

O EMPREGO DA NANOTECNOLOGIA NO ASFALTO - PAVIMENTAÇÃO SUSTENTÁVEL: UMA BREVE REVISÃO¹

THE USE OF NANOTECHNOLOGY IN ASPHALT - SUSTAINABLE PAVING: A BRIEF REVIEW

Thuany Lura Teixeira Bandeira², Laureana de Quevedo Barcelos³,
Patrícia Gomes⁴ e Solange Binotto Fagan⁵

RESUMO

A nanotecnologia surge como uma solução promissora para melhorar as propriedades dos pavimentos asfálticos, aumentando sua durabilidade, resistência e sustentabilidade. O uso de nanomateriais pode otimizar a adesão entre os componentes do asfalto, reduzir impactos ambientais e melhorar o desempenho em condições extremas. A combinação de nanotecnologia com materiais recicláveis e energias renováveis oferece uma abordagem mais ecológica e economicamente viável para pavimentação. Esses avanços contribuem diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente nas metas de infraestrutura resiliente (ODS 9), cidades sustentáveis (ODS 11) e ação climática (ODS 13). O objetivo deste estudo foi elaborar uma revisão bibliográfica integrativa, baseada na análise de artigos publicados entre 2014 e 2024 no Web of Science, sobre nanotecnologia em pavimentos asfálticos sustentáveis e recicláveis. Foram selecionados 14 artigos relevantes após aplicação de critérios de inclusão e exclusão. Os estudos encontrados mostraram que a incorporação de nanocompostos com materiais recicláveis resultam em pavimentos mais duráveis, com melhor desempenho em altas temperaturas, resistência a sulcos e maior estabilidade, favorecendo soluções mais ecológicas e resilientes para a engenharia rodoviária. Em síntese, observa-se que o uso de nanomateriais em pavimentações asfálticas representa uma fronteira promissora para a engenharia civil sustentável, com potencial de ampliar a durabilidade das vias e reduzir impactos ambientais. Contudo, estudos futuros devem considerar a viabilidade econômica em larga escala e o ciclo de vida completo desses nanocompósitos, a fim de consolidar sua aplicação prática.

Palavras-chave: Engenharia; Ecológico; Nanoestruturas; ODS; Renováveis.

ABSTRACT

Nanotechnology emerges as a promising solution to improve the properties of asphalt pavements, increasing their durability, resistance, and sustainability. The use of nanomaterials can optimize adhesion between asphalt components, reduce environmental impacts, and improve performance in extreme conditions. The combination of nanotechnology with recyclable materials and renewable energies offers a more ecological and economically viable approach to paving. These advances contribute directly to the Sustainable

¹ Artigo de revisão integrativa

² Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Nanociências - Universidade Franciscana (UFN). E-mail: thuany.bandeira@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2585-6805>

³ Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Nanociências - Universidade Franciscana (UFN). E-mail: laureana.barcelos@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5932-7532>

⁴ Professora do Programa de Pós-Graduação da Universidade Franciscana (UFN). E-mail: patriciagomes@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7587-2028>

⁵ Professora do Programa de Pós-Graduação da Universidade Franciscana (UFN). E-mail: solange.fagan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8719-4228>

Development Goals (SDGs), especially the targets for resilient infrastructure (SDG 9), sustainable cities (SDG 11), and climate action (SDG 13). The objective of this study was to conduct an integrative literature review, based on the analysis of articles published between 2014 and 2024 in the Web of Science, on nanotechnology in sustainable and recyclable asphalt pavements. Fourteen relevant articles were selected after applying inclusion and exclusion criteria. The studies found showed that incorporating nanocomposites with recyclable materials results in more durable pavements, with better performance at high temperatures, resistance to rutting, and greater stability, favoring more ecological and resilient solutions for road engineering. In summary, it is observed that the use of nanomaterials in asphalt pavements represents a promising frontier for sustainable civil engineering, with the potential to extend the durability of roads and reduce environmental impacts. However, future studies should consider the large-scale economic viability and the complete life cycle of these nanocomposites to consolidate their practical application.

Keywords: Engineering; Ecological Nanostructures; ODS; Renewables.

1 INTRODUÇÃO

A busca constante por melhorias nos materiais utilizados pelo ser humano tem sido uma das forças motrizes do desenvolvimento tecnológico. Com o avanço da ciência e da inovação, a nanotecnologia se destaca como uma área promissora na criação de materiais inteligentes e de alto desempenho. Os nanomateriais, com suas propriedades aprimoradas em escalas minúsculas, oferecem soluções inovadoras em setores como revestimentos, impermeabilizantes, adesivos e até mesmo concreto, atraindo a atenção de pesquisadores e investidores em todo o mundo (Mihindukulasuriya & Lim, 2014; Sabry, 2022).

Ao manipular as dimensões dos materiais para a escala nanométrica, é possível explorar propriedades físico-químicas inéditas, que aumentam a durabilidade, resistência e versatilidade dos produtos. Esses avanços têm despertado um grande interesse em várias áreas, pois oferecem oportunidades de melhorar o desempenho e reduzir o impacto ambiental dos materiais. A nanotecnologia pode, portanto, contribuir para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes, essencial em um momento de crescente preocupação com os efeitos ambientais e de saúde (Lessa *et al.*, 2021).

Dentro da engenharia rodoviária, os pavimentos asfálticos são elementos essenciais e amplamente utilizados. No entanto, o aumento do número de veículos e as cargas mais pesadas têm causado a deterioração precoce das vias, resultando em falhas como fissuras e buracos. As misturas asfálticas convencionais têm se mostrado insuficientes para suportar essas novas exigências, especialmente em vias urbanas, onde as mudanças frequentes de carga e as condições climáticas severas contribuem para o desgaste acelerado (Ray *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2021).

Neste contexto, é urgente que se busquem alternativas tecnológicas que minimizem os impactos ambientais e aumentem a vida útil dos pavimentos. A nanotecnologia oferece um caminho promissor para o desenvolvimento de asfalto inteligente, com a aplicação de nanomateriais capazes de melhorar a adesão entre os componentes do pavimento, aumentar a resistência à fissuração e à água,

além de otimizar o desempenho sob pressões elevadas. Isso não só reduziria os custos de manutenção e a necessidade de recursos naturais, mas também contribuiria para a sustentabilidade das infraestruturas rodoviárias (Mousavinezhad *et al.*, 2019; Shah *et al.*, 2020).

No entanto, até o momento, não foram encontradas revisões na literatura que explorem de forma abrangente o uso da nanotecnologia em conjunto com materiais recicláveis e fontes de energia renovável para o aprimoramento do asfalto. Essa lacuna na pesquisa abre uma oportunidade única para investigar como a combinação de nanomateriais, reciclados e energias sustentáveis pode contribuir para o desenvolvimento de pavimentos mais ecológicos, duráveis e economicamente viáveis, alinhando inovação tecnológica à preservação ambiental e criando soluções mais sustentáveis para a engenharia de pavimentação (Alizadeh *et al.*, 2023).

1.1 DANOS CAUSADOS POR ASFALTOS CONVENCIONAIS

Um dos danos mais constantes na mistura asfáltica é causado pelos efeitos prejudiciais da umidade, que afetam a coesão do ligante asfáltico e aderências do ligante asfalto-agregado, sendo conhecido como danos por molhamento (Hamedi, 2017). Além disso, as sensibilidades térmicas da mistura asfáltica são problemas importantes, uma vez que os asfaltos contêm veículos pesados, bem como o aumento das temperaturas globais, problemas como baixa resistência térmica tem ofuscado o uso do betume, por essas razões, os nanomateriais fazem parte de famílias de aditivos para melhorando a propriedade de asfaltos quentes em termos de sensibilidades térmicas (Firouzinia & Shafabakhsh, 2018).

A fissuração térmica ou de baixa temperatura também é um problema recorrente em pavimentos asfálticos, que se origina em regiões de climas frios exercendo efeitos prejudiciais nas qualidades e na vida útil dos pavimentos, por isso, busca-se utilizar agentes para sua reabilitação com opções de ciclos de vida mais longos (Hamedi *et al.* 2020). A fissuração térmica causa acelerações na propagação da fadiga da mistura asfáltica sob carga de tráfego. As fissuras mais importantes no pavimento são causadas pelo frio que se prolonga dia a dia devido à passagem de veículos; criações e expansões de fissuras que requerem reparo prematuro e precoce (Shafabakhsh, *et al.*, 2021).

Do mesmo modo, o envelhecimento é o principal fator responsável pelos problemas no pavimento asfáltico, onde os pavimentos não apresentam bom desempenho devido à deteriorização da estrutura interna dos efeitos dos materiais e ambientais. O envelhecimento do ligante asfáltico resulta em um aumento de rigidez e fragilidade, além de comprometer a adesão entre o ligante e o agregado. Esse processo gera diversas falhas no pavimento, como fadiga, rachaduras e danos causados pela umidade, que afetam gravemente o desempenho do pavimento e reduzem sua durabilidade, que comprometem seriamente o desempenho do pavimento encurtando sua vida útil (Zhang, *et al.*, 2021).

Da mesma forma, devido ao aumento populacional, à melhoria da mobilidade e ao desenvolvimento das economias em todo o mundo ao longo dos anos, o tráfego rodoviário e as cargas de veículos

que dão suporte às diferentes estradas do mundo estão aumentando consideravelmente, as mudanças climáticas e a deterioração ecológica causaram flutuações nas temperaturas ao longo dos anos. Portanto, essas circunstâncias deram origem às necessidades de exploração de materiais betuminosos para reforços das respostas mecânicas das superfícies rodoviárias, evitando assim degradações do pavimento e garantindo vidas úteis mais longas em condições de serviço (Nazari *et al.* 2018; Liu, *et al.*, 2021).

Assim, materiais sustentáveis são urgentemente necessários para maior segurança, confiabilidade e qualidade e pavimentos mais ecológico, para resolver este problema, os pesquisadores têm usado nanotecnologia, como sendo compatíveis com o asfalto, apresentando grandes benefícios (Mansourkhaki, *et al.*, 2019; Vamegh, *et al.*, 2019).

1.1.1 Aplicabilidade dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) nas pavimentações

Em setembro de 2015, na sede da Organização das Nações Unidas (ONU), em Nova Iorque, realizou-se a Cimeira do Futuro, um evento histórico de alto nível, que reuniu mais de 150 líderes mundiais para debater temas de grande relevância. O principal objetivo foi a adoção formal da nova agenda de desenvolvimento sustentável, composta pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Até 2030, prevê-se que todos os países desenvolvam políticas, medidas e ações para cumprir as 169 metas distribuídas entre 17 ODS (Figura 1). Esta agenda tem como base os conhecimentos e avanços obtidos com os 8 Objetivos de Desenvolvimento do Milénio, vigentes entre 2000 e 2015, e busca promover um modelo global voltado para a erradicação da pobreza, a promoção da prosperidade e do bem-estar de todos, além da proteção do meio ambiente, com destaque para as mudanças climáticas.

Figura 1 - Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável dispostos nos respectivos ícones oficiais.



Fonte: <https://www.unric.org/pt/17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>.

No estudo de Thilakshan e Bandara (2019), é discutida a sustentabilidade no setor de transportes que pode contribuir para várias metas globais, incluindo as ODS, e destacar a importância de entender como a pavimentação pode contribuir para esses objetivos globais. Sendo a ODS 9, fundamental para o desenvolvimento de infraestrutura resiliente e sustentável. O artigo menciona que a melhoria da infraestrutura pode impulsionar o crescimento econômico e facilitar o acesso a serviços essenciais, promovendo a inovação e a industrialização. Neste trabalho, podemos identificar também a ODS 11, onde uma boa pavimentação para o transporte é crucial para o desenvolvimento de cidades sustentáveis, bem como melhorar a qualidade de vida nas cidades e com isso reduzir a poluição e congestionamentos, e promover a acessibilidade. Se faz presente também a ODS 13, que trata da ação climática, que também é relevante nesse contexto, pois o setor de transporte é um dos principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa, e uma pavimentação com asfalto sustentável pode desempenhar um papel crucial na mitigação dessas emissões.

Dessa forma, fica claro que a construção e melhoria da pavimentação asfáltica têm um papel fundamental no alcance das ODS, não apenas no âmbito da infraestrutura, mas também no impacto direto sobre o meio ambiente e a qualidade de vida das populações.

Já no estudo de Chiu *et al.*, (2008), a pesquisa se alinha com princípios de sustentabilidade e gestão ambiental, utilizando fórmulas de materiais reciclados e de fornecer informações que ajudem na escolha de métodos de construção mais sustentável na engenharia civil, apesar de não mencionar explicitamente o uso das ODS, a pesquisa se alinha com os princípios de sustentabilidade, que são fundamentais para ODS, como a ODS 12, pelo foco em materiais reciclados e na redução do impacto ambiental que está diretamente relacionado a práticas de consumos e produções a partir de materiais sustentáveis.

As fortes chuvas que assolaram o Rio Grande do Sul em abril e maio de 2024 prejudicaram mais de 80% das estradas estaduais, totalizando cerca de 13,7 mil quilômetros sob bloqueios parciais ou totais, além da destruição de vias públicas e pontes, segundo o governo gaúcho. Outro impacto das inundações foi o acúmulo de entulho e resíduos provenientes de edificações atingidas, o que sobrecarregou os aterros sanitários e elevou o risco de disseminação de doenças (CLIMAINFO, 2024). Esses eventos extremos evidenciam a vulnerabilidade da infraestrutura viária frente às mudanças climáticas e reforçam a necessidade de desenvolver soluções mais resilientes e sustentáveis.

Em análise geoespacial, Rathore *et al.* (2025) identificaram que as enchentes cobriram mais de 1.400 km² de áreas agrícolas e urbanas, comprometendo estradas e pontes essenciais ao escoamento de produtos e ao deslocamento populacional. A deterioração precoce de pavimentos e taludes, associada à erosão e à perda de material betuminoso, evidencia a urgência de soluções de engenharia capazes de resistir a variações extremas de umidade e temperatura.

Nesse contexto, Santos e Rohden (2024) destacam que a seleção de materiais e tecnologias de pavimentação exerce papel decisivo na sustentabilidade e no desempenho estrutural das rodovias ao longo do tempo. A fase de uso e manutenção concentra grande parte dos impactos ambientais,

o que reforça a importância de adotar ligantes e misturas asfálticas com maior durabilidade e menor suscetibilidade à umidade.

Nesse contexto, a pavimentação asfáltica baseada em práticas sustentáveis, como o uso de nanomateriais e de resíduos recicláveis, torna-se essencial para promover infraestrutura mais durável, resiliente e ambientalmente responsável. A aplicação da nanotecnologia em ligantes asfálticos pode, por exemplo, aumentar a resistência à umidade, à erosão e às variações térmicas, reduzindo a degradação causada por chuvas intensas. Assim, tais soluções contribuem diretamente para o ODS 9, ao fomentar inovação e infraestrutura resiliente; para o ODS 11, ao favorecer cidades e comunidades mais seguras e sustentáveis; para o ODS 13, ao mitigar os impactos das mudanças climáticas por meio de pavimentos mais adaptativos e duradouros; e para o ODS 15, ao reduzir o uso de matérias-primas virgens e incentivar a reciclagem de resíduos sólidos no setor da construção rodoviária.

Assim, a pavimentação asfáltica alinhada a práticas sustentáveis representa um elemento estratégico para o alcance dos objetivos globais voltados ao desenvolvimento equilibrado e à preservação ambiental. O uso de tecnologias inovadoras, como a incorporação de nanomateriais e resíduos recicláveis em misturas asfálticas, surge como uma alternativa eficaz para prolongar a vida útil das vias, reduzir custos de manutenção e fortalecer a resiliência da infraestrutura rodoviária frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

2 METODOLOGIA

O presente estudo trata-se de uma revisão bibliográfica integrativa da literatura, construída a partir da análise e interpretações de produções e estudos já existentes, formando assim conceitos e definições substanciais (Whittemore; Knalf, 2005; Ganong, 1987). As buscas foram realizadas a partir da plataforma Web of Science, por meio de descritores e operadores booleanos entre eles: Nano e Asfalto ou Mistura betuminosa, e sustentável ou reciclável, em inglês: Nano OR Nanomaterials OR Nanocompositores AND Asphalt OR Bituminous Mixture AND Sustainable OR Recyclable.

Para a condução deste estudo foram realizadas as seguintes etapas: a) Escolha dos descritores, b) Delimitação do tempo: Artigos de pesquisa publicados a partir do ano de 2014 até 2024; b) inclusão de artigos de pesquisa, disponíveis na íntegra; c) Leitura de títulos e resumos, e d) Leitura do artigo completo. Foram excluídos: Capítulos de livros, patentes, manuais e editoriais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao total, 184 artigos foram encontrados, foram pré-selecionados 20 artigos de acordo com o título e resumo, e após a leitura minuciosa, 6 artigos foram excluídos por não atender a temática da pesquisa. Desta forma, 14 artigos foram considerados para revisão, conforme a tabela 1.

Tabela 1 - Artigos selecionados para revisão.

Autor e ano	Objetivo do estudo	Materiais utilizados
PLÁSTICOS E POLÍMEROS RECICLADOS		
(Al-Hosainat <i>et al.</i> , 2024)	Avaliar os efeitos de diferentes conteúdos de polietileno tereftalato reciclado em propriedades reológicas e mecânicas do ligante asfáltico	Polietileno tereftalato reciclado e plástico reciclado (garrafas de PET recicladas)
(Zhang <i>et al.</i> , 2022)	Avaliar modificações do ligante asfáltico com resíduo de copolímero etileno-vinil acetato (EVA) e óxido de grafeno (GO) nas propriedades do asfalto, focando em desempenho térmico e dispersão do modificador	EVA reciclado de resíduos de embalagens e óxido de grafeno com aditivo
MATERIAIS NÃO CONVENCIONAIS		
(Zhang <i>et al.</i> , 2024)	Avaliar a viabilidade do uso de fibras de casca de bambu modificadas com Nano-SiO ₂ para melhorar o desempenho de argamassa asfáltica	Fibras de casca de bambu (resíduo de produção de bambu) modificadas quimicamente + nano-SiO ₂
(Jeffry <i>et al.</i> , 2019)	Investigar as propriedades microestruturais e físicas da cinza de carvão com tamanho de nanopartícula produzida a partir de casca de coco	Cinza de carvão nanoestruturadas a partir de casca de coco residual
(Ji <i>et al.</i> , 2021)	Avaliar as propriedades físicas e químicas, e as características de pó de casca de ovo nano-microestruturada do asfalto	Casca de ovo reciclada nanoestruturada
BIOMATERIAIS E BIOATIVOS MODIFICADOS COM NANOTECNOLOGIA		
(Ren <i>et al.</i> , 2020)	Investigar o desempenho do pavimento e a resistência ao envelhecimento de asfalto a partir de bio-modificação de nanopartículas	Bio-óleo de resíduos de serragem de madeira incorporado com nanopartículas de SiO ₂ (dióxido de silício), CaCO ₃ (carbonato de cálcio), TiO ₂ (dióxido de titânio), Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro (III)) e ZnO (óxido de zinco)
(Ahmed <i>et al.</i> , 2022)	Desenvolver um ligante de bioasfalto utilizando um nanocompósito biopolimérico magnético, visando melhorar as propriedades físicas, mecânicas e reológicas do asfalto para diferentes aplicações	Biopolímero magnético CaNiFe2O4@Quitosana (ferrita magnética de cálcio e níquel, formada por óxidos metálicos) produzido à base de quitosana (biopolímero natural) e materiais magnéticos
RESÍDUOS DE PNEUS		
(Han <i>et al.</i> , 2022)	Investigar as propriedades elásticas e a resistência do asfalto modificado com borracha de pneu triturado e nanoagentes	Borracha de pneu triturado associado à nanodióxido de silício e nanotubos de carbono
(Krasnovskikh <i>et al.</i> , 2022)	Investigar a produção de um modificador de betume nanoestruturado a partir do reprocessamento de borracha de pneus	Borracha de pneu automotivo nanoestruturada
(Yu <i>et al.</i> , 2018)	Investigar a incorporação de nanoargila na borracha asfáltica para melhorar a estabilidade de armazenamento	Borracha de pneus reciclados incorporando nano-montmorilonita
(Tian <i>et al.</i> , 2018)	Melhorar o desempenho do asfalto em altas temperaturas, resistência ao envelhecimento e estabilidade de armazenamento incorporando nano-montmorilonita entre pó de borracha e asfalto	Pó de borracha de pneus reciclados e nano-montmorilonita
(Shen <i>et al.</i> , 2023)	Estudar os efeitos da adição de nano-montmorilonita e carbono negro ao asfalto modificado com SBS (estireno-butadieno-estireno) para melhorar sua resistência à radiação UV e desempenho em altas temperaturas	Nano-montmorilonita e carbono negro preparado a partir da pirólise de pneus descartados

(Sun *et al.*, 2024)

Explorar os efeitos da adição de pó de borracha em asfalto modificado com nanomateriais e comparar com asfalto modificado com copolímero termoplástico

AAT (nanomaterial de tecnologia avançada americana “activated attapulgite”), uma argila natural ativada modificada, pó de borracha CRP (“crumo rubber powder”) proveniente de pneus reciclados e SBS (estireno-butadieno-estireno)

(Lyu *et al.*, 2023)

Investigar as alterações químicas em microescala nos ligantes asfálticos durante o envelhecimento térmico e UV, bem como avaliar o impacto de modificações com óleos bioativos e borracha triturada para mitigar o envelhecimento

Asfalto e suas modificações com borracha triturada e óleos bioativos

Fonte: Construção do Autor (2025).

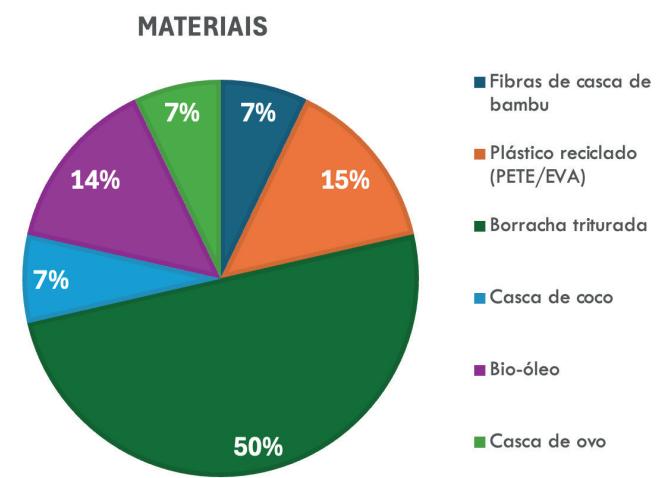
3.2 USO DA NANOTECNOLOGIA EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

A nanotecnologia vem proporcionando a melhoria de diversos materiais utilizados no cotidiano, e sua aplicação em pavimentação asfáltica representa um avanço significativo, pois permite construir pavimentos mais resistentes à deformação permanente, à trinca por fadiga, a fissuração térmica e à ação da água (Santos *et al.*, 2015). Além disso, a modificação de asfalto com nanomateriais normalmente não requer o uso de instrumentos sofisticados. Os nanomateriais possuem características peculiares que os tornam adequados como aditivos em asfalto (Haq *et al.*, 2020), especialmente no aumento do desempenho térmico e na redução da suscetibilidade de temperatura de pavimentos asfálticos.

Em nível estrutural, a atuação dos nanomateriais ocorre principalmente pela enorme razão superfície/volume dessas partículas. Essa maior área superficial aumenta os pontos de contato entre o ligante e o modificador, favorecendo interações físico-químicas mais intensas, maior adsorção de componentes do betume e a formação de redes internas de reforço (Crucio *et al.*, 2019). Como exemplo, Zhou *et al.*, (2023), demonstraram que nanopartículas de sílica podem interagir com moléculas do asfalto formando ligações superficiais estáveis, resultando em melhor adesão, estabilidade térmica e maior capacidade de recuperação após deformações. Da mesma forma, argilas nanomodificadas têm sido empregadas para promover maior estabilidade de armazenamento e melhor compatibilidade entre borracha e ligante, evitando separação de fases (Crucio *et al.*, 2019). Portanto, mesmo quando provenientes de resíduos recicláveis ou reaproveitados, o principal benefício não vem apenas do tipo de resíduo, mas do fato de ele estar na escala nanométrica, pois é esse tamanho extremamente reduzido que permite ao material se integrar de forma mais íntima com a matriz asfáltica como um todo, atuando no reforço de sua estrutura interna.

Na figura 2 são demonstrados os principais tipos de nanomateriais reutilizáveis identificados nos estudos desta revisão, evidenciando como a incorporação de materiais reciclados em escala nanométrica pode contribuir para o reforço estrutural e para a melhoria do desempenho dos pavimentos.

Figura 2 - Tipos de materiais reutilizáveis presentes nos estudos selecionados para esta revisão.



Fonte: Construção dos autores (2025)

A partir da análise dos artigos selecionados, as discussões foram organizadas em quadro subtemas principais, conforme os tipos de materiais reaproveitados e sua aplicação na nanotecnologia asfáltica. Esta divisão tem como objetivo facilitar a compreensão dos avanços e desafios de cada abordagem.

3.2.1 Plásticos e polímeros reciclados

O estudo de Al-Hosainat *et al.*, (2024) mencionaram o uso de tereftalato de polietileno reciclado (rPETE) utilizado como um modificador a um ligante asfáltico nas propriedades reológicas e mecânicas do ligante modificado, bem como no comportamento de aglomeração entre o rPETE e o ligante em um nível multiescala. Os resultados indicam que a inclusão de rPETE no ligante asfáltico melhorou as propriedades de rigidez do ligante modificado em comparação com aquelas do ligante asfáltico de controle. Além disso, os ligantes modificados com rPETE mostraram superfícies mais ásperas do que o ligante de controle. A adição de rPETE ao ligante aumentou os valores do módulo reduzido e da energia de ligação em comparação com os do ligante de controle.

Zhang *et al.* (2022) utilizaram copolímero de etileno-acetato de vinila (EVA) reciclado, obtido de embalagens plásticas, combinado com óxido de grafeno (GO), com o objetivo de melhorar as propriedades reológicas, térmicas e a estabilidade do ligante asfáltico. A modificação física com GO favoreceu a dispersão do EVA, resultando em uma estrutura mais homogênea e estável, sem reações químicas adversas, oferecendo uma alternativa promissora, sustentável e de baixo custo.

De forma complementar, Al-Qadi *et al.* (2022) investigaram o uso de rPETE (polietileno tereftalato reciclado) como aditivo sustentável em ligantes asfálticos, focando especialmente em propriedades mecânicas e resistência ao envelhecimento. O rPETE demonstrou melhorar a rigidez e o desempenho térmico do asfalto, sem comprometer significativamente as propriedades em baixas

temperaturas. Esses estudos evidenciam que a combinação de plásticos reciclados com nanotecnologia, como o uso de GO, representa um avanço importante para o desenvolvimento de asfaltos modificados mais duráveis, eficientes e ambientalmente responsáveis.

3.2.2 Materiais não convencionais

Jeffry e colaboradores (2019), utilizaram cinzas de carvão nanoestruturadas a partir de casca de coco residual. Os testes indicaram que adicionar as cinzas de casca de coco ao betume melhorou a rigidez do ligante em até 47% e aumentou significativamente o ponto de amolecimento em até 12% em comparação com o ligante virgem, melhorando a resistência à formação de sulcos até que uma temperatura de 76% fosse atingida.

O estudo de Ji e colaboradores (2021), investiga os efeitos dos resíduos de casca de ovo reciclado na modificação das propriedades físicas, químicas e a macroestruturação do asfalto, visando promover melhorias na sustentabilidade na engenharia de pavimentos. Os resultados indicaram que a adição da casca de ovo aumentou a dureza e a estabilidade térmica do asfalto, embora reduza sua ductilidade. A análise microscópica revelou que o pó de casca de ovo possui uma estrutura rugosa, enrugada e porosa, o que favorece sua integração ao asfalto. No nível nanoestrutural, a modificação com casca de ovo altera a morfologia do asfalto, modificando as chamadas “estruturas em formato de colmeia” e influenciando sua maturidade, tamanho e distribuição. Os achados do estudo sugerem que a reutilização de resíduos de casca de ovo pode representar uma abordagem viável para melhorar a durabilidade e sustentabilidade do asfalto, contribuindo para a redução do impacto ambiental na pavimentação viária.

Zhang e colaboradores (2024), investigaram a modificação de fibras de casca de bambu com nano-SiO₂, visando aprimorar sua resistência mecânica e estabilidade térmica das argamassas asfálticas. As fibras foram submetidas a modificações químicas utilizando hidróxido de sódio (NaOH), agente de acoplamento KH570 e nanopartículas de sílica (nano-SiO₂). Os efeitos dessas modificações foram analisados em relação à absorção de óleo, estabilidade térmica e resistência à deformação da mistura asfáltica. Os resultados indicaram que a modificação com NaOH aumentou a porosidade e a rugosidade superficial das fibras, enquanto a aplicação de KH570 e das nanopartículas de SiO₂ melhoraram a compatibilidade com o asfalto, promovendo maior adesão e estabilidade, demonstrando uma melhor resistência à formação de sulcos em altas temperaturas. Já em comparação com as fibras de lignina, as fibras de bambu modificadas demonstraram um desempenho competitivo, destacando-se como alternativa sustentável para engenharia rodoviária. Os resultados sugerem que o uso de fibras de casca de bambu tratadas com nano-SiO₂ pode ser uma abordagem promissora para a melhoria das propriedades mecânicas e térmicas do asfalto.

O uso de materiais não convencionais contribui para a rigidez e a estabilidade térmica do asfalto. Essas alternativas sustentáveis oferecem melhorias notáveis nas propriedades mecânicas e

podem ser aplicadas como modificadores eficientes de ligantes asfálticos, promovendo a reciclagem e o uso de resíduos

3.2.3 Biomateriais e bioativos modificados com nanotecnologia

Estudos com bioligantes estão cada vez mais presentes na literatura e na prática, visando modificações do cimento asfáltico e, também, aumentar a sustentabilidade da pavimentação, muitos sendo utilizados como elementos para produzir misturas mornas. Como exemplo o estudo de Ahmed *et al.*, (2022), que sintetizaram um nanocompósito biopolimérico magnético com quitosana adicionada ao asfalto, a adição do nanocompósito melhorou significativamente as propriedades físicas, mecânicas e reológicas do asfalto, aumentando o módulo de cisalhamento complexo, o ângulo de fase e a resistência ao alastramento. Além disso, a resistência química do asfalto modificado foi aprimorada em comparação com o asfalto não modificado. O nanocompósito também demonstrou potencial para ser utilizado em revestimentos e na indústria de tintas, devido às suas excelentes propriedades

Outro estudo de Ren *et al.*, (2020), utilizou cinco tipos de nanopartículas incluindo SiO_2 , CaCO_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 e ZnO , as quais são selecionados para a preparação de ligantes de bioasfalto por meio de decomposição de pó de serragem modificados. Os resultados revelam que o desempenho em alta temperatura e a resistência ao envelhecimento dos ligantes e misturas de bioasfalto nano-modificados são melhorados em dosagens de nanopartículas aumentadas, enquanto seu desempenho em baixa temperatura é ligeiramente enfraquecido.

Por fim, o estudo de Lyu *et al.*, (2023), investiga a modificação do asfalto com borracha triturada e óleos bioativos derivados de óleo de cozinha, para melhorar as propriedades dos ligantes asfálticos, além disso o estudo investiga os efeitos de envelhecimento térmico e UV nos ligantes asfálticos, esse envelhecimento térmico refere-se à degradação do material causado por exposição prolongada ao calor. Os resultados mostraram que a adição melhora a resistência ao envelhecimento térmico, mas reduz a resistência ao envelhecimento UV em comparação com o asfalto base, no entanto a bio-modificação da borracha com bio-óleos ajudou a melhorar a resistência ao envelhecimento UV, esse envelhecimento seria o desgaste causado por exposição à radiação ultravioleta, que gera fotodegradação, descoloração, fragilidade e rachaduras. Revelou também que tanto o envelhecimento térmico quanto o UV alteram significativamente a rugosidade e as microestruturas do asfalto base, mas a presença de borracha triturada e bio-óleos aumenta a estabilidade dessas características.

Os biomateriais, como o quitosana e os bio-óleos, oferecem uma solução sustentável ao melhorarem a adesão e a durabilidade do asfalto. A nanotecnologia aplicada a esses biomateriais traz benefícios tanto em termos de estabilidade quanto de redução de impacto ambiental, como observado nas melhorias do desempenho e resistência ao envelhecimento.

3.2.4 Resíduos de pneus

Um estudo de Tian *et al.*, (2018), investigou o impacto da adição de nano-montmorilonita em asfalto-borracha. Os resultados mostraram que a incorporação reduziu a penetração e a ductilidade a 5°C, enquanto aumentou o ponto de amolecimento e a viscosidade a 135°C, melhorando o desempenho em altas temperaturas e reduzindo-o em baixas temperaturas. Além disso, a estabilidade de armazenamento do asfalto foi aprimorada, sugerindo que a nano-montmorilonita e asfalto modificado composto de pó de borracha, melhora a compatibilidade entre as partículas de borracha e o asfalto, conferindo-lhe propriedades mais robustas e uma melhor performance térmica e estrutural.

Outro estudo de Yu *et al.*, (2018), avaliou a viabilidade de nanoargilas de nano-montmorilonita pura misturadas com dosagens de borracha asfáltica. A adição de nanoargila aumentou ligeiramente a viscosidade da borracha asfáltica, na estabilidade de armazenamento do ligante de borracha asfáltica, e a nano-montmorilonita pura, apresentou o efeito mais significativo no aumento da estabilidade de armazenamento. As descobertas do estudo revelaram que a nanoargila pode ser incorporada ao ligante para aumentar sua estabilidade.

O estudo de Shen *et al.*, (2023) explorou os efeitos da adição de nano-montmorilonita e negro de fumo produzido a partir do pó de pneus, a pesquisa indica que tanto a nano-montmorilonita quanto o negro de fumo melhoram o desempenho em alta temperatura e a resistência ao envelhecimento UV do asfalto modificado por compósito. No entanto, ambos os materiais têm impacto negativo no desempenho em baixa temperatura e na fadiga do asfalto.

O estudo de Sun *et al.*, (2024), foi baseado em um asfalto nano-AAT (American Advanced Technology) modificado com pó de borracha triturada. Os resultados mostraram que o asfalto modificado teve uma melhor rigidez, desempenho em alta temperatura e resistência ao envelhecimento, porém não foi eficaz em baixas temperaturas.

Já o estudo de Krasnovskikh *et al.*, (2022), foi explorar o uso de tratamento de pressão termoquímica de resíduos de pneus de borracha na presença de óleo contendo oxigênio, permitindo a obtenção de um produto nanoestruturado compatível com betume, para posterior utilização do modificador resultante na produção de concreto asfáltico.

Outro estudo de Han *et al.*, (2022), investida o comportamento viscoelástico de asfaltos modificados com borracha reciclada e nanopartículas, como nanotubos de carbono e nanossílica incorporadas à asfalto modificado com borracha triturada de pneu, o objetivo foi compreender como esses aditivos afetam a elasticidade do material ao longo do tempo, especialmente em altas temperaturas. O estudo indicou que a adição de nanopartículas, especialmente os nanotubos de carbono, aumentou significativamente o módulo de armazenamento do material, indicando maior elasticidade. Além disso, o tempo de relaxação (ou seja, o intervalo em que o material responde elasticamente antes de fluir) foi mais longo nos híbridos com nanotubos, o que implica maior a capacidade de recuperação após

deformação. O nanotubo de carbono, melhora consideravelmente a resposta viscoelástica do asfalto, tornando-o mais resistente à deformação permanente.

Os dados levantados nesta revisão evidenciam que a nanotecnologia aplicada à pavimentação asfáltica é uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente estratégica frente às limitações dos asfaltos convencionais, como desgaste precoce, fissuração e baixa resistência a variações climáticas e tráfego intenso. A adição de nanomateriais demonstrou potencial para aumentar a durabilidade, elasticidade, rigidez e estabilidade do asfalto, ao mesmo tempo em que reduz a necessidade de intervenções frequentes de manutenção. Sob a perspectiva da sustentabilidade, a combinação entre nanomateriais e resíduos reaproveitados, como plásticos, biomateriais, materiais não convencionais e pneus, fortalece o vínculo da engenharia rodoviária com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente nos eixos de infraestrutura resiliente (ODS 9), cidades sustentáveis (ODS 11) e ação climática (ODS 13).

Cada subárea analisada apresenta contribuições específicas: os plásticos reciclados melhoram as propriedades térmicas e mecânicas; os materiais não convencionais, como casca de bambu e casca de ovo, oferecem reforço estrutural e estabilidade térmica; os biomateriais, como bio-óleos e quitosana, agregam melhorias reológicas e baixo impacto ambiental; e os resíduos de pneus, associados a nanopartículas, ampliam a elasticidade e a resistência ao envelhecimento térmico e UV. Em conjunto, essas abordagens não apenas demonstram a viabilidade do uso da nanotecnologia, mas também indicam uma mudança de paradigma no setor de pavimentação, apontando para estradas mais duráveis, econômicas e alinhadas às demandas de sustentabilidade global.

3.3. PERSPECTIVAS FUTURAS E DESAFIOS

Apesar dos avanços observados, autores como Yang e Tighe (2013) destacam que a maior parte dos estudos continua restrita a escalas laboratoriais, não havendo dados suficientes de desempenho em rodovias reais ou em condições ambientais variadas. Shah e Mir (2020) reforçam que ainda não existe padronização de metodologias para caracterização e comparação entre diferentes tipos de nanocargas, o que dificulta a definição de parâmetros técnicos universais. Outro ponto importante refere-se ao custo-benefício: embora muitas formulações apresentem excelente desempenho técnico, ainda faltam estudos de viabilidade econômica em escala industrial. De forma semelhante, Alizadeh *et al.* (2023) pontuam que avaliações mais completas do ciclo de vida são essenciais para confirmar se os ganhos de sustentabilidade observados em laboratório realmente se mantêm ao longo de toda a vida útil do pavimento.

Estudos de revisão também reforçam esses desafios, além das lacunas de escala real já descritas, outros autores destacam a falta de padronização de ensaios e caracterização (Wang *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020), a incerteza sobre a resposta em longo prazo dos nanomodificadores em tráfego e

em condições reais de envelhecimento (Liu *et al.*, 2021), e a necessidade de integrar custos, ciclo de vida completo e impacto ambiental real para confirmar a sustentabilidade dessas soluções (Alizadeh *et al.*, 2023).

Nesse sentido, pesquisas futuras devem avançar para testes em campo, análises econômicas integradas e abordagens de avaliação do ciclo de vida, a fim de consolidar a nanotecnologia como solução escalável, tecnicamente robusta e ambientalmente validada para pavimentação.

4. CONCLUSÃO

A literatura analisada confirma que a nanotecnologia possui potencial concreto para transformar a pavimentação asfáltica, especialmente quando associada ao aproveitamento de materiais recicláveis e fontes renováveis. Mais do que promover melhorias pontuais, essa abordagem aponta para uma mudança de paradigma na formulação dos ligantes asfálticos, ao incorporar nanomateriais capazes de elevar significativamente a resistência, a durabilidade e a adaptação às variações climáticas e às demandas crescentes de tráfego. Os avanços identificados demonstram que a nanotecnologia contribui para a melhoria das propriedades térmicas, mecânicas e reológicas do asfalto, resultando em pavimentos mais estáveis e com maior vida útil. Tais benefícios reduzem a necessidade de manutenções frequentes, representando não apenas ganhos técnicos, mas também vantagens econômicas relevantes.

Além disso, destaca-se a contribuição direta para a sustentabilidade, seja pela redução de resíduos sólidos, pela valorização de insumos alternativos ou pelo fortalecimento da economia circular. Nesse contexto, a aplicação da nanotecnologia em pavimentos asfálticos se mostra não apenas viável, mas estratégica para alinhar a engenharia rodoviária aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 9 (indústria, inovação e infraestrutura), o ODS 11 (cidades e comunidades sustentáveis) e o ODS 13 (ação contra a mudança global do clima).

Dessa forma, a nanotecnologia se consolida como um recurso essencial para o futuro da infraestrutura urbana e rodoviária, representando um caminho promissor para o desenvolvimento de estradas mais duráveis, resilientes, sustentáveis e economicamente vantajosas, capazes de atender às necessidades atuais e futuras da sociedade.

REFERÊNCIAS

- AHMED, H. A. *et al.* Facile Synthesis and Characterization of Magnetic Biopolymer Nanocomposite and Its Application for Preparing Novel Bioasphalt Coating Binder. *Egyptian Journal of Chemistry*., 2022.

AL-HOSAINAT. *et al.* Nano-Scale and Macro-Scale Characterizations of the Effects of Recycled Plastics on Asphalt Binder Properties. **Buildings**, 2024.

ALIZADEH, S. *et al.* Misturas asfálticas sustentáveis: aumentando o impacto ambiental pela substituição parcial de agregados finos por pó de borracha e modificação de betume usando Nano-SiO₂. **International Journal of Pavement Engineering**, 2023.

BARBOSA, R. *et al.* Characterization of bentonite clay and synthesis of organoclay for polymer nanocomposites applications part. II. **Cerâmica**, 2012.

CHIU, C-T. *et al.* Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. **Resources, Conservation and Recycling**, 2008.

CLIMAFRIO, Infraestrutura comprometida: chuvas afetaram mais de 80% das estradas no RS. Disponível em: <https://climainfo.org.br/2024/06/03/infraestrutura-comprometida-chuvas-afetaram-mais-de-80-das-estradas-no-rs/>. Acesso em: 24 jan. 2025.

CRUCHO, J. M. L. *et al.* Avaliação da durabilidade de concreto asfáltico modificado com nanomateriais pelo método de envelhecimento TEAGE, **Construction and Building Materials**, 214, p. 178-186, 2019.

DISFANI, M. M. *et al.* Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 20, n. 1, p. 170-179, 2012.

FENG, Y. *et al.* Research progress of Organic Modified Montmorillonite. **Advances in Materials**, 2017.

FIROUZINIA, M., SHAFABAKHSH, G. Investigação do efeito da nano-sílica na sensibilidade térmica do HMA usando rede neural artificial, **Construction and Building Materials**, 170, p. 527-536, 2018.

HAMEDI, G., H. Avaliando o efeito da modificação do ligante asfáltico usando nanomateriais nos danos causados pela umidade do asfalto misturado a quente. **Road Materials and Pavement Design**, 18(6), p. 1375-1394, 2017.

HAN, L. *et al.* Mechanism behind Time Dependent Elasticity of Crumb Rubber-Nano-Asphalt Hybrids Using Discrete Relaxation Spectrum. **Journal of Renewable Materials**, 2022.

HUANG, H. *et al.* Nanomaterials for Modified Asphalt and Their Effects on Viscosity Characteristics: A Comprehensive Review. **Nanomaterials** 2024.

JEFFRY, S. N. A. *et al.* Microstructure and physical properties of nano charcoal ash as binder. **Construction Materials**, 2019.

JI, G. *et al.* Study on the Physical, Chemical and Nano-Microstructure Characteristics of Asphalt Mixed with Recycled Eggshell Waste. **Sustainability**, 2021.

KRASNOVSKIKH, M. P. *et al.* Production of a nanostructured bitumen modifier in the reprocessing of automobile tires. **Nanotechnologies in construction**, 2022.

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.

LESSA, O. A. *et al.* New biodegradable film produced from Cocoa Shell Nanofibrils containing bioactive compounds. **JCT Research**, 2021.

LI, B. *et al.* Effect of organo-montmorillonite on the morphology and aging properties of various bitumens. **J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci.**, 2010.

LIU, J. *et al.* Propriedades reológicas de nanoplaças de grafeno estabilizadas com polivinilpirrolidona incorporadas em asfalto modificado com SBS, **Construction and Building Materials**, 298, 123850, 2021.

LYU, L. *et al.* Nanoscale evolution of rubber-oil modified asphalt binder after thermal and UV aging. **Journal of Cleaner Production**, 2023.

MARENKO, J. A. *et al.* O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. **Educação & Ambiente**, v. 20, e44, 2024.

MANSOURKHAKI, A., AGHASI, A. Desempenho de asfalto emborrachado contendo agente anti-tira de nanomaterial líquido, **Construction and Building Materials**, 214, p. 468-474, 2019.

MIHINDUKULASURIYA, S. D. F.; LIM, L. -T. Nanotechnology development in food packaging: A review. **Trends in Food Science & Technology. Special Issue: Nanotechnology in Foods: Science behind and future perspectives**, (2): 149-167, 2014.

MOUSAVINEZHAD, S. H. *et al.* Nano-argila e betume modificado com estireno-butadieno-estireno para melhoria do desempenho de sulcos em misturas asfálticas contendo agregados de escória de aço, **Construction and Building Materials**, 226, p. 793-801, 2019.

MURRAY, H. H. Bentonite Applications. **Developments in Clay Science**, 2006.

NAZARI, H. *et al.* Improving aging resistance and fatigue performance of asphalt binders using inorganic nanoparticles. **Constr. Build. Mater.** 2018.

RAY, S. S. Rheology of polymer/layered silicate nanocomposites. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 2006.

REN, J. *et al.* Investigating the pavement performance and aging resistance of modified bio-asphalt with nano-particles. **Plos One**, 2020.

RATHORE, J. *et al.*, 2024 Brazil floods: Mapping the extent and impacts in Eastern Rio Grande do Sul using geospatial techniques. **Natural Hazards Research**, 2025.

SABRY, Fouad. Nanomateriais. Editora Um Bilhão Bem Informado. Livro digital, 370 p. 2022.

SANTOS, F. C. *et al.*, Sustainability-oriented assessment of pavement technologies: A case study of a heavy-traffic highway in Brazil. **Case Studies in Construction Materials** Volume 20, July 2024.

SHAFABAKHSH, G. *et al.* Resistência à fratura de misturas asfálticas sob carga de modo misto I/II em baixa temperatura: sem e com nano SiO₂, **Construction and Building Materials**, 266, 120954, 2021.

SHAH, P. M.; MIR, M. S. “Aplicação da nanotecnologia na engenharia de pavimentação: uma revisão”, **Canadian Journal of Civil Engineering**, 47(9), p. 1037-1045, 2020.

SHEN, Q. *et al.* Preparation and Performance Test of UV Resistant Composite-Modified Asphalt. **Coatings**, 2023.

SUN, L. *et al.* Hysical, rheological and microscopic properties of AAT nanomaterial/crumb rubber powder composite-modified asphalt and SBS-modified asphalt. **Plos One**, 2024.

TIAN, X. *et al.* Multiscale Study on the Effect of Nano-Organic Montmorillonite on the Performance of Rubber Asphalt. **Journal of Nanomaterials**, 2018.

THILAKSHAN, T., BANDARA, S. Identification of Relevant Sustainable Transportation Links to Sustainable Development Goals (SDGs) in the National Context. 2019.

VAMEGH, M. *et al.* Avaliação de desempenho da resistência à fadiga de misturas asfálticas modificadas por misturas de polímeros SBR/PP e SBS, **Construction and Building Materials**, 209, p. 202-214, 2019.

ZHANG, S. *et al.* Investigação de anti-ag-Mecanismo de modificação de asfalto modificado com nanomateriais multidimensionais por FTIR, RMN e GPC, **Construction and Building Materials**, 305, 124809, 2021.

ZHANG, M. *et al.* Modification of Asphalt Modified by Packaging Waste EVA and Graphene Oxide. **Frontiers**, 2022.

ZHANG, N. *et al.* Performance of Bamboo Bark Fiber Asphalt Mortar Modified with Surface-Grafted Nano-SiO₂. **Polymers** 2024.

ZHOU, S. *et al.*, Influence of fumed silica nanoparticles on the rheological behaviour of bitumen. **Construction and Building Materials**, vol. 442, 123348, 2023.

WANG, R. *et al.* Estudo experimental sobre mecanismo, envelhecimento, reologia e desempenho de fadiga de ligantes asfálticos modificados com nanomaterial de carbono/SBS, **Construction and Building Materials**, 268, 121189, 2021.

WANG, H. *et al.* Efeito das nanoargilas na suscetibilidade à umidade do ligante asfáltico modificado com SBS, **Advances in Materials Science and Engineering**, 2020.

YANG, J; TIGHE; S. A review of advances of Nanotechnology in asphalt mixtures. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 96, n. 6, p.1269-1276, 2013.

YANG, X. *et al.* A review of nano layered silicate technologies applied to asphalt materials. **Road Materials and Pavement Design**, 2020.

YU, J. *et al.* Modification of Asphalt Rubber with Nanoclay towards Enhanced Storage Stability. **Materials**, 2018.