

MISTURAS ASFÁLTICAS INTELIGENTES: MITO OU REALIDADE?

Iran Rocha Segundo^{a,b}
Orlando Lima Jr.^b
Elisabete Freitas^b
Verônica TF Castelo Branco^c
Salmon Landi Jr.^d
Manuel Filipe Costa^e
Joaquim Carneiro^b

^aDepartamento de Engenharia Civil, ISISE, Universidade do Minho, Campus Azurém, Guimarães, Portugal

^bCentro de Física das Universidades do Minho e do Porto (CF-UM-UP), Campus Azurém, Guimarães, Portugal

^cDepartamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil

^dInstituto Federal Goiano, Rio Verde, GO, Brasil

^eCentro de Física das Universidades do Minho e do Porto (CF-UM-UP), Campus Gualtar, Braga, Portugal

RESUMO

A finalidade geral dos pavimentos rodoviários consiste na capacidade de resistir ao tráfego rodoviário e as ações meteorológicas, garantindo condições de rolamento seguras e confortáveis, com o menor dispêndio possível de recursos e danos sobre o meio ambiente. Um pavimento rodoviário é considerado inteligente quando possui funcionalidades adicionais ou capacidade de reagir a um estímulo externo. Estas aptidões podem ser incorporadas através da utilização de diversos materiais, por exemplo: nano/micropartículas (semicondutores e microcápsulas), materiais de mudança de fase, corantes e fibras. Dentre as novas capacidades, é possível destacar: fotocatalise, superhidrofobicidade, autolimpeza, degelo/anti-gelo, autorreparação, termocromismo e armazenamento de energia térmica latente. Algumas destas novas aptidões resultam da implementação de técnicas como: modificação de ligante asfáltico, revestimento por pulverização, espalhamento e incorporação volumétrica de componentes. Este trabalho revê as novas capacidades conferidas às misturas asfálticas, expõe informações sobre métodos de funcionalização, ensaios, materiais empregados e resultados e fornece recomendações para trabalhos futuros.

ABSTRACT

The purpose of road pavements is to withstand road traffic and weather loads, while ensuring safe and comfortable driving conditions with the least possible expenditure of resources and damage to the environment. A road pavement is considered smart when it has additional abilities or capacity to react to an external stimulus. These abilities can be incorporated through various materials: nano/microparticles (semiconductors and microcapsules), phase change materials, dyes, and fibers. Among the new abilities added to asphalt mixtures are photocatalysis, superhydrophobicity, self-cleaning, de-icing/anti-icing, self-healing, thermochromism, and latent heat thermal energy storage. Some of these new capabilities result from different techniques, such as asphalt binder modification, spray coating, spreading, and volume incorporation of components. The present work reviews the new abilities conferred to asphalt mixtures, exposes the information about functionalization methods, tests, materials used and results, and provides recommendations for future work.

1. INTRODUÇÃO

A ideia do desenvolvimento do concreto inteligente e multifuncional foi proposta pela primeira vez no final de 1980 por pesquisadores japoneses (Han *et al.*, 2017). Após extensas pesquisas sobre o projeto, fabricação, caracterização, desempenho e mecanismos, vários tipos de concreto de cimento inteligente e multifuncional foram empregados com sucesso em escala real (Han *et al.*, 2017). No caso de misturas asfálticas, o conceito é novo, e em termos de experiências práticas (trechos experimentais), existem poucas aplicações (Segundo *et al.*, 2021).

Com base na definição de Han (Han *et al.*, 2017), o concreto inteligente e multifuncional ou é um material com características diferentes das originais ou pode responder a estímulos externos,

tais como temperatura e estado de tensão. Este concreto pode ser composto de cimento, asfalto ou polímeros. Estas habilidades podem ser classificadas em termos de inteligência ou função tais como: inteligência, ótica, elétrica, mecânica e proteção/absorção de ondas/radiação eletromagnética, armazenamento de energia e aspectos relacionados à água. Este concreto inteligente é projetado através de processamento especial, projeto de composição, introdução de novos materiais funcionais, ou modificação da microestrutura dos materiais originais.

Dessa forma, esta revisão da literatura visa rever e discutir as principais capacidades conferidas às misturas asfálticas, ou seja, fotocatalítica, superhidrofóbica, autolimpeza, degelo/anti-gelo, autorreparação, termocrômica e armazenamento de energia térmica latente. A sua contextualização, métodos de funcionalização, principais conclusões e limitações são apresentados e discutidos ao longo das seções seguintes.

2. CAPACIDADE FOTOCATALÍTICA

Nos últimos anos, a capacidade fotocatalítica das misturas asfálticas tem sido um dos tópicos mais pesquisados entre as novas capacidades, pois estão diretamente associadas aos benefícios relacionados com a segurança viária (por exemplo, a fotodegradação de compostos orgânicos adsorvidos nas superfícies das rodovias). Ademais, promove ganhos ao meio ambiente e à saúde humana através da redução de gases tóxicos resultantes das emissões gasosas geradas por fontes móveis (veículos) no setor de transportes.

As rodovias se configuram como espaços ideais para a promoção da redução da poluição atmosférica devido às grandes áreas pavimentadas e à proximidade entre as vias e os gases poluentes (principalmente os gases oriundos de escapeamentos dos veículos automotores), especialmente em áreas urbanas (Toro *et al.*, 2016). Alguns materiais semicondutores, tais como o TiO_2 e o ZnO , são comumente usados para a funcionalização de misturas asfálticas para fins fotocatalíticos (Carneiro *et al.*, 2013; Rocha Segundo *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2021). O TiO_2 é o material semicondutor mais frequentemente utilizado para a realização da fotocatalise devido à sua elevada capacidade de promoção da fotodegradação de poluentes, a sua estabilidade química e a disponibilidade na crosta terrestre (0,44% de sua composição química elementar é titânio), entre outras características (Emsley, 2011; Nakata e Fujishima, 2012; Westerhoff *et al.*, 2011).

Em relação aos métodos de funcionalização dos pavimentos asfálticos fotocatalíticos, existem quatro abordagens principais que se diferem no processo de aplicação dos nano/micromateriais utilizados: i) revestimento por pulverização (Cao *et al.*, 2017; Carneiro *et al.*, 2013; Tang *et al.*, 2017), ii) incorporação de volume (Cao *et al.*, 2017; Carneiro *et al.*, 2013), iii) modificação do ligante asfáltico (Hassan *et al.*, 2012), e iv) espalhamento (Cao *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017). A modificação do ligante asfáltico é realizada anteriormente à produção de misturas asfálticas de modo que as nano/micropartículas de materiais semicondutores são inseridas no ligante asfáltico. A incorporação em volume é realizada pela adição de partículas (como filler e/ou agregados) durante a fabricação de misturas asfálticas. Os processos de espalhamento e pulverização são realizados sobre a superfície da mistura asfáltica compactada. O método de pulverização é executado utilizando uma pistola de pintura a ar comprimido, enquanto a técnica de espalhamento é realizada pela deposição de uma solução fotocatalítica específica sobre a superfície, semelhante ao tratamento superficial ou utilizando pincéis/vassouras de pintura.

Existem alguns tópicos que ainda devem ser avaliados. A experiência de campo é bastante limitada, e os métodos para imobilizar semicondutores precisam de ser melhor aperfeiçoados. A eficácia da imobilização deve ser avaliada, e novas técnicas devem ser desenvolvidas para melhorá-las. Outras pesquisas são necessárias, tais como a funcionalização de diferentes tipos de misturas asfálticas, a influência da funcionalização na morfologia da superfície e seu desempenho mecânico, o efeito da taxa de pulverização, o efeito da radiação UV e da intensidade de luz visível, e a influência da umidade relativa do ar e da taxa de fluxo de poluentes. Além disso, é importante realizar estudos referente ao custo/benefício necessário para promover a implementação desta técnica.

3. CAPACIDADE SUPERHIDROFÓBICA

A água é o líquido mais abundante e vital existente na terra. Devido às interações intermoleculares, a molhabilidade é definida como a capacidade de um líquido de manter contato com uma determinada superfície sólida. Deste modo, o controle desta propriedade superficial é crucial para muitas aplicações (Homem *et al.*, 2017; Kempinski *et al.*, 2017; Nascimento *et al.*, 2012; Rocha Segundo *et al.*, 2018; Tadanaga *et al.*, 2000).

No que concerne à molhabilidade, a superfície de qualquer material pode ser classificada como superhidrofílica, hidrofílica, hidrofóbica e superhidrofóbica. A classificação é baseada na medida do ângulo de contato (do inglês, *Contact Angle* - CA) entre uma gota d'água e a superfície. A capacidade superhidrofóbica é alcançada quando o CA é superior a 150° (Lin *et al.*, 2018). Por outro lado, a capacidade superhidrofílica é atingida se o CA estiver próximo de 0° (Carneiro *et al.*, 2016; Drelich e Chibowski, 2010). Alguns autores afirmaram que o CA deve ser inferior a 5° ou 10° para desenvolver uma superfície superhidrofílica (Drelich e Chibowski, 2010).

No caso de materiais superhidrofóbicos, o efeito de autolimpeza baseia-se na capacidade das gotas de água de transportar partículas de sujeira, semelhante ao efeito flor de lótus, o que corresponde a uma abordagem biomimética para aplicações de materiais. Superfícies superhidrofílicas também são autolimpantes. Neste caso, as gotas de água espalham-se sobre a superfície, facilitando a limpeza durante os períodos de ocorrência de chuva (Son *et al.*, 2012).

Alguns nano/micromateriais (com granulometria entre 6 nm e 45µm) têm sido aplicados sobre misturas asfálticas, nomeadamente: TiO₂, ZnO, SiO₂ modificado, polímero contendo flúor modificado com nano-CaO, hidróxidos duplos em camadas de magnésio e alumínio (Mg-Al LDHs) e PTFE (Rocha Segundo *et al.*, 2020). Normalmente, são preparadas soluções (ou dispersões) contendo as nano/micropartículas que são aplicadas por um ou dois processos de pulverização sobre a superfície da mistura asfáltica. No caso de serem usados dois processos de pulverização, a camada aglutinante é aplicada e em seguida as partículas dispersas são pulverizadas sobre a essa camada (Arabzadeh *et al.*, 2016).

Apesar do efeito que se espera na segurança viária, apenas alguns estudos relativos a misturas asfálticas relataram a capacidade superhidrofóbica dos pavimentos rodoviários. Esta funcionalização pode proporcionar uma rápida drenagem horizontal, evitar a formação de gelo, diminuir a sensibilidade aos danos causados pela umidade, e ainda promover a limpeza de

superfícies empoeiradas. Além disso, a imobilização das partículas continua a ser um desafio. Esta capacidade deve ser aplicada em escala real para verificar a sua eficácia.

4. CAPACIDADE DE DEGELAMENTO E DE AUTODERRETIMENTO DO GELO

Em países muito frios e durante a estação de inverno, é usual observar uma rápida formação de gelo na superfície do pavimento, contribuindo para a redução do atrito e, portanto, resultando em acidentes rodoviários, congestionamento e perdas econômicas (Shan *et al.*, 2021). Para evitar este problema, a gestão rodoviária geralmente utiliza soluções de degelo ou sal clorídrico para derreter a neve/gelo sobre a superfície do pavimento, o que requer o dispêndio de significativos recursos financeiros (Liu *et al.*, 2014; Peng *et al.*, 2015). A aplicação de aditivos anticongelantes ou de autoderretimento em misturas asfálticas pode apresentar vantagens como a prevenção de congestionamentos quando comparada aos métodos convencionais. Normalmente, existem duas formas de se gerar um pavimento asfáltico com esta capacidade: i) usando aditivos anticongelantes como modificador ou filer (para autoderretimento), e ii) usando um material condutor como agregados ou fibras (para degelo).

A incorporação de aditivos anticongelantes em pavimentos asfálticos cria uma camada líquida anticongelante entre o gelo/neve e a superfície, o que contribui para retardar ou evitar a formação de gelo, facilitando o processo de derretimento da neve e do gelo e, conseqüentemente, mantendo o atrito original das misturas asfálticas em condições molhadas. Conseqüentemente, alguns aditivos têm sido aplicados às misturas asfálticas como modificadores de ligante asfáltico, como o formato de potássio (HCOOK) com uma matriz de estireno-butadieno-estireno (SBS), Mg-Al Cl⁻ duplo hidróxido em camadas (LDH), fileres comerciais, como o IceBane (composto de sal de cloreto - CaCl₂ e NaCl) e o Mafilon (composto de NaCl, SiO₂, MgO e CaO) (Rocha Segundo *et al.*, 2021). Os materiais mais comumente utilizados são os anti-congelantes à base de cloro (Rocha Segundo *et al.*, 2021). Outras opções também foram investigadas: i) líquidos: fluidos à base de glicol e fluidos à base de acetato de potássio e ii) sólidos: uréia, acetato de cálcio e magnésio (CMA), formato de sódio (NaF) e acetato de sódio (NaAc) (Rocha Segundo *et al.*, 2021).

O efeito Joule é um fenômeno físico que justifica a incorporação de materiais condutores em misturas asfálticas para facilitar a remoção de neve e/ou evitar a formação de gelo sobre a superfície do pavimento. Este efeito pode ser descrito pela ocorrência de uma corrente elétrica passando através do material que pode gerar calor, reduzindo, assim, a acumulação de neve e gelo sobre a superfície da mistura asfáltica (Trigos *et al.*, 2021). Três materiais condutores são utilizados nas misturas asfálticas: i) pós à base de grafite, raspas de alumínio e negro de fumo (do inglês, *carbon black*); ii) fibras, incluindo fibra de carbono (do inglês, *Carbon Fiber* - CF), fibra de aço (do inglês, *Steel Fiber* - SF), palha de aço (do inglês, *Steel Wool* - SW) e nanofibras de carbono (do inglês, *Carbon Nanofiber* - CNF); e iii) agregados condutores como escórias de aço (do inglês, *Steel Slags* - SS) (Pan *et al.*, 2015). Para avaliar a capacidade de degelo, foram analisadas algumas propriedades físicas, como a resistividade elétrica e a condutividade térmica, e o comportamento da mistura asfáltica submetida ao aquecimento por microondas (do inglês, *Microwaves* - MH) (Liu *et al.*, 2014; Luo e Yang, 2015; Ma *et al.*, 2016).

A resistividade do ligante asfáltico é de aproximadamente 10^{11} e 10^{13} Ωm , enquanto que a resistividade da mistura asfáltica está compreendida entre 10^7 e 10^9 Ωm , devido à presença de

agregados e ar, que são classificados como materiais isolantes. Quando alguns materiais como grafite, fibra de aço e CF são adicionados, a resistividade da mistura asfáltica pode ser reduzida para valores compreendidos entre 10 e $10^3 \Omega\text{m}$, melhorando, significativamente, a condutividade elétrica, já que grafite e CF têm uma resistividade elétrica de, aproximadamente, 10^{-6} e $10^{-5} \Omega\text{m}$, respectivamente (Tang *et al.*, 2014). Em geral, a condutividade da mistura asfáltica para esse fim não deve exceder $100 \Omega\text{m}$ (Pan *et al.*, 2015).

O uso de sal para o autoderretimento de pavimentos tem um efeito negativo no desempenho das misturas asfálticas com SF ou grafite. É essencial considerar a oxidação de elementos rodoviários durante o projeto e o desempenho das misturas asfálticas. Os aditivos anticongelantes podem ser usados em combinação com CF para obter adequadas propriedades mecânicas e evitar a formação de neve/gelo. O uso de materiais reciclados, como o SS, é recomendado devido aos seus benefícios ecologicamente adequados e de baixo custo.

5. CAPACIDADE DE AUTORREPARAÇÃO (*SELF-HEALING*)

As patologias típicas de misturas asfálticas convencionais são o trincamento por fadiga e térmico, deformação permanente e dano por ação da umidade (Pan *et al.*, 2015). A capacidade de autorreparação visa auxiliar os materiais a se recuperarem após a ocorrência de fissuras, selando-as. É definida como a capacidade de retornar a um estado ou condição inicial de operação adequada antes da exposição a um ambiente dinâmico, fazendo os ajustes necessários para restaurar a normalidade e/ou a capacidade de resistir à formação de irregularidades e/ou defeitos (Fischer, 2010; Xu *et al.*, 2018). Esta capacidade também é baseada na biomimética dos sistemas biológicos de cicatrização de feridas na pele de organismos vivos (Bhushan, 2009; Diesendruck *et al.*, 2015; Miranda *et al.*, 2020).

O ligante asfáltico é considerado um material autoreparador. Após períodos de repouso, as misturas asfálticas podem recuperar a sua rigidez fechando as microfissuras que se abrem após a solicitação do tráfego (Tabakovic e Schlangen, 2015). As fissuras “cicatrizam”, instantaneamente, após a remoção da carga. Durante este processo, ocorrem dois fenômenos: a recuperação viscoelástica e a cura na área fissurada. O primeiro decorre do rearranjo das moléculas, e a consequência é o molhamento e a interdifusão entre as faces das fissuras. As seguintes etapas explicam o mecanismo de autorreparação: i) ambas as faces de uma nano fenda são molhadas, ii) há ganho de resistência imediato pela coesão interfacial entre as faces da fenda, e iii) há ganho de resistência a longo prazo devido à difusão e randomização (aleatorização) das moléculas de uma face para a outra (Agzenai *et al.*, 2015).

Com a incorporação de materiais como grafite, negro de fumo, fibras de carbono e aço, SW e escórias, e alguns nanomateriais (nanotubos de carbono e nanofibras), as misturas asfálticas melhoram sua condutividade elétrica. Através do aquecimento por indução (do inglês, *Induction Heating* - IH), as fissuras são reparadas, e o efeito de desagregação (perda de agregados) é evitado (Segundo *et al.*, 2021).

Já há relatos de utilização de microondas para aquecer misturas asfálticas; embora sejam rápidas e fáceis de aplicar, o elevado custo associado e a dificuldade de controlar a penetração da energia em profundidade são os maiores inconvenientes desta técnica (Agzenai *et al.*, 2015). Além disso, MH aumenta a temperatura do ligante asfáltico, mas não a dos agregados.

Outras técnicas também são aplicadas para autorreparação, a partir da incorporação de i) microcápsulas com alta percentagem de óleos (malteno), ii) ionômeros, e iii) nanomateriais. A primeira envolve a microencapsulação de uma grande percentagem de óleos de malteno por uma casca, geralmente polimérica. No ligante asfáltico, quando uma fenda atinge as microcápsulas, a casca rompe-se, libertando o promotor da cura, e assim é restaurada a proporção de asfalto/maleno (Li *et al.*, 2020; Su *et al.*, 2016). Esta técnica tem razoável relação entre recuperação e compatibilidade; no entanto, funciona apenas uma vez e deve ser aplicada apenas nas camadas superiores.

A segunda técnica de autorreparação compreende a aplicação de ionômeros, um copolímero termoplástico contendo grupos iônicos (menos de 30% mol) em sua cadeia polimérica. Os polímeros dúcteis podem restituir elasticamente uma fenda para sua posição original. Eles podem ser recuperados várias vezes e proporcionam elevada estabilidade térmica e adequada compatibilidade; no entanto, eles se misturam e se limitam a fissuras de primeiro estágio (Agzenai *et al.*, 2015). O processo de cura é atribuído à atração de ligações de caráter iônico.

Finalmente, existe também a incorporação de nanopartículas para essa finalidade. As nanopartículas deslocam-se em direção à ponta da fenda, estimuladas pela elevada energia superficial, interrompendo sua propagação e, conseqüentemente, curando o material composto (Qiu *et al.*, 2009). Diferentes nanomateriais, tais como a borracha, argila, SiO₂ e TiO₂, já foram utilizados como modificadores de ligante asfáltico para este fim. Além da sua capacidade de autorreparação, estes materiais podem melhorar a adesão entre o ligante asfáltico e os agregados, devido à sua elevada área de superfície específica (Shafabakhsh e Ani, 2015), e melhorar a sensibilidade à água e a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas (Yusoff *et al.*, 2014).

6. CAPACIDADE TERMOCROMÁTICA

O termocromismo é um fenômeno de mudança de cor reversível que ocorre como uma resposta às mudanças de temperatura. Os materiais termocrômicos são classificados como oligômeros conjugados, óxidos metálicos e corantes leucóides (Hu e Yu, 2020; Kim *et al.*, 2018). Nos compostos inorgânicos, as mudanças de cor podem resultar de transições de fase e variações na geometria da coordenação (Wang *et al.*, 2016), enquanto que os compostos inorgânicos podem resultar de reações químicas reversíveis e rearranjos moleculares (Hu *et al.*, 2013).

A aplicação de materiais termocrômicos na Engenharia Civil deve levar em consideração a temperatura de transição. O dióxido de vanádio (VO₂) e os compostos que contêm vanádio foram intensamente estudados; entretanto, as suas temperaturas de transição são muito elevadas para este tipo de aplicação, 68 °C para VO₂ (Wang *et al.*, 2016), e 255 °C para BiVO₄, por exemplo (Kim *et al.*, 2018).

Devido à sua cor preta, os ligantes asfálticos absorvem demasiada energia proveniente da luz solar sob a forma de calor. Durante o verão, a temperatura da superfície dos pavimentos asfálticos pode aumentar até quase 70 °C, impactando na sua durabilidade devido à aceleração dos mecanismos de dano, como o cisalhamento. Em contraste, durante o inverno, as baixas temperaturas promovem a fissuração térmica dos pavimentos asfálticos e a formação de gelo

sobre suas superfícies (Chen *et al.*, 2021; Hu e Yu, 2016; Yu *et al.*, 2020). Neste contexto, é importante efetuar o controle da temperatura da mistura asfáltica, arrefecendo a superfície durante o verão e aquecendo-a durante o inverno. Para a consecução deste objetivo, uma nova capacidade termocrômica foi aplicada às misturas asfálticas utilizando materiais como corantes leuco, para uso como modificadores de ligante asfáltico.

A ilha de calor urbana (do inglês, *Urban Heat Island* - UHI) também pode ser mitigada pelo controle da cor do pavimento asfáltico termocrômico sob condições de elevada temperatura. Pode-se concluir que os materiais termocrômicos podem afetar, positivamente, o desempenho mecânico das misturas ao controlar sua temperatura superficial e melhorar a resistência ao envelhecimento. Para esta nova capacidade, ainda existe pouca experiência, havendo muitas oportunidades para a explorar, nomeadamente o desempenho mecânico, a análise de custos e a sua aplicação visando a segurança viária.

7. CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA DE CALOR LATENTE

Os materiais de mudança de fase (do inglês, *Phase Change Materials* - PCMs) absorvem grandes quantidades de energia quando há excesso e libertam-na quando há um déficit. O PCM reduz os picos de aquecimento e arrefecimento quando aplicado a materiais em diferentes áreas (Guo *et al.*, 2020; Kalnæs e Jelle, 2015; Si *et al.*, 2020). Os PCMs são aplicados na Engenharia Civil, principalmente, em pisos, telhados, paredes e concreto, para melhorar a eficiência energética dos edifícios (reduzindo a energia por área necessária para aquecimento/arrefecimento).

No caso de aplicações em edifícios, o PCM aumenta o conforto térmico devido às flutuações suaves de temperatura nos espaços internos, reduzindo assim o dispêndio da energia necessária para os equipamentos de aquecimento/arrefecimento, ou seja, minimizando a necessidade de utilização de aquecedores e equipamentos de ar-condicionado no inverno e verão, respectivamente. Assim, há benefícios para o meio ambiente porque o consumo de energia das indústrias elétricas diminuirá, resultando em menos emissões.

Quando os PCMs são incorporados em misturas asfálticas, o objetivo principal é evitar a deformação permanente (MeiZhu *et al.*, 2011) e evitar fissuras térmicas ou mudanças rápidas de temperatura devido à redução da magnitude das flutuações de temperatura (He *et al.*, 2013). Além do componente mecânico tratado na pesquisa, outra meta consiste em mitigar a UHI, controlando as trocas de calor entre o pavimento asfáltico e o meio ambiente, o que é uma meta socioambiental (Guan, 2011).

Para o desenvolvimento de materiais com capacidade de armazenamento de energia térmica de calor latente (do inglês, *Latent Heat Thermal Energy Storage* – LHTE), incluindo misturas asfálticas, é essencial ter pelo menos três componentes: i) PCM apropriado com a gama de temperatura desejada de ponto de fusão, ii) superfície de troca de calor apropriada, e iii) recipiente apropriado compatível com o PCM (Sharma *et al.*, 2009).

O encapsulamento PCM poderia ter vantagens tais como maior área de transferência de calor, diminuição da reatividade PCM devido ao ambiente externo, e controle das mudanças no

volume (expansão ou retração) dos materiais de armazenamento quando ocorre a mudança de fase (Cabeza *et al.*, 2011). A cápsula evita interações entre o PCM e o material inteligente (Cabeza *et al.*, 2011), evitando assim problemas mecânicos futuros. Os pesquisadores também podem estudar o uso de PCMs para evitar UHIs.

8. CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi a realização de uma revisão bibliográfica sobre as capacidades das misturas asfálticas inteligentes, nomeadamente: fotocatalise, superhidrofobicidade, autolimpeza, degelo/anti-gelo, autorreparação, termocromismo e armazenamento de energia térmica de calor latente (LHTS).

O desenvolvimento de novas capacidades em misturas asfálticas é alcançado através da aplicação de diferentes materiais, tais como nano/micropartículas (incluindo materiais semicondutores e microcápsulas), fibras, PCM e corantes. Além disso, há um novo potencial para a aplicação de materiais reciclados, tais como escórias de aço (SS), provenientes da indústria siderúrgica.

A transferência de tecnologia de algumas capacidades do contexto laboratorial para as rodovias em campo já é uma preocupação real. No entanto, a construção de pavimentos asfálticos funcionalizados em escala real constitui, ainda, um desafio para a indústria da pavimentação. Este estudo mostrou algumas oportunidades de utilização (incluindo nano/micromateriais), que não requerem melhorias tecnológicas dispendiosas para o funcionamento do pavimento asfáltico. É razoável afirmar que, em breve, um dos setores potenciais para a aplicação em larga escala de nanomateriais é o rodoviário, uma vez que este pode atuar como uma alavanca para promover o dinamismo e o crescimento econômico das indústrias relacionadas com a produção de nanomateriais e a utilização de nanotecnologias. Deste modo, pode-se inferir que a transferência de tecnologias relacionadas com diferentes capacidades ainda não testadas em escala real tem grandes possibilidades de ser bem sucedida. Com a utilização em larga escala de nanomateriais/micromateriais, espera-se uma redução de custos, porque a produção destes materiais é ainda bastante limitada.

Devido à grande área de superfície das rodovias pavimentadas, o processo de lhes proporcionar uma capacidade multifuncional pode proporcionar uma contribuição positiva aos usuários, pois, além de manterem adequada estrutura mecânica e propriedades de superfície que resultam da aplicação de novas capacidades, aportam benefícios ambientais, como por exemplo, capacidade de fotodegradar compostos orgânicos adsorvidos na superfície da rodovia ou mesmo gases tóxicos (NO_x e SO_x) que são liberados dos tubos de escapamento dos veículos rodoviários. As rodovias passariam a ter uma nova função, cabendo-lhes apresentar benefícios em diversos níveis: sociais, ambientais e econômicos.

O desenvolvimento de misturas asfálticas inteligentes já é uma realidade. Vários estudos em laboratório visam a promoção da aplicação de uma nova capacidade no setor de pavimentação rodoviária enquanto alguns estudos, efetuados em trechos experimentais em contexto real, já foram realizados. No entanto, tal como descrito neste trabalho, são ainda requeridos diversos avanços até que se consiga realizar uma adequada transferência de tecnologia para o setor industrial.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) no âmbito dos projetos do Financiamento Estratégico UIDB/04650/2020, do projecto MicroCoolPav EXPL/EQU-EQU/1110/2021, e do projecto NanoAir PTDC/FISMAC/6606/2020. Os autores também agradecem pelo financiamento dos projetos MLC-0191-00144.01.00/22 (Edital Mulheres na Ciência – Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Funcap) e Processo 404978/2021-5, Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 18/2021 - Faixa B - Grupos Consolidados – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agzenai, Y., Pozuelo, J., Sanz, J., Perez, I., e Baselga, J. (2015) Advanced self-healing asphalt composites in the pavement performance field: mechanisms at the nano level and new repairing methodologies. *Recent patents on nanotechnology*, 9(1), 43–50. doi:10.2174/1872208309666141205125017
- Arabzadeh, A., Ceylan, H., Kim, S., Gopalakrishnan, K., e Sassani, A. (2016) Superhydrophobic coatings on asphalt concrete surfaces: Toward smart solutions for winter pavement maintenance. *Transportation Research Record*, 2551(June), 10–17. doi:10.3141/2551-02
- Bhushan, B. (2009) Biomimetics: Lessons from Nature - an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1445–1486. doi:10.1098/rsta.2009.0011
- Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., De Gracia, A., e Fernández, A. I. (2011) Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695. doi:10.1016/j.rser.2010.11.018
- Cao, X., Yang, X., Li, H., Huang, W., e Liu, X. (2017) Investigation of Ce-TiO₂ photocatalyst and its application in asphalt- based specimens for NO degradation. *Construction and Building Materials*, 148, 824–832. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.095
- Carneiro, J., Azevedo, S., Teixeira, V., Fernandes, F., Freitas, E., Silva, H., e Oliveira, J. (2013) Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 38, 594–601. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.005
- Carneiro, J. O., Samantilleke, A. P., Parpot, P., Fernandes, F., Pastor, M., Correia, A., Luís, E. A., Barros, A. A. C., e Teixeira, V. (2016) Visible Light Induced Enhanced Photocatalytic Degradation of Industrial Effluents (Rhodamine B) in Aqueous Media Using TiO₂ Nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 2016, 1–13. doi:10.1155/2016/4396175
- Chen, Z., Zhang, H., Duan, H., e Shi, C. (2021) Improvement of thermal and optical responses of short-term aged thermochromic asphalt binder by warm-mix asphalt technology. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123675. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123675
- Diesendruck, C. E., Sottos, N. R., Moore, J. S., e White, S. R. (2015) Biomimetic Self-Healing. *Angewandte Chemie - International Edition*, 54(36), 10428–10447. doi:10.1002/anie.201500484
- Drelich, J., e Chibowski, E. (2010) Superhydrophilic and superwetting surfaces: Definition and mechanisms of control. *Langmuir*, 26(24), 18621–18623. doi:10.1021/la1039893
- Emsley, J. (2011) *Nature's building blocks: an AZ guide to the elements*. Oxford University Press.
- Fischer, H. (2010) Self-repairing material systems - a dream or a reality? *Natural Science*, 2(8), 873–901. doi:10.4236/ns.2010.28110
- Gao, J., Sha, A., Wang, Z., Tong, Z., e Liu, Z. (2017) Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing. *Journal of Cleaner Production*, 152, 429–442. doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.113
- Guan, B. (2011) Application of asphalt pavement with phase change materials to mitigate urban heat island effect. *2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection*, 2389–2392. doi:10.1109/ISWREP.2011.5893749
- Guo, M., Liang, M., Jiao, Y., Zhao, W., Duan, Y., e Liu, H. (2020) A review of phase change materials in asphalt binder and asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 258, 119565. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119565
- Han, B., Zhang, L., e Ou, J. (2017) *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures*. Springer, Heidelberg. doi:10.1007/978-981-10-4349-9
- Hassan, M. M., Dylla, H., Asadi, S., Mohammad, L. N., e Cooper, S. (2012) Laboratory Evaluation of

- Environmental Performance of Photocatalytic Titanium Dioxide Warm-Mix Asphalt Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(5), 599–605. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000408
- He, L. H., Li, J. R., e Zhu, H. Z. (2013) Analysis on Application Prospect of Shape-Stabilized Phase Change Materials in Asphalt Pavement. *Applied Mechanics and Materials*, 357, 1277–1281. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.1277
- Homem, N. C., Yamaguchi, N. U., Vieira, M. F., Amorim, M. T. S. P., e Bergamasco, R. (2017) Surface modification of microfiltration membrane with GO nanosheets for dyes removal from aqueous solutions. *Chemical Engineering Transactions*, 60, 259–264. doi:10.3303/CET1760044
- Hu, J., Gao, Q., e Yu, X. (2013) Characterization of the Optical and Mechanical Properties of Innovative Multifunctional Thermochromic Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(September), 1239–1247. doi:10.1061/(ASCE)MT
- Hu, J., e Yu, X. (2020) Performance evaluation of solar-responsive asphalt mixture with thermochromic materials and nano-TiO₂ scatterers. *Construction and Building Materials*, 247, 118605. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118605
- Hu, J., e Yu, X. (Bill). (2016) Innovative thermochromic asphalt coating: characterisation and thermal performance. *Road Materials and Pavement Design*, 17(1), 187–202. doi:10.1080/14680629.2015.1068215
- Hu, Z., Xu, T., Liu, P., e Oeser, M. (2021) Developed photocatalytic asphalt mixture of open graded friction course for degrading vehicle exhaust. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123453. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123453
- Kalnæs, S. E., e Jelle, B. P. (2015) Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 94(7491), 150–176. doi:10.1016/j.enbuild.2015.02.023
- Kempinski, M., Jenczyk, J., Jurga, S., e Sliwinska-Bartkowiak, M. (2017) Wetting of nanostructured sapphire and gold surfaces. *Acta Physica Polonica A*, 132(1), 185–188. doi:10.12693/APhysPolA.132.185
- Kim, H., Yoo, K., Kim, Y., e Yoon, S. Y. (2018) Thermochromic behaviors of boron–magnesium co-doped BiVO₄ powders prepared by a hydrothermal method. *Dyes and Pigments*, 149(August 2017), 373–376. doi:10.1016/j.dyepig.2017.09.071
- Li, B., Sun, G., Sun, D., Lu, T., Ma, J., e Deng, Y. (2020) Survival and activation behavior of microcapsules in self-healing asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 260, 119719. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119719
- Lin, Y., Chen, H., Wang, G., e Liu, A. (2018) Recent Progress in Preparation and Anti-Icing Applications of Superhydrophobic Coatings. *Coatings*, 8(6), 208. doi:10.3390/coatings8060208
- Liu, Z., Xing, M., Chen, S., He, R., e Cong, P. (2014) Influence of the chloride-based anti-freeze filler on the properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 51, 133–140. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.057
- Luo, S., e Yang, X. (2015) Performance evaluation of high-elastic asphalt mixture containing deicing agent Mafilon. *Construction and Building Materials*, 94, 494–501. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.064
- Ma, T., Geng, L., Ding, X., Zhang, D., e Huang, X. (2016) Experimental study of deicing asphalt mixture with anti-icing additives. *Construction and Building Materials*, 127, 653–662. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.018
- MeiZhu, C., Jing, H., Wu, S., Lu, W., e Xu, G. (2011) Optimization of Phase Change Materials Used in Asphalt Pavement to Prevent Rutting. *Advanced Materials Research*, 219–220(May), 1375–1378. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.219-220.1375
- Miranda, C. S., Ribeiro, A. R. M., Homem, N. C., e Felgueiras, H. P. (2020) Spun biotextiles in tissue engineering and biomolecules delivery systems. *Antibiotics*, 9(4). doi:10.3390/antibiotics9040174
- Nakata, K., e Fujishima, A. (2012) TiO₂ photocatalysis: Design and applications. *Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13(3), 169–189.
- Nascimento, J. H. O., Pereira, P., Freitas, E., e Fernandes, F. (2012) Development and characterization of a superhydrophobic and anti-ice asphaltic nanostructured material for road pavements. *7th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*. At Auckland, New Zealand.
- Pan, P., Wu, S., Xiao, F., Pang, L., e Xiao, Y. (2015) Conductive asphalt concrete: A review on structure design,

- performance, and practical applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(7), 755–769. doi:10.1177/1045389X14530594
- Peng, C., Yu, J., Zhao, Z., Fu, J., Zhao, M., Wang, W., e Dai, J. (2015) Preparation and properties of a layered double hydroxide deicing additive for asphalt mixture. *Cold Regions Science and Technology*, 110, 70–76. doi:10.1016/j.coldregions.2014.11.013
- Qiu, J., van de Ven, M. F. C., Molenaar, A. A. A., Qiu, J., Wu, S., e Yu, J. (2009) Investigating the self healing capability of bituminous binders. *Road Materials and Pavement Design*, 10(January), 81–94. doi:10.1080/14680629.2009.9690237
- Rocha Segundo, I., Ferreira, C., Freitas, E. F., Carneiro, J. O., Fernandes, F., Júnior, S. L., Costa, M. F., Landi Júnior, S., e Costa, M. F. (2018) Assessment of photocatalytic, superhydrophobic and self-cleaning properties on hot mix asphalts coated with TiO₂ and/or ZnO aqueous solutions. *Construction and Building Materials*, 166, 36–44. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.106
- Rocha Segundo, Iran, Landi, S., Freitas, E., Castelo Branco, V., Costa, M. F. M., e Carneiro, J. (2020) Superhydrophobic Asphalt Pavements: Surface Improvement. *EPJ Web of Conferences*, 238, 12012. doi:10.1051/epjconf/202023812012
- Segundo, I. R., Freitas, E., Branco, V. T. F. C., Landi, S., Costa, M. F., e Carneiro, J. O. (2021) Review and analysis of advances in functionalized, smart, and multifunctional asphalt mixtures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151(June 2020), 111552. doi:10.1016/j.rser.2021.111552
- Shafabakhsh, G. H., e Ani, O. J. (2015) Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 98, 692–702. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.083
- Shan, L., Li, Z., Tian, D., e Tan, Y. (2021) Effect of anti-icing additives on the stability of emulsified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 275, 121951. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121951
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., e Buddhi, D. (2009) Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345. doi:10.1016/j.rser.2007.10.005
- Si, W., Ma, B., Ren, J., Hu, Y., Zhou, X., Tian, Y., e Li, Y. (2020) Temperature responses of asphalt pavement structure constructed with phase change material by applying finite element method. *Construction and Building Materials*, 244. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118088
- Son, J., Kundu, S., Verma, L. K., Sakhujia, M., Danner, A. J., Bhatia, C. S., e Yang, H. (2012) A practical superhydrophilic self cleaning and antireflective surface for outdoor photovoltaic applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 98, 46–51. doi:10.1016/j.solmat.2011.10.011
- Su, J. F., Wang, Y. Y., Han, N. X., Yang, P., e Han, S. (2016) Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 106, 317–329. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.120
- Tabakovic, A., e Schlangen, E. (2015) Self-Healing Technology for Asphalt Pavements. *Adv Polym Sci*. doi:10.1007/12
- Tadanaga, K., Morinaga, J., e Minami, T. (2000) Formation of superhydrophobic-superhydrophilic pattern on flowerlike alumina thin film by the sol-gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 19(1–3), 211–214. doi:10.1023/A:1008732204421
- Tang, B., Liu, X., Huang, W., e Cao, X. (2017) Preparation of La-doped nanometer TiO₂ and its application for NO removal on asphalt concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 18(S3), 43–53. doi:10.1080/14680629.2017.1329860
- Tang, N., Sun, C. J., Huang, S. X., e Wu, S. P. (2014) Damage and corrosion of conductive asphalt concrete subjected to freeze–thaw cycles and salt. *Materials Research Innovations*, 17(sup1), 240–245. doi:10.1179/1432891713Z.000000000223
- Toro, C., Jobson, B. T., Haselbach, L., Shen, S., e Chung, S. H. (2016) Photoactive roadways: Determination of CO, NO and VOC uptake coefficients and photolabile side product yields on TiO₂ treated asphalt and concrete. *Atmospheric Environment*, 139, 37–45. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.05.007
- Trigos, L., Gallego, J., Ignacio, J., e Picado-santos, L. (2021) Dielectric properties versus microwave heating susceptibility of aggregates for self-healing asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 293, 123475. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123475
- Wang, D., Leng, Z., Yu, H., Hüben, M., Kollmann, J., e Oeser, M. (2017) Durability of epoxy-bonded TiO₂-

- modified aggregate as a photocatalytic coating layer for asphalt pavement under vehicle tire polishing. *Wear*, 382(March), 1–7. doi:10.1016/j.wear.2017.04.004
- Wang, S., Liu, M., Kong, L., Long, Y., Jiang, X., e Yu, A. (2016) Recent Progress in VO₂ Smart Coatings: Strategies to Improve the Thermo-chromic Properties. *Progress in Materials Science*, 81, 1–54. doi:10.1016/j.pmatsci.2016.03.001
- Westerhoff, P., Song, G., Hristovski, K., e Kiser, M. A. (2011) Occurrence and removal of titanium at full scale wastewater treatment plants: implications for TiO₂ nanomaterials. *Journal of Environmental Monitoring*, 13(5), 1195–1203.
- Xu, S., García, A., Su, J., Liu, Q., Tabaković, A., e Schlangen, E. (2018) Self-Healing Asphalt Review: From Idea to Practice. *Advanced Materials Interfaces*, 1800536, 1800536. doi:10.1002/admi.201800536
- Yu, B., Peng, W., Liu, J., Zhang, J., Li, W., e Hong, Q. (2020) Research on the performance of temperature responsive asphalt mixture with thermo-chromic material. *Road Materials and Pavement Design*, 0(0), 1–12. doi:10.1080/14680629.2020.1842792
- Yu, H., Dai, W., Qian, G., Gong, X., Zhou, D., Li, X., e Zhou, X. (2020) The NO_x degradation performance of nano-TiO₂ coating for asphalt pavement. *Nanomaterials*, 10(5). doi:10.3390/nano10050897
- Yusoff, N. I. M., Broom, A. A. S., Alattug, H. N. M., Hamim, A., e Ahmad, J. (2014) The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 72, 139–147. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.014

Iran Rocha Segundo (iran_gomes@hotmail.com)

Orlando Lima Jr. (orlandojunior.jr@hotmail.com)

Elisabete Freitas (efreitas@civil.uminho.pt)

Verônica Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)

Salmon Landi Jr. (salmon.landi@ifgoiano.edu.br)

Manuel Filipe Costa (mfcosta@fisica.uminho.pt)

Joaquim Carneiro (carneiro@fisica.uminho.pt)

Departamento de Engenharia Civil, ISISE, Universidade do Minho, Campus Azurém, Guimarães, Portugal

Centro de Física, University do Minho, Campus Azurém, Guimarães, Portugal

Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil

Instituto Federal Goiano, Rio Verde, GO, Brazil

Centro de Física, Universidade do Minho, Campus Gualtar, Braga, Portugal