil dos aterros sanitários (PS DO VIDRO, 2017).

Após ser recolhido, o vidro passa por um processo de reciclagem que envolve a separação por cor, trituração, fundição e moldagem em novos produtos. Os resíduos de vidro reciclado podem ser utilizados na fabricação de embalagens, isolantes térmicos, fibras de vidro, pavimentação de estradas, entre outros produtos (SOUZA, 2024).

Dessa forma, a reciclagem do vidro não apenas reduz a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários, mas também contribui para a economia de recursos naturais e para a redução da emissão de gases de efeito estufa associados à produção de vidro virgem (ABIVIDRO, 2024).

Em suma, o vidro é um material essencial em diversas aplicações devido às suas propriedades únicas, porém é fundamental que seu descarte seja realizado de forma responsável, preferencialmente por meio da reciclagem, a fim de minimizar seu impacto ambiental e promover a economia circular (NASCIMENTO e PETARNELLA, 2017).

3.1.2 Propriedades do vidro

Segundo Giacomini (2014) o vidro é um material conhecido por sua transparência e versatilidade, e possui propriedades que o distinguem de outros materiais, como concreto e agregados. Para entender sua compatibilidade em diferentes aplicações, é crucial analisar sua composição e compará-la com os

componentes presentes em agregados comumente utilizados na construção civil.

O vidro é essencialmente composto por sílica (areia), carbonato de sódio e calcário, juntamente com outros aditivos que conferem características específicas ao produto final. Segundo Oliveira *et al.*, (2020), essa composição confere ao vidro suas propriedades únicas, como transparência, resistência e durabilidade.

Santos (2018) ao comparar a composição do vidro com a dos agregados, afirma que é evidente que ambos compartilham a presença de sílica e calcário, no entanto, a forma como esses materiais estão dispostos e sua estrutura molecular podem variar significativamente. Enquanto o vidro é produzido por meio de um processo controlado de fusão e resfriamento, os agregados naturais são formados ao longo de milhões de anos por meio de processos geológicos.

Conforme discutido por Lima *et al.*, (2021), essa diferença na formação dos materiais pode influenciar nas suas propriedades mecânicas e físicas. O vidro tende a ser mais frágil e menos resistente à compressão em comparação com agregados como a brita. Além disso, a absorção de água e a porosidade do vidro podem ser diferentes das encontradas nos agregados naturais, afetando sua compatibilidade em certas aplicações, como na produção de concreto.

Apesar das diferenças, o vidro reciclado tem sido cada vez mais utilizado como substituto parcial ou total dos agregados convencionais em diversas aplicações na construção civil. A reciclagem de vidro proporciona não apenas uma alternativa sustentável para a destinação desse material, mas também pode resultar em benefícios econômicos e ambientais (ALMEIDA, 2018).

É crucial realizar estudos detalhados para avaliar a compatibilidade do vidro reciclado com os materiais convencionais na construção civil, levando em consideração suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, se fazendo necessário desenvolver técnicas adequadas de processamento e incorporação do vidro reciclado nos materiais de construção, a fim de garantir a qualidade e durabilidade das estruturas construídas (PEIXOTO, 2023).

Portanto, embora o vidro e os agregados compartilhem certos componentes em sua composição, é fundamental considerar suas diferenças estruturais e comportamentais ao avaliar sua compatibilidade em aplicações específicas na construção civil (PEIXOTO, 2023).

Conforme ressaltado por Gonçalves (2017), o uso responsável e sustentável

do vidro reciclado pode contribuir significativamente para a promoção da economia circular e para a redução do impacto ambiental da indústria da construção

3.1.3 Aplicação de resíduo de vidro na construção civil

Segundo Couto, Junior e Duarte (2021), o uso de resíduos de vidro (Figura 2) na construção civil tem despertado crescente interesse devido às suas vantagens ambientais, econômicas e técnicas. Uma das aplicações mais comuns dos resíduos de vidro na construção civil é como substituto parcial ou total dos agregados miúdos convencionais na produção de concreto.

Figura 2: Vidro moído.



Fonte: ABIVIDRO, 2019.

O vidro moído ou triturado pode ser utilizado como agregado miúdo ou graúdo, dependendo do tamanho das partículas, proporcionando uma alternativa sustentável para a utilização de recursos naturais escassos, como a areia e a brita. A Tabela 02 apresenta os tamanhos das partículas de vidro que tem sido utilizada na construção civil.

Tabela 2: Tipo de vidros moídos utilizados (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 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.

Fonte: Adaptado Peixoto, 2023.

O uso de resíduos de vidro no concreto pode melhorar algumas propriedades do material, como resistência à compressão e durabilidade, quando utilizado em proporções adequadas e sob condições de dosagem controladas (SILVA, 2020).

Outra aplicação promissora dos resíduos de vidro na construção civil é na produção de materiais de isolamento térmico e acústico. A incorporação de resíduos de vidro em materiais isolantes, como placas de isolamento e painéis sanduíche, pode melhorar o desempenho térmico e acústico das edificações, contribuindo para a redução do consumo de energia e para o conforto dos ocupantes (SILVA *et al.*, 2012).

Além disso, os resíduos de vidro também podem ser utilizados na produção de argamassas e revestimentos, proporcionando uma alternativa sustentável para a utilização de areia e outros agregados naturais. A adição de resíduos de vidro em argamassas e revestimentos pode melhorar suas propriedades mecânicas e de aderência, além de conferir uma estética diferenciada aos acabamentos (ALMEIDA, 2021).

A aplicação de resíduos de vidro na construção civil não se limita apenas aos materiais de construção, mas também pode incluir elementos decorativos e artísticos, como mosaicos, ladrilhos e painéis de vidro reciclado. Esses elementos podem agregar valor estético aos projetos arquitetônicos, ao mesmo tempo em que promovem a reutilização de materiais descartados (MELO, MOREIRA e SANTOS, 2023).

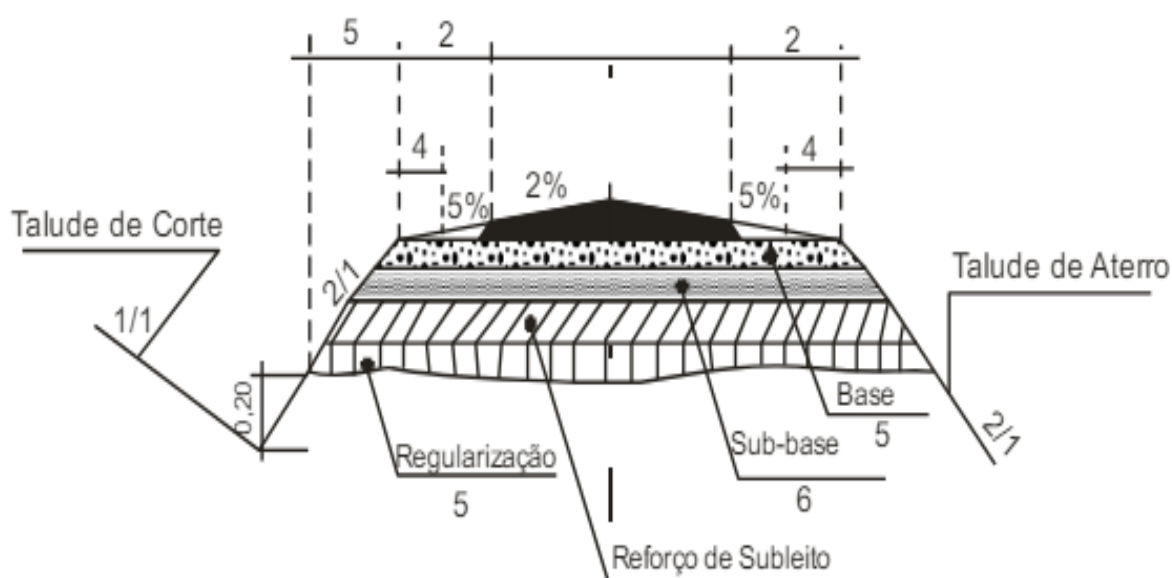
Como destacado por Lima *et al.*, (2020), o uso responsável e sustentável desses resíduos pode contribuir significativamente para a redução do impacto ambiental da

indústria da construção, oferecendo oportunidades para a inovação e a criação de espaços mais sustentáveis e resilientes.

3.2 PAVIMENTAÇÃO

A pavimentação conforme a Figura 3 envolve o processo de construção de uma camada de revestimento sobre uma superfície de base, geralmente composta por agregados, para suportar as cargas aplicadas pelo tráfego (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT, 2022).

Figura 3: Camadas do pavimento flexível



Fonte: DNIT, 2022.

Segundo Silva (2018), os materiais utilizados na pavimentação incluem asfalto, concreto, blocos de pavimentação e materiais permeáveis, cada um com características específicas que atendem a diferentes necessidades e condições de tráfego.

Um dos principais desafios enfrentados na pavimentação é a garantia da durabilidade das superfícies rodoviárias. Fatores como tráfego intenso, variações climáticas, exposição a agentes químicos e falta de manutenção adequada podem contribuir para a deterioração prematura dos pavimentos (DNIT, 2022).

Os pavimentos estão sujeitos a uma variedade de defeitos ao longo do tempo, incluindo fissuras, buracos, desagregação, afundamento e ondulações, onde esses

defeitos podem ser causados por uma combinação de fatores, como carga excessiva, falhas no projeto, má execução da obra e degradação dos materiais (OLIVEIRA, 2019).

De acordo com o manual de pavimentação do DNIT, (2022) a manutenção regular dos pavimentos é essencial para garantir sua segurança e desempenho ao longo do tempo. No entanto, a falta de financiamento adequado e de planos de manutenção eficazes pode resultar em deterioração acelerada e custos mais elevados de reparo no futuro.

Investimentos em pesquisa e desenvolvimento de materiais de pavimentação mais duráveis e resistentes são essenciais para enfrentar os desafios de durabilidade. Novas tecnologias, como pavimentos permeáveis, pavimentos fotovoltaicos e materiais reciclados, estão sendo exploradas para promover a sustentabilidade e a eficiência dos pavimentos (XUDONG, 2022).

O avanço das técnicas de construção, incluindo o uso de equipamentos de última geração e métodos de compactação mais eficientes, podem contribuir para a melhoria da qualidade e durabilidade dos pavimentos (LIMA *et al.*, 2021).

Além disso, segundo, Branco (2016) o monitoramento contínuo do estado dos pavimentos por meio de tecnologias como sensores remotos e sistemas de informação geográfica podem ajudar a identificar precocemente defeitos e realizar intervenções preventivas.

Uma abordagem mais holística para a gestão de ativos de pavimentação, que considere não apenas a construção inicial, mas também a manutenção preventiva e a reabilitação periódica, são essenciais para garantir a longevidade e o desempenho sustentável dos pavimentos ao longo de sua vida útil (DNIT, 2022).

A pavimentação enfrenta uma série de desafios relacionados à durabilidade e ocorrência de defeitos, mas também oferece oportunidades para inovação e melhoria contínua. O desenvolvimento de materiais mais duráveis, técnicas de construção avançadas e uma abordagem integrada para a gestão de ativos são fundamentais para enfrentar esses desafios e garantir a qualidade e segurança das vias pavimentadas (GONÇALVES, 2020).

3.2.1 Misturas asfálticas convencional

Segundo o departamento de estradas de rodagem, os pavimentos consistem

em camadas estruturais. O revestimento atua como a camada que suporta o peso dos veículos. Por essa razão, ele deve ser à prova d'água e capaz de resistir às forças exercidas pelos pneus em movimento. As misturas asfálticas são formadas por uma combinação de agregados minerais de diferentes tamanhos junto a ligantes asfálticos. Os revestimentos podem ser classificados de acordo com o tipo de ligante utilizado: os de aplicação a quente, que empregam CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), e os de aplicação a frio, que utilizam EAP (Emulsão Asfáltica de Petróleo).

3.2.2 Misturas asfálticas modificadas com vidro

As misturas asfálticas modificadas representam uma evolução significativa em relação às formulações convencionais, incorporando aditivos e materiais adicionais para melhorar suas propriedades mecânicas e térmicas. Diversas técnicas de modificação têm sido exploradas, incluindo a adição de polímeros, borracha reciclada, fibras e resíduos de vidro (PEIXOTO, 2023).

Peixoto, (2023) ainda conclui que, para fins adicionais tradicionalmente, um percentual de 10% a 15% de material modificador garante melhores resultados e pode ser usado em situações de alta demanda, de complementos que diminuem a vulnerabilidade do material e prolongam a vida útil. Ainda assim, existe uma sensação de economicidade sistêmica no uso desta informação, pois não apenas representa a possibilidade de um custo menor diretamente, como a menor geração de resíduos e menos impacto ambiental. Em pavimentações asfálticas, foi estudado o vidro moído como agregado miúdo, um substituto para o gerenciamento de resíduos de vidro e diminuição do impacto da extração no meio ambiente. O resíduo de vidro tem se destacado como uma opção promissora para a modificação de misturas asfálticas devido às suas propriedades únicas e à sua abundância como subproduto de processos industriais e de reciclagem.

O vidro triturado pode reforçar a estrutura das misturas asfálticas, aumentando sua resistência à fadiga e à deformação permanente, além disso, o vidro possui uma resistência química superior, o que pode contribuir para a durabilidade das camadas asfálticas em condições adversas de exposição a agentes corrosivos (SILVA *et al.*, 2012).

Estes mesmos autores, dizem que o vidro tem a capacidade de refletir a luz solar, reduzindo assim a absorção de calor pela superfície do pavimento. Isso pode contribuir

para a redução da temperatura superficial das vias pavimentadas, minimizando os efeitos do fenômeno conhecido como "ilhas de calor" em áreas urbanas.

O uso de resíduos de vidro na alteração de composições asfálticas auxilia na reutilização de materiais, ajudando a diminuir a necessidade de recursos naturais e a evitar o descarte incorreto de resíduos sólidos. Isso está alinhado com princípios de economia circular e sustentabilidade ambiental (GONÇALVES, 2021).

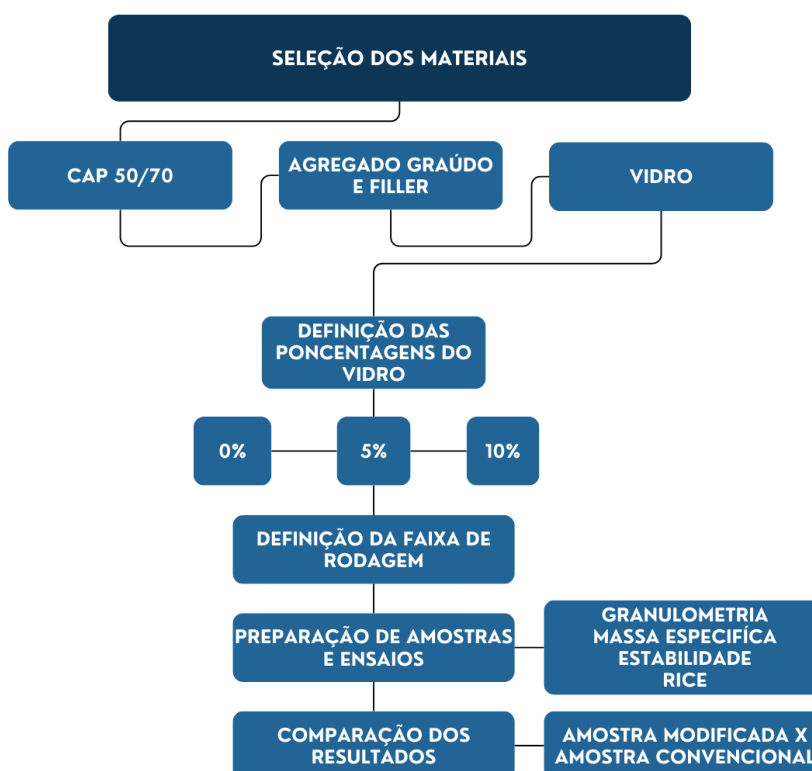
No entanto, diante da crescente demanda por soluções sustentáveis e duradouras para a infraestrutura rodoviária, a utilização de resíduos de vidro na modificação de misturas asfálticas representa uma área de pesquisa e desenvolvimento com grande potencial. A colaboração entre a indústria, instituições de pesquisa e órgãos reguladores é essencial para impulsionar essa abordagem inovadora e viabilizar sua adoção em larga escala (PEIXOTO, 2023).

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada nesta pesquisa visa avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas modificadas com a substituição parcial do agregado miúdo por vidro moído, um resíduo sólido com potencial reaproveitamento na pavimentação. Trata-se de um estudo de natureza experimental, conduzido em ambiente laboratorial, estruturado em etapas sequenciais que envolvem desde a seleção e caracterização dos materiais até a preparação das amostras, realização dos ensaios mecânicos e análise dos resultados obtidos.

A investigação foi dividida em seis fases principais: (1) seleção e preparo dos materiais; (2) caracterização dos materiais; (3) definição das dosagens das misturas; (4) preparo das amostras; (5) realização dos ensaios mecânicos; e (6) análise comparativa dos resultados. Essas etapas foram cuidadosamente planejadas para garantir a reprodutibilidade do experimento e a confiabilidade dos dados obtidos. As etapas podem ser visualizadas no diagrama demonstrado na Figura 4.

Figura 4: Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autor, 2025.

4.1 SELEÇÃO E PREPARO DOS MATERIAIS

Na etapa inicial da pesquisa, procedeu-se à seleção criteriosa dos materiais a serem empregados na formulação das misturas asfálticas. Os critérios adotados para essa escolha foram baseados na disponibilidade regional, qualidade técnica e adequação às exigências normativas para aplicações em pavimentação rodoviária.

Foram selecionados os seguintes insumos: agregados graúdos e miúdos de origem natural, fornecidos por empresas comerciais da região; ligante asfáltico do tipo CAP 50/70 (Cimento Asfáltico de Petróleo); e resíduos de vidro pós-consumo, propostos como material alternativo para substituição parcial do agregado miúdo.

O vidro utilizado foi do tipo *float* incolor, proveniente de descarte residencial e comercial. Para torná-lo tecnicamente viável à aplicação em misturas asfálticas, o resíduo passou por um processo específico de triagem, lavagem, secagem, trituração e peneiramento, com o objetivo de eliminar impurezas e garantir uma granulometria uniforme e compatível com os requisitos das normas técnicas vigentes. Essa etapa foi fundamental para assegurar o desempenho adequado do material reciclado, visando seu uso como substituto parcial do agregado miúdo em proporções de 5% e 10%, conforme previsto no delineamento experimental.

4.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O ligante asfáltico empregado na composição das misturas foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 (Figura 5), cuja classificação está relacionada ao seu grau de penetração, sendo este comumente utilizado em pavimentações rodoviárias devido ao seu bom desempenho sob condições climáticas e de tráfego típicas do Brasil. O material foi fornecido pela usina de asfalto CONSPETRA, localizada no município de Itaipulândia, na região Oeste do Paraná.

Para garantir a conformidade do CAP com os requisitos técnicos e normativos, foram obtidos e analisados seus dados físico-químicos, conforme estabelecido pela Tabela de Especificações da PETROBRAS para CAP 50/70, documento também disponibilizado pela empresa fornecedora. Essas informações incluíram parâmetros como viscosidade, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, densidade, teor de resíduos insolúveis e índice de penetração, assegurando que o ligante atendesse aos padrões exigidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) e demais normas

aplicáveis à pavimentação asfáltica.

Figura 5: Cimento asfáltico de petróleo (CAP).



Fonte: Autor, 2025.

4.1.2 Agregado graúdo, agregado miúdo e filler

Os agregados graúdos e miúdos empregados na pesquisa foram selecionados com base em sua distribuição granulométrica, de modo a atender aos requisitos técnicos exigidos para a formulação de misturas asfálticas de desempenho adequado. Os agregados graúdos, popularmente conhecidos como brita, apresentavam partículas que passavam pela peneira de 25,0 mm e eram retidas na peneira de 4,75 mm, configurando-se dentro da faixa ideal para a estrutura do revestimento.

Como agregado miúdo, foi utilizada a areia natural, proveniente de fonte comercial local, composta predominantemente por partículas que passam pela peneira de 4,75 mm e são retidas em peneiras mais finas. A areia teve papel essencial no preenchimento dos vazios entre os agregados graúdos, contribuindo para a melhoria da trabalhabilidade da mistura e para o ajuste da curva granulométrica.

Além disso, foi incorporado o pó de pedra, um material de natureza pulverulenta com partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm. Esse componente, geralmente derivado da britagem de rochas calcárias ou basálticas, atua como filler mineral, promovendo o preenchimento dos vazios entre os agregados, aumentando a coesão, estabilidade e resistência mecânica da mistura asfáltica.

Figura 6: Pó de Pedra.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 7: Agregado Graúdo.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 8: Areia.



Fonte: Autor, 2025.

4.1.3 Vidro

O vidro pós-consumo utilizado na presente pesquisa foi classificado como do tipo float incolor, amplamente empregado na fabricação de janelas e vitrines, com espessuras variando entre 3 mm e 10 mm. Antes de ser incorporado às misturas asfálticas, o material passou por um processo de preparação e beneficiamento, com o objetivo de garantir sua adequação técnica.

Inicialmente, o vidro foi submetido à etapa de lavagem e secagem, visando a

remoção de impurezas, resíduos orgânicos e contaminantes que pudessem comprometer o desempenho da mistura. Em seguida, foi triturado e moído até atingir uma granulometria fina e homogênea, compatível com a faixa granulométrica exigida para o agregado miúdo em misturas asfálticas. Esse processo foi essencial para possibilitar a substituição parcial da areia natural de forma eficiente, garantindo boa dispersão do material na matriz asfáltica e contribuindo para as propriedades mecânicas da mistura final.

Figura 9: Vidro Moído



Fonte: Autor, 2025.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Com o objetivo de assegurar a adequação técnica dos insumos empregados na formulação das misturas asfálticas, foram realizados ensaios de caracterização física dos materiais selecionados. Tais ensaios seguiram os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, garantindo que os resultados obtidos estejam em conformidade com os parâmetros exigidos para aplicação em pavimentação rodoviária.

4.2.1 Ensaio de Granulometria

O ensaio de análise granulométrica teve como finalidade determinar a distribuição dos tamanhos das partículas presentes nos agregados graúdos, miúdos e no pó de pedra, verificando se os materiais atendem às faixas recomendadas para misturas asfálticas. A distribuição granulométrica influencia diretamente o grau de compactação, a estabilidade volumétrica e a resistência mecânica da mistura, sendo, portanto, uma etapa fundamental no processo de dosagem.

O procedimento foi realizado conforme os requisitos da norma NBR NM

248:2003 (ABNT), utilizando um conjunto de peneiras com aberturas padronizadas, por meio das quais se determinou a porcentagem de material retido em cada malha (Figura 10). A partir dos dados obtidos, foi possível traçar a curva granulométrica dos materiais, permitindo a verificação do enquadramento nas faixas especificadas pelas normas para cada tipo de agregado.

Figura 10: Peneiras utilizadas ensaio de granulometria.



Fonte: Autor, 2025.

4.2.2 Densidade real e aparente

A determinação da densidade real e da densidade aparente dos agregados foi conduzida conforme os critérios estabelecidos pela norma DNIT 413/2021 – ME. Esses parâmetros são indispensáveis no dimensionamento volumétrico das misturas asfálticas, pois influenciam diretamente no cálculo da dosagem ideal dos componentes e na avaliação do volume de vazios da mistura.

A densidade real corresponde à razão entre a massa do material seco e o volume ocupado exclusivamente pelos sólidos, desconsiderando poros e vazios (Figura 11). Já a densidade aparente considera o volume total ocupado pelo material, incluindo os espaços porosos passíveis de serem preenchidos por água (Figura 12). A correta determinação desses valores contribuiu para a obtenção de misturas com desempenho mecânico adequado e durabilidade frente às solicitações do tráfego e

das intempéries.

Figura 11: Pesagem do corpo de prova com superfície seca



Fonte: Autor, 2025.

Figura 12: Pesagem do corpo de prova submerso



Fonte: Autor, 2025.

4.2.3 Densidade relativa máxima (método rice)

Para complementar a caracterização dos materiais e fornecer subsídios ao correto dimensionamento das misturas asfálticas, foi realizado o ensaio de determinação da densidade relativa máxima, também conhecida como massa específica máxima teórica (Gmm). Este ensaio tem por objetivo estimar a densidade que a mistura asfáltica alcançaria caso não houvesse presença de vazios de ar em seu interior, ou seja, considerando a compactação teórica ideal.

O procedimento foi conduzido conforme os critérios estabelecidos pela norma DNIT 427/2020 – ME, que trata da determinação da massa específica máxima medida de misturas asfálticas não compactadas. Para isso, utilizou-se o método do frasco de vácuo (método Rice), no qual a amostra, previamente aquecida e desaglomerada, é submetida a um ambiente de pressão reduzida para a remoção do ar aprisionado entre os grânulos (Figuras 13, 14 e 15). Em seguida, determina-se a massa da amostra submersa e a massa em ar, possibilitando o cálculo do Gmm por meio da Equação 1:

$$Gmm = \frac{A}{A + B + C} \times Fc \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

A = massa da amostra seca no ar (g);

B = massa do frasco com água (g);

C = massa do frasco com água e amostra submersa (g);

Gmm = densidade relativa máxima (sem vazios), adimensional.

A determinação precisa da densidade relativa máxima é fundamental para calcular a percentagem de vazios na mistura compactada (V_v), o vazio no agregado mineral (VAM) e a vazios preenchidos com ligante (VFL), todos parâmetros essenciais para a avaliação do desempenho mecânico da mistura.

Figura 13: Pesagem do material dentro do recipiente



Fonte: Autor, 2025.

Figura 14: Recipiente no agitador Kline com vácuo



Fonte: Autor, 2025.

Figura 15: Recipiente com amostra e cheio de água



Fonte: Autor, 2025.

4.3 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS

A etapa de definição das dosagens teve como objetivo estabelecer as proporções ideais entre os materiais constituintes das misturas asfálticas, buscando desempenho técnico adequado, estabilidade e viabilidade de incorporação do resíduo de vidro. As dosagens foram elaboradas com base nos parâmetros de substituição parcial do agregado miúdo por vidro moído, respeitando os critérios normativos e a compatibilidade granulométrica.

Três formulações distintas foram propostas para a realização dos ensaios

laboratoriais:

1. **Mistura de referência:** Composta exclusivamente por agregados naturais (graúdos, miúdos e pó de pedra), sem adição de vidro moído, servindo como base comparativa.
2. **Mistura com 5% de vidro moído:** Substituição de 5% em massa do agregado miúdo por partículas de vidro pós-consumo, previamente tratadas.
3. **Mistura com 10% de vidro moído:** Substituição de 10% em massa do agregado miúdo, mantendo as demais proporções e parâmetros constantes.

A escolha dos percentuais de substituição foi fundamentada em estudos prévios e na viabilidade de incorporação do resíduo, sem comprometer as propriedades mecânicas e de desempenho da mistura.

4.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A preparação das amostras foi realizada em laboratório, sob condições controladas de temperatura e umidade, com o intuito de garantir a reprodutibilidade e a uniformidade dos corpos de prova moldados para ensaios.

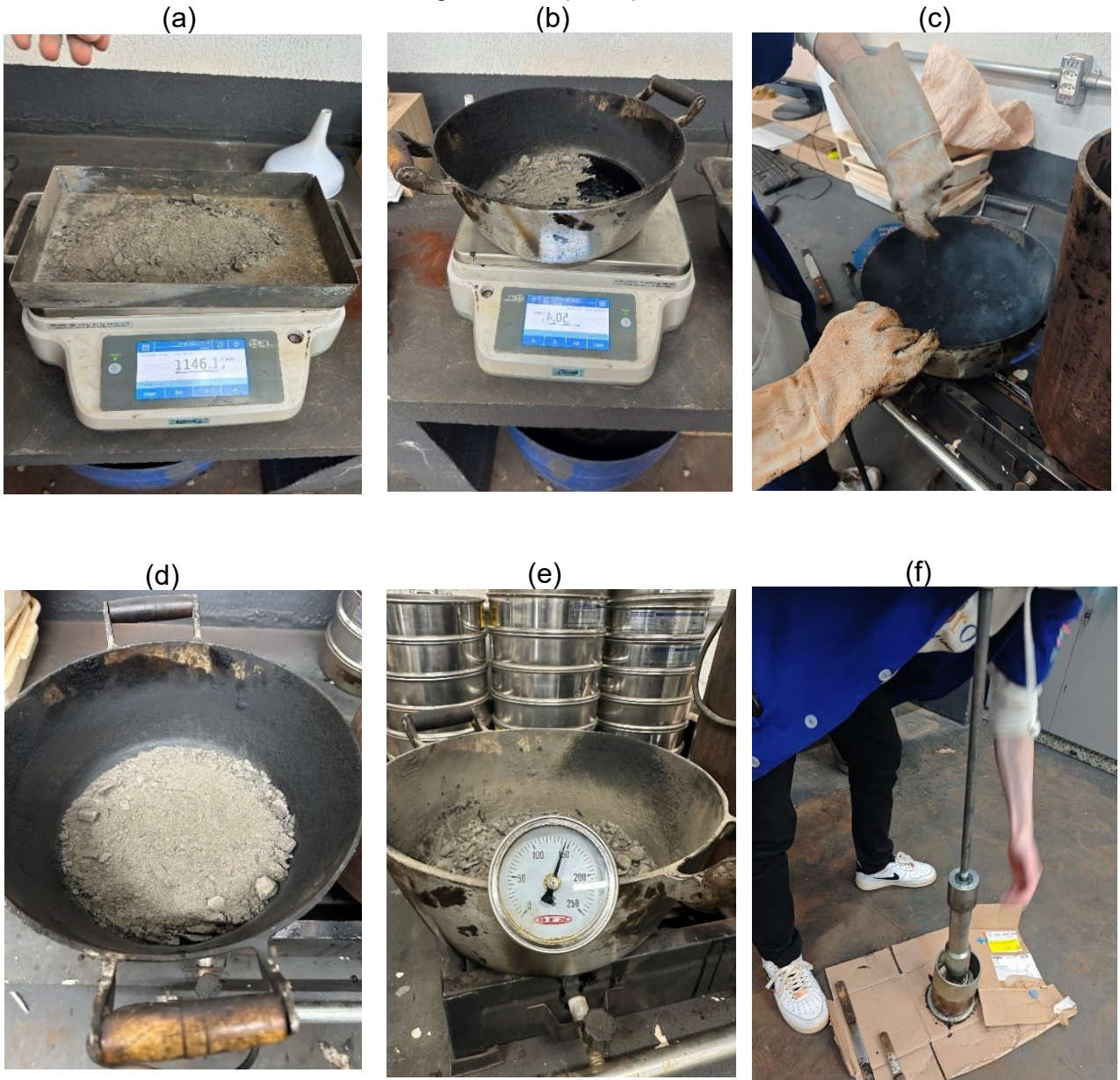
Inicialmente, os agregados naturais (graúdos, miúdos e pó de pedra) e o vidro moído foram submetidos a um processo de secagem e, posteriormente, aquecidos a aproximadamente 160 °C, temperatura ideal para a mistura com o ligante asfáltico. O CAP 50/70 foi aquecido separadamente até atingir a viscosidade apropriada para garantir sua plena incorporação e homogeneização.

Após o aquecimento, os materiais foram dosados conforme os percentuais previamente definidos, misturados manualmente e mecanicamente até obtenção de uma massa homogênea. Em seguida, a mistura foi colocada em moldes cilíndricos padrão, para conformação dos corpos de prova por meio de compactação estática, conforme especificações técnicas da norma DNIT 098/2015 – ME.

Inicialmente, fez-se a pesagem do material para composição do corpo de prova (Fig. 16a), seguida do aquecimento desse material visando à adequada incorporação do ligante asfáltico (Fig. 16b). Em seguida, procedeu-se à pesagem e adição do cimento asfáltico de petróleo (CAP) à mistura (Fig. 16c), monitorando-se a temperatura com termômetro para garantir as condições ideais de homogeneização (Fig. 16d). Após esse controle, realizou-se a mistura dos componentes até se obter

uma composição homogênea (Fig. 16e). A mistura foi então inserida no molde metálico cilíndrico, onde passou pelo processo de compactação (Fig. 16f). Finalizada essa etapa, obteve-se o corpo de prova compactado (Fig. 16g), que foi cuidadosamente desformado (Fig. 16h), resultando no corpo de prova pronto para a realização dos ensaios laboratoriais (Fig. 16i).

Figura 16: Corpo de prova



(g)



(h)



(i)



Fonte: Autor, 2025.

4.5 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural das misturas asfálticas produzidas, considerando diferentes proporções de substituição do agregado miúdo por vidro moído. Tais ensaios são fundamentais para verificar a resistência e a estabilidade das misturas sob condições de carga, simulando situações reais de tráfego.

O principal ensaio adotado nesta pesquisa foi o Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall, que permite aferir a resistência das misturas à deformação plástica quando submetidas a cargas aplicadas em temperaturas controladas. Este procedimento foi executado conforme os parâmetros estabelecidos pela norma DNIT 136/2018 – ME.

Os corpos de prova cilíndricos foram previamente moldados de acordo com a DNIT 178 – PRO, assegurando uniformidade nas dimensões e nas condições de compactação. Após a cura, os corpos de prova foram submetidos à compressão diametral na prensa Marshall, sob temperatura de ensaio padronizada, até sua ruptura.

A resistência à tração indireta (σ_r) foi determinada por meio da Equação 2:

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi * D * H} \quad \text{Equação 2}$$

σ_r = resistência a tração, a temperatura do ensaio, em MPa;

F = Carga de ruptura, em N;

D = Diâmetro de corpo de prova, em mm;

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

4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Após a realização dos ensaios, os resultados obtidos foram organizados, analisados e comparados entre as três formulações propostas: a mistura de referência (sem vidro), a mistura com 5% de vidro moído e a com 10%.

Os dados foram confrontados com os limites de desempenho estabelecidos por normas técnicas e diretrizes para misturas asfálticas,

permitindo verificar a viabilidade técnica da substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo vítreo. Além da análise técnica, também foram considerados aspectos ambientais e econômicos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Densidade

A determinação da densidade dos agregados que compõem a mistura asfáltica é essencial para o cálculo da massa específica da mistura e, conseqüentemente, para o dimensionamento e controle tecnológico da pavimentação. A Tabela 3 apresenta os valores médios obtidos a partir de três ensaios realizados para cada material utilizado:

Tabela 3: Densidades dos materiais da mistura.

Material	Densidade Média (g/cm³)
Pó de pedra	2,9535
Areia	2,6225
Pedrisco	2,9435
Brita 3/4	3,0120
Vidro moído	2,3432

Fonte: Autor, 2025

Observa-se que a brita 3/4 apresentou a maior densidade (3,0120 g/cm³), seguida pelo pó de pedra (2,9535 g/cm³) e o pedrisco (2,9435 g/cm³). Esses valores são esperados, considerando que os materiais graúdos tendem a ter maior massa específica. A areia apresentou densidade intermediária (2,6225 g/cm³), enquanto o vidro reciclado moído, utilizado como adição nas misturas modificadas, apresentou a menor densidade (2,3432 g/cm³).

Essa diferença é relevante, pois a introdução de vidro altera o comportamento da mistura, podendo influenciar na densidade final compactada, na absorção de ligante e na resposta mecânica. Tais efeitos foram analisados nos ensaios Marshall.

5.1.2 Análise granulométrica dos materiais

Para o desenvolvimento da mistura asfáltica, foram analisadas inicialmente as curvas granulométricas dos materiais individualmente: pó de pedra, areia, pedrisco, brita 3/4 e vidro moído. A caracterização granulométrica foi fundamental para compreender o comportamento dos e prever sua contribuição na composição da mistura.

Brita 3/4

Tabela 4: Granulometria da brita 3/4

Peneira (pol)	Abertura (mm)	Massa Retida Média (g)	% Retido Médio	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
1"	25,4	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,05	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,7	703,9	70,34%	70,34%	29,66%
3/8"	9,5	248,7	24,85%	95,19%	4,81%
1/4"	6,3	45,9	4,59%	99,78%	0,22%
Nº 4	4,8	0,53	0,05%	99,83%	0,17%
Nº 8	2,36	0,10	0,01%	99,84%	0,16%
Nº 16	1,18	0,10	0,01%	99,85%	0,15%
Nº 30	0,6	0,10	0,01%	99,86%	0,14%
Nº 50	0,3	0,07	0,01%	99,87%	0,13%
Nº 100	0,15	0,17	0,02%	99,89%	0,11%
Nº 200	0,075	0,27	0,03%	99,92%	0,08%
Fundo	—	0,70	0,07%	100,00%	0,00%
Total	—	1000,4	100%	—	—

Fonte: Autor, 2025

A curva da brita 3/4 destacou-se por sua inclinação extremamente acentuada, revelando um material altamente uniforme. A percentagem passante cai de 100% nas peneiras de 25,4 mm e 19,05 mm para apenas 29,66% em 12,7 mm, e permanece abaixo de 0,2% nas peneiras seguintes. Isso evidencia a ausência de partículas menores, característica desejada em aplicações onde se requer materiais com elevada resistência.

Pedrisco

Tabela 5: Granulometria da brita 3/8 (pedrisco)

Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida Média (g)	% Retido Médio	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
1"	25,4	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,05	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,7	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
3/8"	9,5	3,9	0,39%	0,39%	99,61%
1/4"	6,3	419,4	41,91%	42,30%	57,70%
Nº 4	4,8	340,2	34,01%	76,31%	23,69%
Nº 8	2,36	228,7	22,85%	99,16%	0,84%
Nº 16	1,18	4,8	0,48%	99,64%	0,36%
Nº 30	0,6	0,4	0,04%	99,68%	0,32%
Nº 50	0,3	0,2	0,02%	99,70%	0,30%
Nº 100	0,15	0,3	0,03%	99,73%	0,27%
Nº 200	0,075	0,6	0,06%	99,79%	0,21%
Fundo	—	2,1	0,21%	100,00%	0,00%
Total	—	1000,6	100%	—	—

O pedrisco apresentou uma curva mais íngreme, com significativa redução na percentagem passante logo após a peneira de 6,3 mm. Embora 99,61% das partículas passem pela peneira de 9,5 mm, apenas 57,7% passam pela peneira de 6,3 mm, e valores inferiores a 1% são observados em peneiras menores que 2,36 mm. Essa distribuição indica uma granulometria relativamente uniforme, com baixa quantidade de finos

Areia

Tabela 6: Granulometria da areia

Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida Média (g)	% Retido Médio	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
1"	25,4	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,05	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,7	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
3/8"	9,5	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1/4"	6,3	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
Nº 4	4,8	2,4	0,24%	0,24%	99,76%
Nº 8	2,36	17,2	1,72%	1,96%	98,04%
Nº 16	1,18	88,8	8,87%	10,83%	89,17%
Nº 30	0,6	302,5	30,22%	41,05%	58,95%
Nº 50	0,3	507,5	50,71%	91,76%	8,24%
Nº 100	0,15	61,4	6,14%	97,90%	2,10%
Nº 200	0,075	19,3	1,93%	99,83%	0,17%
Fundo	—	1,9	0,19%	100,00%	0,00%
Total	—	1000,9	100%	—	—

A areia demonstrou uma curva bastante contínua, com redução mais acentuada da fração passante a partir das peneiras intermediárias, destacando-se valores de 98,04% passante em 2,36 mm e apenas 0,17% em 0,075 mm. Essa curva representa uma areia de granulação fina a média, com distribuição relativamente bem graduada. Tais características indicam sua adequação para o uso em misturas asfálticas, promovendo boa trabalhabilidade e coesão interna.

Pó de pedra

Tabela 7: Granulometria do pó de pedra

Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida Média (g)	% Retido Médio	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
1"	25,4	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,05	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,7	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
3/8"	9,5	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1/4"	6,3	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
Nº 4	4,8	0,3	0,03%	0,03%	99,97%
Nº 8	2,36	110,1	11,01%	11,04%	88,96%
Nº 16	1,18	272,4	27,24%	38,28%	61,72%
Nº 30	0,6	173,4	17,34%	55,62%	44,38%
Nº 50	0,3	164,1	16,41%	72,03%	27,97%
Nº 100	0,15	161,5	16,15%	88,18%	11,82%
Nº 200	0,075	87,1	8,71%	96,89%	3,11%
Fundo	—	31,3	3,13%	100,00%	0,00%
Total	—	1000,0	100%	—	—

Fonte: Autor, 2025

O pó de pedra apresentou uma curva contínua e suavemente inclinada, com

100% de material retido nas peneiras mais grossas e redução progressiva até atingir cerca de 3,11% passante na peneira de 0,075 mm. Essa distribuição indica um material com predominância de partículas finas, típico de um filler mineral ou material utilizado para preenchimento de vazios em misturas, especialmente em pavimentação. Sua granulometria favorece a compactação e contribui para a melhoria da trabalhabilidade de misturas asfálticas.

Vidro

Tabela 8: Granulometria do vidro

Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida Média (g)	% Retido Médio	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
1"	25,4	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,05	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,7	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
3/8"	9,5	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1/4"	6,3	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
Nº 4	4,8	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
Nº 8	2,36	0,7	0,07%	0,07%	98,75%
Nº 16	1,18	7,4	0,74%	0,81%	92,50%
Nº 30	0,6	755,2	75,46%	76,27%	23,73%
Nº 50	0,3	217,2	21,71%	97,98%	2,02%
Nº 100	0,15	12,8	1,28%	99,26%	0,74%
Nº 200	0,075	3,8	0,38%	99,64%	0,36%
Fundo	—	3,4	0,34%	100,00%	0,00%
Total	—	1000,5	100%	—	—

Fonte: Autor, 2025

Por fim, o vidro triturado apresentou uma curva inicialmente horizontal, mantendo 100% passante até a peneira de 6,3 mm, seguida de uma redução

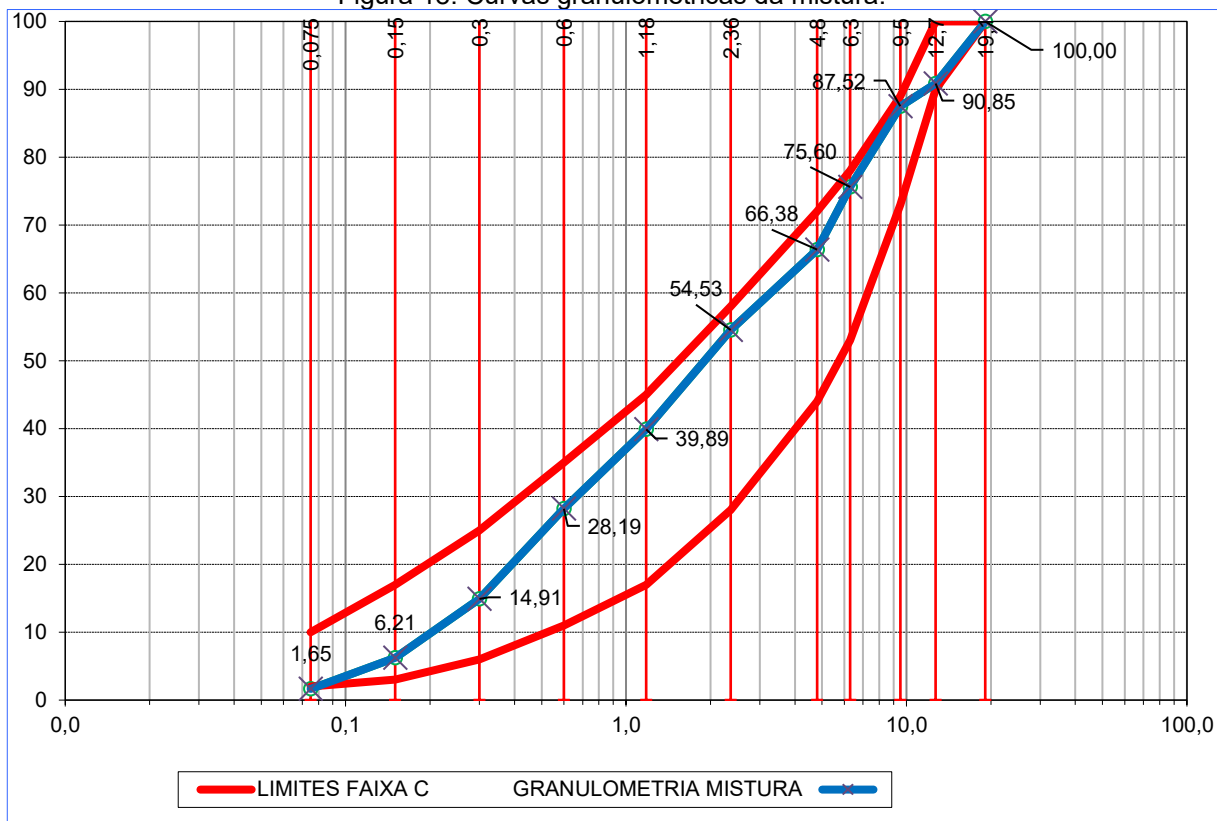
A composição foi definida com base em critérios técnicos de continuidade granulométrica e desempenho mecânico. Os percentuais de cada material foram escolhidos de modo a produzir uma curva composta contínua e compatível com os limites granulométricos estabelecidos pela faixa C. Na Tabela 9, serão apresentados os dados de dosagem utilizados e na Figura 18 a curva final da mistura asfáltica resultante.

Tabela 9: Dosagem de materiais

Peneiras		Peso Retido	Percentagens		Faixa "C-12,5"	
			Retidas	Passante	DNIT	
25,4	1"	0,0	0,00	100,00	100,0	
19,1	3/4"	0,00	0,00	100,00	100	100
12,7	1/2"	109,77	9,15	90,85	90	100
9,5	3/8"	40,04	3,34	87,52	73	89
6,3	1/4"	142,98	11,92	75,60	53	78
4,8	4	110,70	9,23	66,38	44	72
2,36	8	142,16	11,85	54,53	28	58
1,18	16	175,64	14,64	39,89	17	45
0,6	30	140,45	11,70	28,19	11	35
0,3	50	159,36	13,28	14,91	6	25
0,15	100	104,36	8,70	6,21	3	17
0,075	200	54,78	4,57	1,65	2	10
FUNDO		19,76	1,65	0,00		
TOTAL:		1.200,00				

Fonte: Autor, 2025

Figura 18: Curvas granulométricas da mistura.



Fonte: Autor, 2025

No gráfico da Figura 18, observa-se a linha azul, que representa a curva granulométrica da mistura asfáltica analisada, ou seja, o comportamento do traço desenvolvido quanto à distribuição dos tamanhos de partículas (agregados) em função da peneiração. Essa curva é resultante dos percentuais passantes acumulados obtidos nas peneiras normalizadas durante o ensaio de granulometria.

As linhas vermelhas delimitam os limites inferior e superior da Faixa C, conforme estabelecido pelas normas DNIT 031/2006 e DNIT 428/2020, que definem as faixas granulométricas recomendadas para misturas asfálticas. Esses limites garantem que a mistura tenha boa trabalhabilidade, resistência e durabilidade.

5.3 TRAÇOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Com o intuito de avaliar o comportamento de misturas asfálticas com incorporação de vidro moído, foram elaborados três traços distintos: um traço de referência, contendo apenas agregados convencionais (areia natural), e dois traços com substituições parciais da areia por vidro moído, nas proporções de 5% e 10%, em massa, em relação à fração da areia.

Os traços mantiveram as proporções dos demais agregados (pó de pedra, pedrisco e brita 3/4"), a fim de isolar a variável da substituição. O vidro utilizado foi previamente moído e peneirado para garantir granulometria compatível com a da areia, evitando interferências indesejadas no empacotamento dos grãos.

A Tabela 10 apresenta a composição percentual de cada mistura:

Tabela 10: Composição percentual de cada material por mistura.

Agregado	Traço Referência (%)	5% de vidro (substituição da areia)	10% de vidro (substituição da areia)
Pó de pedra	50,0	50,0	50,0
Areia natural	10,0	9,5	9,0
Vidro moído	0,0	0,5	1,0
Pedrisco	27,0	27,0	27,0
Brita 3/4"	13,0	13,0	13,0
Total	100,0	100,0	100,0

Fonte: Autor, 2025

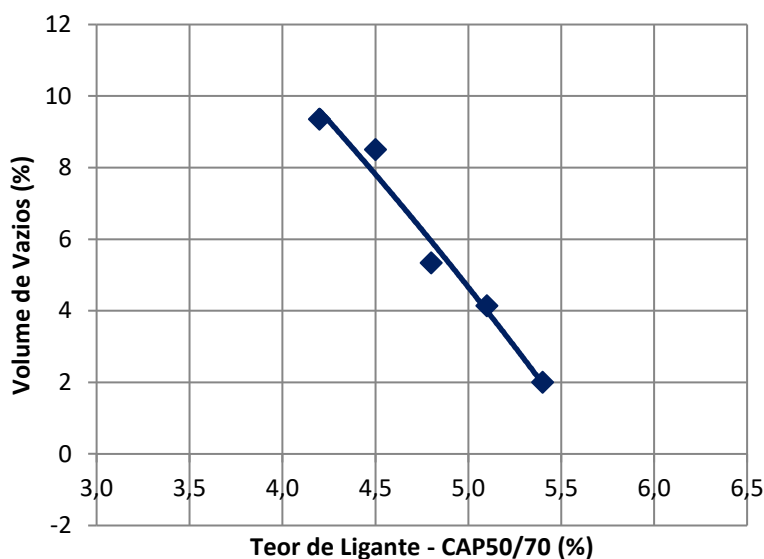
5.4 TEOR ÓTIMO DE LIGANTE

Para a determinação do teor ótimo de ligante da mistura asfáltica convencional, ou seja, aquela sem a substituição da areia por vidro moído, foi utilizada a metodologia Marshall conforme estabelece a norma DNIT 031/2006. A produção dos corpos de prova foi realizada com aplicação de 75 golpes por face, sendo moldadas cinco séries de amostras com diferentes teores de cimento asfáltico de petróleo (CAP), especificamente: 4,2%, 4,5%, 4,8%, 5,1% e 5,4%.

Cada amostra foi submetida aos ensaios previstos, com o objetivo de se obter os seguintes parâmetros técnicos: densidade aparente (Gmb), densidade máxima teórica (Gmm), volume de vazios no agregado mineral (VAM), volume de vazios (VV), volume de vazios preenchidos com ligante (VFA) e a relação betume vazios (RBV).

Os valores obtidos são referentes à média aritmética de três corpos de prova.

Figura 19: Relação volume de vazios e teor de ligante.



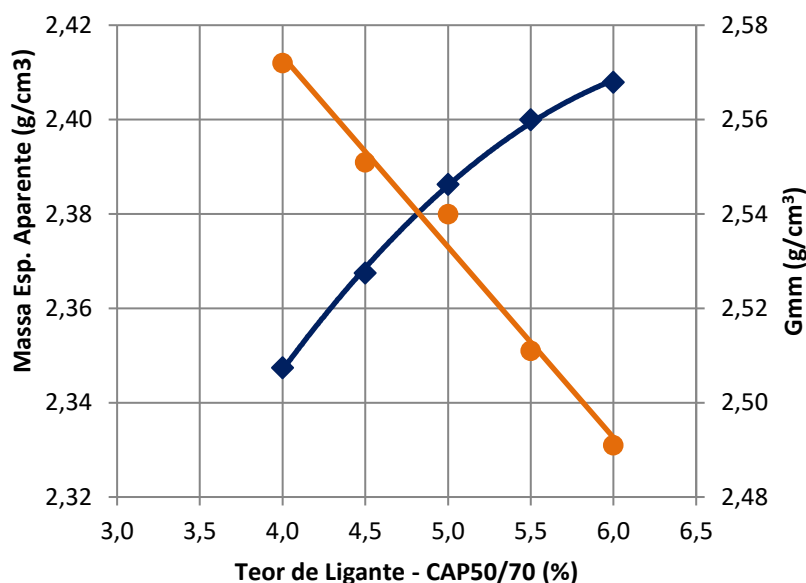
Fonte: Autor, 2025

A Figura 19 apresenta a relação entre o Volume de Vazios (VV) e o Teor de Ligante (CAP 50/70) para os corpos de prova moldados conforme o método Marshall. Observa-se uma tendência de redução do volume de vazios à medida que o teor de ligante aumenta, comportamento típico em misturas asfálticas.

Essa relação é esperada, uma vez que o aumento do ligante preenche os vazios existentes entre os agregados, reduzindo assim o volume de vazios da mistura. No entanto, teores excessivos podem levar ao excesso de ligante livre e consequente exsudação ou instabilidade da mistura.

Com base na curva de tendência ajustada, verifica-se que o teor de ligante correspondente a um volume de vazios de aproximadamente 4% — valor recomendado pelas especificações do método Marshall como ideal para garantir boa resistência e durabilidade da mistura — é da ordem de 5,0%. Este valor, portanto, é adotado como o teor ótimo de ligante para o traço analisado.

Figura 20: Relação massa específica aparente e Gmm.



Fonte: Autor, 2025

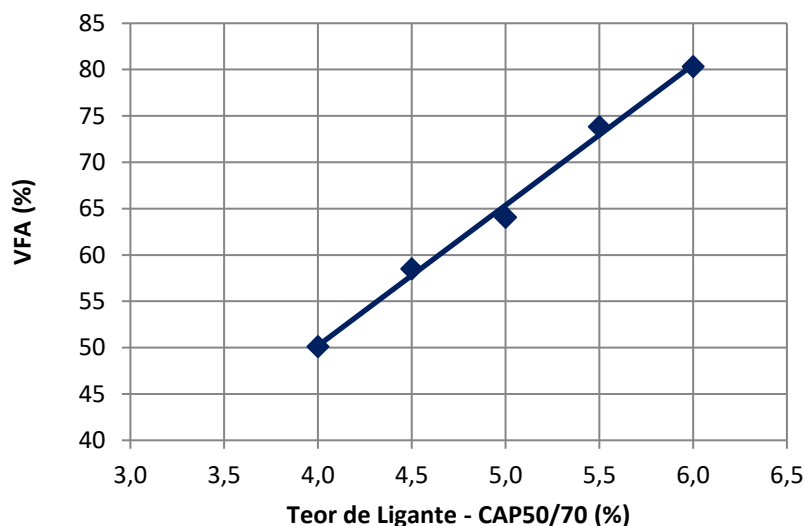
A Figura 20 apresenta o comportamento da massa específica aparente e da densidade máxima teórica (Gmm) da mistura asfáltica em função do teor de ligante CAP 50/70 (%). A massa específica aparente, representada pela curva em azul, demonstra um crescimento à medida que o teor de ligante é aumentado, até atingir um ponto máximo próximo a 5,5%. A partir desse valor, observa-se uma tendência de estabilização ou leve redução.

Esse comportamento se deve ao fato de que o acréscimo de ligante promove o preenchimento dos vazios existentes entre os agregados, elevando a densidade da mistura compactada. No entanto, após certo limite, o excesso de ligante pode provocar uma lubrificação excessiva da matriz, reduzindo a resistência à compactação e resultando em pequenas quedas na densidade aparente. Por outro lado, a curva da densidade máxima teórica, traçada em laranja, apresenta uma tendência decrescente com o aumento do teor de ligante. Esse fenômeno ocorre porque a densidade do ligante asfáltico é inferior à dos agregados, o que implica na redução da densidade máxima teórica da mistura à medida que a fração de ligante se eleva.

A análise conjunta dessas curvas permite identificar a faixa de teor de ligante em que há melhor eficiência de compactação da mistura, ou seja, onde a diferença entre densidade máxima teórica e massa específica aparente é minimizada, indicando um bom grau de compactação e menor presença de vazios. Essa condição é

observada na faixa próxima a 5,0% a 5,3% de CAP, valor que corrobora com o teor ótimo identificado no gráfico de volume de vazios.

Figura 21: VFA.



Fonte: Autor, 2025

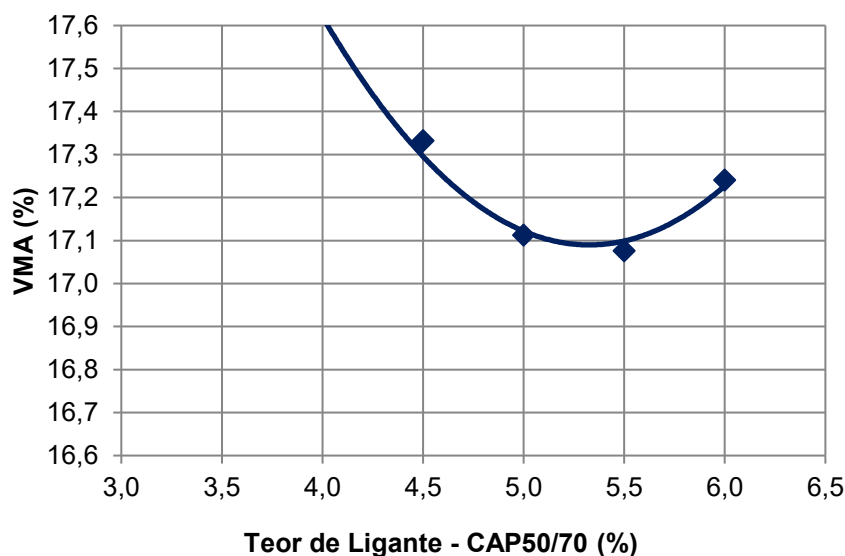
A Figura 21 apresenta o comportamento do VFA, ou seja, o percentual de vazios preenchidos com ligante asfáltico em relação ao volume de vazios no agregado compactado, em função do teor de ligante CAP 50/70.

Observa-se que o VFA aumenta linearmente com o acréscimo do teor de ligante. Esse comportamento é esperado, uma vez que o aumento do conteúdo de ligante promove o preenchimento dos vazios existentes entre os agregados, elevando, portanto, o percentual de vazios efetivos que estão ocupados por ligante.

Os valores de VFA encontrados para a faixa de teores analisada variam aproximadamente de 50% a 80%, sendo que o valor correspondente ao teor ótimo de ligante (em torno de 5,0%) encontra-se dentro da faixa recomendada pelas especificações técnicas, que geralmente exigem VFA entre 65% e 75% para garantir adequada trabalhabilidade, durabilidade e resistência à deformação plástica da mistura.

A conformidade dos resultados com os parâmetros exigidos confirma que o teor de ligante identificado como ótimo também é tecnicamente adequado sob a ótica do VFA, reforçando a consistência do traço proposto.

Figura 22: VMA.



Fonte: Autor, 2025

A Figura 22 apresenta a variação do VMA, ou seja, o volume de vazios no agregado mineral, em função do teor de ligante CAP 50/70.

Observa-se que o VMA apresenta uma leve curvatura descendente até cerca de 5,0% de ligante, onde atinge um valor mínimo, e posteriormente volta a apresentar discreta elevação. Esse comportamento é coerente com o esperado, pois, inicialmente, o acréscimo de ligante preenche os vazios entre os agregados, reduzindo o VMA. A partir de um determinado ponto, o excesso de ligante pode causar uma leve expansão da matriz, resultando em aumento do volume total da mistura e, conseqüentemente, no crescimento do VMA.

O valor mínimo de VMA observado no gráfico está em torno de 5,0% de ligante, coincidindo com o teor ótimo identificado nas análises anteriores. De acordo com as especificações do método Marshall, o VMA deve respeitar valores mínimos que variam conforme o tipo de agregado e faixa granulométrica utilizada — geralmente acima de 14% para misturas com agregado graúdo nominal de 12,5 mm.

Todos os pontos do gráfico encontram-se acima desse limite, indicando que a mistura analisada atende às exigências normativas quanto ao VMA, garantindo volume adequado para acomodação do ligante e resistência à deformação.

Com base na análise dos gráficos apresentados — volume de vazios, massa específica aparente, densidade máxima teórica, VFA e VMA — foi possível identificar que o teor de ligante ótimo para a mistura convencional situa-se em torno de 5,0%.

Este valor atende simultaneamente aos critérios exigidos pelas especificações do método Marshall, garantindo volume de vazios próximo de 4%, massa específica aparente máxima, densidade máxima teórica e VFA dentro das faixas recomendadas, além de VMA superior ao mínimo exigido. Dessa forma, foi adotado o valor de 5,0% como teor ótimo de ligante, o qual foi utilizado como base para a moldagem dos corpos de prova com adição de vidro reciclado. Essa abordagem permitiu a avaliação do comportamento da mistura modificada em comparação com a mistura convencional, mantendo a consistência metodológica e assegurando condições equivalentes de análise.

5.5 ENSAIOS DE ESTABILIDADE

Tabela 11: Traço base – sem vidro

TRAÇO BASE SEM ADIÇÃO DE VIDRO					
Teor de cap (%)	Número de amostras	Carga de ruptura média (N)	Diâmetro (mm)	Altura média (mm)	Resistencia a tração média (Mpa)
4,2	3	682,33	102	61,41	0,070
4,5	3	402,33	102	61,16	0,041
4,8	3	538,33	102	58,83	0,057
5,1	3	240,33	102	58,66	0,025
5,4	3	345,33	102	56,16	0,038

Fonte: Autor, 2025

A tabela 11 expõe a resistência a tração média (MPa) na média de 3 corpos de prova com porcentagens de cap que variam de 4,2% a 5,4%.

Os dados apresentam baixa resistência a tração no traço base, com uma tendência de redução com maiores teores de CAP, chegando a apenas 0,025 mpa em 5,1 % de CAP.

Tabela 12: Traço modificado – com 5% de vidro.

TRAÇO COM 5% DE VIDRO					
Teor de cap (%)	Número de amostras	Carga de ruptura média (N)	Diâmetro (mm)	Altura média (mm)	Resistencia a tração média (Mpa)
4,2	3	875	102	61	0,089
4,5	3	650	102	60	0,067
4,8	3	677	102	59,17	0,071

Fonte: Autor, 2025

O traço com adição de 5% de vidro moído na mistura, apresenta uma elevação na resistência a tração média chegando a 0,089 MPa no teor de 4,2% de CAP, os teores com 4,5% e 4,8% tiveram aumento ainda mais significativos que o mesmo teor comparado a mistura convencional conforme a tabela 12.

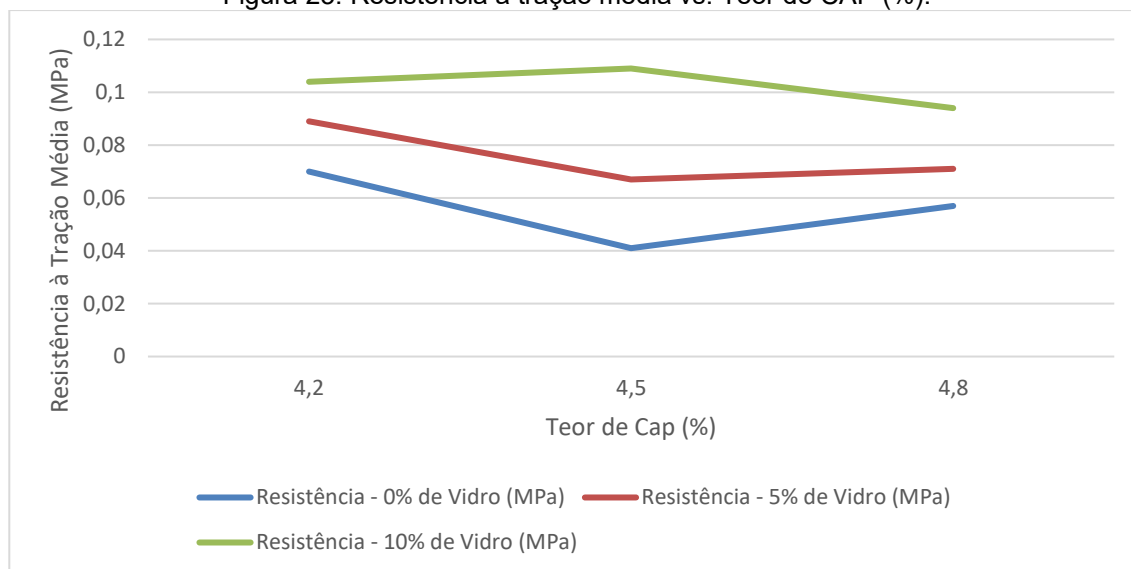
Tabela 13: Traço modificado - com 10% de vidro.

TRAÇO COM 10% DE VIDRO					
Teor de cap (%)	Número de amostras	Carga de ruptura média (N)	Diâmetro (mm)	Altura média (mm)	Resistencia a tração média (Mpa)
4,2	3	997	102	59,67	0,104
4,5	3	1034	102	59,17	0,109
4,8	3	898	102	59,17	0,094

Fonte: Autor, 2025

A Tabela 13 apresenta o pico de resistência da mistura com 10% de vidro moído no teor de cap de 4,5% com resistência de 0,109 MPa, a tabela também mostra um comportamento diferente da tabela 11 e 12, onde os valores de resistência em 4,2% é maior que a resistência teor de cap em 4,5%, a tabela 13 mostra que a mistura apresentou maior resistência em 0,109 no traço de cap 4,5% e no traço de 4,2% foi de 0,104. Essa interação pode ser vista também na figura 23 onde o traço convencional e o traço com 5% de vidro moído possuem comportamento similar.

Figura 23: Resistência à tração média vs. Teor de CAP (%).



Fonte: Autor, 2025

Analisando os resultados apresentados nas tabelas referentes aos traços das misturas asfálticas, percebe-se claramente a influência positiva da adição de vidro moído nas propriedades mecânicas da mistura, especificamente na resistência à tração. Conforme demonstrado pelas tabelas, a inclusão de vidro moído resultou em um aumento significativo da resistência, especialmente perceptível quando comparado ao traço base, que não possuía essa adição.

Destaca-se que no traço base, sem vidro, houve uma tendência clara de redução na resistência à tração com o aumento do teor de CAP. Por outro lado, nas misturas modificadas com vidro moído, essa tendência não se apresentou linearmente. Especificamente, na mistura com 10% de vidro, a resistência máxima ocorreu em um teor intermediário de CAP (4,5%), apresentando comportamento não linear, o que sugere a existência de uma interação ótima entre o teor de CAP e a porcentagem de vidro.

Estes resultados corroboram com estudos prévios realizados por pesquisadores como Fernandes e Silva (2018), que avaliaram misturas asfálticas modificadas com vidro reciclado e também encontraram melhorias significativas na resistência mecânica, especialmente quando utilizados teores em torno de 10%. Os autores destacam que essa interação positiva pode ser atribuída ao vidro moído atuando como um reforço estrutural que proporciona maior coesão interna à mistura.

Assim, considerando os dados apresentados e embasado pelas conclusões obtidas em pesquisas semelhantes, recomenda-se a adoção de vidro moído em misturas asfálticas em porcentagens próximas a 10%, devido ao seu efeito significativo na melhoria da resistência à tração. Contudo, é essencial avaliar outros fatores, como o custo-benefício e durabilidade em longo prazo, para determinar o teor ótimo a ser adotado em projetos futuros.

6 CONCLUSÃO

A durabilidade de pavimentos asfálticos é essencial para mobilidade urbana e rodoviária, garantindo um tráfego adequado de veículo, no entanto ainda há um desafio com esses revestimentos, os pavimentos de baixa qualidade demandam manutenções frequentes, possuindo alto custo a longo prazo.

Nesse sentido, utilizar materiais alternativos que melhorem o desempenho mecânico são necessários para o crescimento com qualidade da malha viária. Os estudos de novas tecnologias com materiais provenientes de lixões e aterros vem frequentemente ganhando espaço afim de minimizar o impacto ambiental reutilizando resíduos que apenas ocupam espaço e poluem o solo. O vidro apesar de ser 100% reciclável, não é biodegradável, com o alto volume de vidro produzido por garrafas, e pela indústria da construção, há toneladas deste resíduo disponíveis em aterros que atualmente estão ocupando grande volume.

A metodologia inclui ensaios de granulometria, massa específica, estabilidade, densidade relativa máxima medida, bem como a caracterização dos materiais utilizados, de acordo com normas estabelecidas pelo DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Os ensaios de granulometria indicaram que o vidro após o processo de moagem possui granulometria compatível com a da areia, traduzindo-se como uma boa alternativa para substituição parcial do agregado fino. O ensaio de densidade também mostrou que há semelhança entre o vidro triturado e a areia utilizada na mistura asfáltica.

O estudo traz dados positivos quanto a resistência da mistura asfáltica modificada. A adição de vidro melhorou a resistência à tração do corpo de prova, sem vidro a mistura perde resistência com o aumento do teor de CAP, de 0,070 MPa (4,2%) para 0,025 MPa (5,1%), com adição de 5% de vidro a maior resistência é com 4,2 % de CAP, e com 10% de vidro a mistura se comportou de forma diferente, a resistência do corpo de prova com 4,2% foi inferior que a de 4,5% tendo suas resistências em 0,094 MPa e 0,109 MPa respectivamente.

No entanto, mais ensaios são necessários para determinar a viabilidade do emprego desta mistura asfáltica na pavimentação, os corpos de prova foram submetidos a cargas de tração estáticas, e os teores de vidro estudados são apenas de 5% e 10%. Bem como sua viabilidade econômica precisa ser aprofundada, os custos de coleta, limpeza, trituração do vidro e possíveis adaptações para o emprego na mistura.

REFERÊNCIAS

ABIVIDRO – Associação Brasileira das Indústrias de Vidro. Guia de segurança nas edificações, São Paulo, SP, 2019. Disponível em: https://vidrocerto.org.br/vc-novo/wp-content/uploads/2021/11/AF_Guia_seguranca_nas_edificacoes.pdf. Acesso em: 20 mai. 2024.

ABIVIDRO – Associação Brasileira das Indústrias de Vidro. Manual técnico do vidro plano para edificações, São Paulo, SP, 2016. Disponível em: https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2019/01/Abividro_Manual_Tecnico-do-Vidro_Plano_Edificacoes.pdf. Acesso em: 20 mai. 2024.

ABIVIDRO; ANAMMA. *Guia técnico de reciclagem do vidro*. Revisão: Rebeca Guimarães; Thalita Brito. Edição, criação e diagramação: HD.M Digital Marketing; apoio ANAMMA. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://circulavidro.com/wp-content/uploads/2024/05/Guia-Tecnico-de-Reciclagem-do-Vidro.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2025.

ALMEIDA, F. S. (2018). **Benefícios Econômicos e Ambientais da Reciclagem de Vidro na Construção Civil**. Anais do Congresso Nacional de Engenharia Ambiental, Brasília.

BATISTA, Maria Clara; ALCANTARA, Patrícia F. de; CASTRO, Luiza Maia de. Utilização de resíduo de vidro reciclado no setor de construção civil: revisão. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. Anais. 5º Conresol – Congresso Sul-Americano de resíduos sólidos e sustentabilidade. DOI <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.5.22.I-023>. Gramado - RS, 2022. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2022/I-023.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2024.

BRANCO, L. H. C. MANIAC: uma metodologia para o monitoramento automatizado das condições dos pavimentos utilizando VANTs. 191 p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>. Acesso em: 21 maio 2014.

BROWN, A. *et al.* **Materiais reciclados na construção: uma revisão da literatura atual. Recursos, Conservação e Reciclagem**, v. 149, p. 481-488, 2019.

CERZÓSIMO, J. M. M. H. Avaliação do potencial de aplicação do pó de vidro para execução de base de pavimentos. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2019

COUTO , Daniel Borges; MELO JÚNIOR , Daniel de Sousa; DUARTE , Teófanos Antônio Stacciariani. ESTUDO DA TROCA DE AGREGADOS CONVENCIONAIS POR VIDRO MOÍDO EM BLOCOS DE CONCRETO NÃO ESTRUTURAL. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S. l.], v. 7, n. 9, p. 1154–1169, 2021. DOI: 10.51891/rease.v7i9.2317. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/2317>. Acesso em: 21 maio. 2024.

EDSON, M. R. I. PS do vidro. 2018. Disponível em: <https://www.psdovidro.com.br/descubra-tudo-sobre-a-reciclagem-de-vidro/>. Acesso em: 21 maio 2024.

FOGAÇA, J. R. V. O que é o vidro?. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/o-que-vidro.htm>. Acesso em: 21 maio 2024.

GANDRA, A. Índice de reciclagem no Brasil é de apenas 4%, diz Abrelpe. Agência Brasil, Rio de Janeiro, 5 jun. 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-06/indice-de-reciclagem-no-brasil-e-de-4-diz-abrelpe>. Acesso em: 20 maio 2024.

GARCIA, M.; SILVA, R. **Incentivos governamentais e certificações para construção sustentável: uma análise comparativa. Desenvolvimento Sustentável**, v. 30, n. 1, p. 127-136, 2022.

GIACOMINI, E. Material: o vidro. 2014. 27 p. Dissertação (Mestrado em Construções de Edifícios) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal. Acesso em: maio 2024.

GONÇALVES, J. *et al.* (2019). **Reciclagem de Vidro: Processos e Aplicações**. In: Anais do Congresso Nacional de Reciclagem, Brasília.

GREEN, T. **Caracterização e classificação de resíduos de construção: uma revisão**. Revista de Produção Limpa, v. 297, p. 126660, 2021.

JOHNSON, R. **Desafios e oportunidades no uso de resíduos na construção**. Gestão e Pesquisa de Resíduos, v. 36, n. 8, p. 707-709, 2018.

LEE, S. **Perspectivas dos stakeholders sobre o uso de materiais reciclados na construção**. Revista de Engenharia e Gestão da Construção, v. 143, n. 5, p. 04017007, 2017.

LIMA, G. C. *et al.* (2021). **Vidro Laminado: Aplicações e Benefícios**. Revista de Engenharia Civil, 25(3), 112-125.

MELO, Guilherme & Moreira, Karla & Santos, Vinicius. (2023). UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro. 12. 10.61164/rmnm.v12i1.1736.

NASCIMENTO, HRF; PETARNELLA, L. A reciclagem de vidros e o impacto socioambiental: O caso da Corporação de Apoio à Criança Queimada (Coaniquem). **Simpósio Nacional de Projetos, Inovação e Sustentabilidade**, 2017.

OLIVEIRA, H. *et al.* (2020). **Reutilização de Resíduos de Vidro na Construção Civil**. Revista de Engenharia Ambiental, 30(4), 220-235.

PADULA, Flávio Renato de Góes. Qualidade de pavimentos e auditoria. 1999. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. doi:10.11606/D.18.2018.tde-07032018-084407. Acesso em: 2024-06-03.

PEIXOTO, Viviane Zório. A utilização do vidro moído como agregado miúdo em revestimentos asfálticos: uma revisão sistemática. 2023. 80 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, 2023.

SANTOS, P. A. (2018). **O Vidro Temperado na Indústria Automotiva**. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Automotiva, São Paulo.

SILVA, André Luís Silva da *et al.* SISTEMA DE ISOLAMENTO TÉRMICO A PARTIR DA REUTILIZAÇÃO DO VIDRO E DO ISOPOR.

SILVA, M. R.; SANTOS, B. A. (2020). **Técnicas de Processamento e Incorporação de Vidro Reciclado na Construção Civil**. Editora Ambiental, São Paulo.

SMITH, J. *et al.* **Construção sustentável: uma revisão do uso de materiais reciclados em aplicações de engenharia civil**. Materiais de Construção e Edifícios, v. 256, p. 119447, 2020.

SOUZA, L. A. Reciclagem de vidro. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/reciclagem-vidro.htm>. Acesso em: 21 maio 2024.

XUDONG Zha, Mengxuan Qiu, Hengwu Hu, Jinxiang Hu, Ruidong Lv, Qinxue Pan, Simulation of structure and power generation for Self-Compacting concrete hollow slab solar pavement with micro photovoltaic array, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 53, Part D, 2022,