



# EMPREGO DE AGENTES REJUVENESCEDORES ENCAPSULADOS NA AUTORREGENERAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS: UMA REVISÃO

Osires de Medeiros Melo Neto <sup>1</sup>  
Gustavo Correia Basto da Silva <sup>2</sup>  
Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena <sup>3</sup>

## RESUMO

A camada de revestimento asfáltico pode apresentar problemas sob o efeito a longo prazo de cargas e fatores ambientais. A fissura por fadiga é um dos problemas mais comuns encontrados nas rodovias. Técnicas de microencapsulação e aquecimento por indução estão sendo estudadas a fim de minimizar esse feito. O objetivo desta revisão foi destacar os pontos positivos e negativos na utilização de rejuvenescedores encapsulados na autorregeneração de misturas asfálticas por meio de pesquisa da literatura em uma taxonomia coerente e sistemática, apresentando quais materiais foram estudados e as tecnologias de encapsulação implementadas até esse momento. Utilizou-se as bases de dados Scielo e Science Direct na busca dos artigos científicos. Realizou-se uma seleção dos artigos por meio de descritores específicos e priorizou-se por pesquisas publicadas neste ano. Os artigos, em sua maioria, foram encontrados na base de dados Science Direct. A revisão concluiu que o uso de microcápsulas com agentes de autorregeneração é eficiente. As microcápsulas com agentes rejuvenescedores apresentam boa resistência aos procedimentos de usinagem e compactação. Asfaltos porosos demonstraram-se mais eficientes na autorregeneração do que misturas asfálticas densas. A quantidade de octanol utilizado na fabricação de microcápsulas alteram o tamanho e rugosidade destes elementos. Há uma tendência em estudos de autorregeneração com bio-óleos encapsulados.

**Palavras-chave:** Concreto Asfáltico, Encapsulação, Rejuvenescimento.

## INTRODUÇÃO

A mistura asfáltica é um dos materiais mais utilizados na construção de pavimentos rodoviários, sendo composta de agregados, que fornecem resistência estrutural ao material e ao ligante asfáltico - um líquido viscoso que une os agregados (READ; WHITEOAK, 2003). As vantagens no uso desse tipo de material é a agilidade no período de construção, resistência à abrasão e menor ruído no atrito pneu e pavimento (GALLEGO et al., 2013). Com o crescente desenvolvimento econômico, há um aumento proporcional na carga de tráfego e, conseqüentemente, maior o número de solicitações no revestimento asfáltico (YANG et al. 2013).

---

<sup>1</sup> Mestrando do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, osiresdemedeiros@gmail.com;

<sup>2</sup> Doutorando do Curso de Odontologia da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, gugacorreiaa@gmail.com;

<sup>3</sup> Professor orientador: Doutora, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, ledach@uol.com.br.



O pavimento asfáltico pode apresentar muitas patologias sob o efeito a longo prazo de cargas e de fatores ambientais, dentre elas a fissura por fadiga é uma das patologias mais comuns (AIREY, 2008; ZHANG et al., 2018; ZHANG et al., 2019). A consequência deste processo de degradação é o aumento da rugosidade e diminuição da segurança (BUTTLAR et al., 2018). Após o aparecimento das rachaduras, é difícil cessar o crescimento de buracos que causam danos significativos aos veículos e diminuem a vida útil do pavimento (JACKSON et al., 2018).

O ligante asfáltico é um material que apresenta característica inerente à autorregeneração, porém a taxa de cura de dano é consideravelmente maior que a primeira taxa (GARCÍA, 2012; SUN et al., 2018b). O ligante asfáltico com menor viscosidade apresenta maior rapidez na taxa de cura que o ligante asfáltico mais viscoso, e mudanças bruscas de temperatura irão forçar o ligante a fluir rapidamente para dentro das fissuras (GROSSEGER; GARCIA, 2019). Apesar do efeito da autorregeneração da mistura asfáltica seja significativa para a durabilidade dos pavimentos, na temperatura ambiente, a autorregeneração acontece em horas ou dias, o que a torna ineficiente (PAN et al., 2018).

Tecnologias distintas vêm sendo desenvolvidas no intuito de otimizar a eficiência de autocorreção das misturas asfálticas, como aquecimento por indução de asfalto (processo que é usado para selagem, endurecimento ou amolecimento de metais ou outros materiais condutores) e uso de rejuvenescedores encapsulados (XU et al., 2018a). O aquecimento por indução e rejuvenescedores encapsulados são dois meios tecnológicos importantes no desenvolvimento da autorregeneração de misturas asfálticas (HAGER, 2010; TABAKOVIC; SCHILANGEN, 2016; AYAR et al., 2016; SUN et al., 2018a; XU et al., 2018b). Rejuvenescedores encapsulados são partículas esféricas, ou cápsulas, que contém aproximadamente 70% de óleo ou bio-óleo como aditivo (AL-MANSOORI et al., 2018). O mecanismo de rejuvenescimento do ligante envelhecido está na liberação no rejuvenescedor encapsulado. Este sistema é ativado quando a rachadura inicia e se propaga por meio da cápsula, desencadeando a liberação do rejuvenescedor que difundem-se na superfície da fissura e suaviza o ligante envelhecido (XIAO et al., 2017; XU et al., 2018b).

A fabricação de microcápsulas de paredes múltiplas é um procedimento complicado e pode exigir matérias-primas caras (LI et al., 2020). Yuan et al. (2006) e Xue et al. (2017) realizaram estudos e constataram que a resina epóxi ou óleo leve são utilizados como material principal das microcápsulas e os aplicaram como modificadores de misturas asfálticas à base de Estireno-Butadieno-Estireno (SBS). Alguns métodos de encapsulamento foram



desenvolvidos, por exemplo, cápsulas de melamina-formaldeído (SU et al., 2013), cápsulas epóxi (GARCÍA et al., 2011), e cápsulas de alginato (XU et al., 2017).

A taxonomia da literatura em uma área de pesquisa específica traz melhorias para estudos futuros. Uma taxonomia confiável de pesquisas publicadas proporciona uma classificação de publicações em massa. Novos estudiosos em rejuvenescimento e autorregeneração de misturas asfálticas podem se sentir perdidos com o número de artigos publicados sobre o tema e não serem capazes de mapear um cenário adequado das atividades reais na área de estudo.

O presente estudo tem como objetivo definir os pontos positivos e negativos na utilização de rejuvenescedores encapsulados no processo de autorregeneração de misturas asfálticas por meio de pesquisa da literatura em uma taxonomia coerente e sistemática, relatando quais materiais foram estudados e as tecnologias de encapsulação implementadas até então.

## **METODOLOGIA**

Este estudo integra uma revisão bibliográfica de caráter analítico a respeito da autorregeneração com rejuvenescedores encapsulados em misturas asfálticas. A coleta de dados foi realizada no período de abril a junho de 2020, e utilizou-se para o estudo as bases de dados Scientific Eletronic Library Online (Scielo) e Science Direct. O foco do estudo foi o ano de 2020, tendo em vista a possibilidade de contribuir com estudos mais atualizados. Contudo, os resultados na base de dados da Scielo foram inferiores aos obtidos na Science Direct, viabilizando o estudo dos artigos na Scielo nos anos de 2015 a 2020. A busca nas bases de dados deu-se pelos descritores: Self-Healing; Self-Healing e Asphalt; Sel-Healing, Asphalt e Capsules.

As pesquisas foram realizadas sem limitação de idioma, porém as publicações em inglês foram as predominantes. Após a seleção dos artigos de acordo com os descritores e os anos definidos anteriormente, foram seguidos, nessa ordem, as etapas: leitura exploratória, leitura seletiva e leitura analítica. A busca apresentou 105.814 artigos: 105.681 da Science Direct e 133 da Scientific Eletronic Library Online (Scielo). A princípio, a pesquisa se deu por artigos científicos com o descritor Self-Healing, apresentando 133 artigos na base de dados Scielo e 104.729 na Science Direct; em uma segunda etapa utilizou-se os descritores Self-Healing e Asphalt, não obtendo artigo na Scielo e 802 na Science Direct; por último foram pesquisados



os descritores Sel-Healing, Asphalt e Capsules não apresentando artigo na Scielo e 150 na Science Direct. A busca destrinchada com os descritores foi devido à base de dados Scielo, por apresentar artigos apenas com o descritor Self-Healing.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na base de dados Science Direct considerou-se artigos que foram publicados no ano de 2020 dos 150 encontrados na base, que correspondeu a 28 artigos (18,67%), e dentre os 28 apenas 13 (46,43%) são acerca de misturas asfálticas com rejuvenescedores encapsulados. Na Scielo, dos 133 artigos encontrados, apenas 3 (2,26%) são de 2020 e 61 (45,86%) estão entre os anos de 2015 e 2020, apresentando só 2 artigos relacionados a Self-Healing em misturas asfálticas.

Os estudos a respeito do Self-Healing vêm sendo publicados desde a década de 90 como ilustrado na Figura 1. Contudo, as pesquisas sobre Self-Healing combinadas a encapsulamento de rejuvenescedores ainda estão em ascensão conforme apresentado na Figura 2.

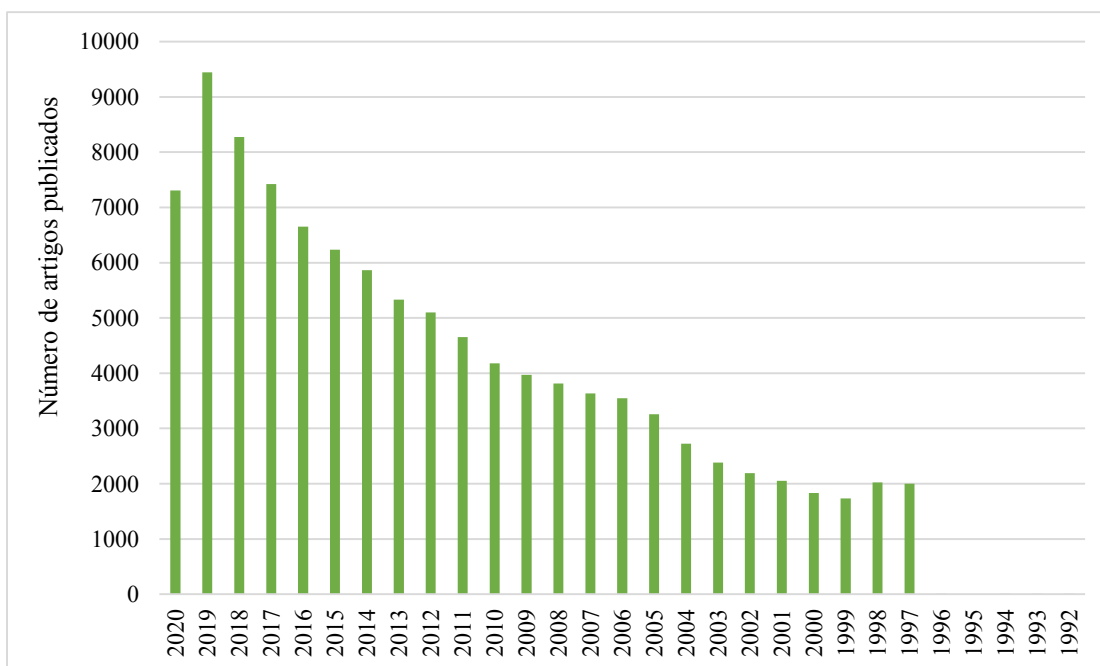


Figura 1 - Tendência de estudos de autorregeneração ao longo do tempo

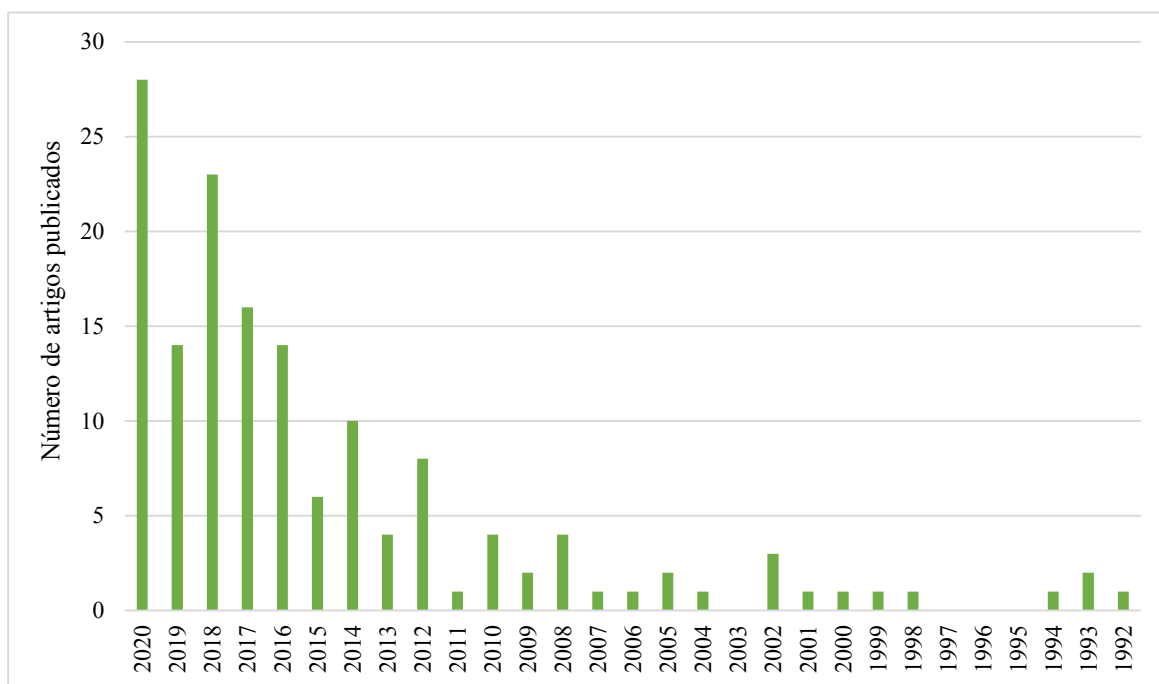


Figura 2 - Tendência de pesquisas de autorregeneração com encapsulação ao longo do tempo.

Desse modo, com base nas informações encontradas nos artigos analisados, disserta-se sobre a utilização de rejuvenescedores encapsulados na autorregeneração de misturas asfálticas, definindo os principais pontos abordados em cada pesquisa realizada, assim como características que apresentaram efetividade na autorregeneração dessas misturas.

Xu et al. (2020) desenvolveram um estudo com combinação de técnicas de autorregeneração, aquecimento por indução e microencapsulação, em mistura asfáltica porosa, com inserção de microcápsulas contendo agente rejuvenescedor e fibras de aço. Comprovou-se que ambos podem ser distribuídos aleatoriamente mistura asfáltica, permitindo que os dois sistemas de autorregeneração funcionem. O sistema combinado sobressaiu em relação aos sistemas isolados, pois não se limita apenas nas vantagens do rejuvenescedor encapsulado e do aquecimento por indução, mas também nos efeitos sinérgicos que possibilitam a ação de cada mecanismo individual, como difusão acelerada do rejuvenescedor (com aquecimento por indução) e melhora na autorregeneração por indução (por meio do rejuvenescimento do ligante asfáltico).

Os agentes rejuvenescedores encapsulados podem retardar o crescimento de fissuras nas misturas asfálticas e, conseqüentemente, retardar a manutenção dos revestimentos asfálticos. A



pesquisa realizada por Garcia-Hemández et al. (2020) confirma que a maioria das cápsulas analisadas resistem ao processo de usinagem e compactação e que a autorregeneração é mais eficiente em misturas asfálticas porosas do que em misturas asfálticas densas, pois no meio poroso o óleo é liberado gradualmente durante a vida útil do asfalto, enquanto no asfalto denso o óleo é liberado no momento em que as fissuras começam a aparecer. Observou-se também que as cápsulas - fabricadas por gelificação iônica de alginato de sódio na presença de íons cálcio - não afetaram o conteúdo de vazios de ar ou a densidade aparente da mistura asfáltica. A ausência dos períodos de descanso reduziu o número de ciclos resistidos pelas misturas analisadas.

Shu et al. (2020) realizaram estudos com fibras poliméricas compostas em soluções de água ácida. As fibras foram fabricadas com alginato de sódio e continham agente de autorregeneração para a mistura asfáltica. Constatou-se que assim como as cápsulas, as fibras resistem aos processos de usinagem e compactação. Os efeitos nocivos como chuva ácida, solução salina e água alcalina não enfraqueceram a eficiência da fibra. Concluíram, no estudo, que as fibras próximas às rachaduras podem gerar maior cicatrização da mistura asfáltica.

Li et al. (2020) verificaram que o rejuvenescimento da mistura asfáltica com SBS encapsulado foi superior à mistura asfáltica modificada com SBS. Comprovou-se assim que a capacidade de autorregeneração de 0,4% de microcápsula com SBS aumentou aproximadamente 205,6% em comparação ao asfalto modificado com SBS. O motivo pode ter sido pela liberação do material do interior da cápsula após ação externa, preenchendo os vazios e rachaduras contidas no asfalto.

Lou et al. (2020) desenvolveram uma pesquisa com adição de resíduos metálicos em misturas asfálticas a fim de verificar o processo de autorregeneração por microondas. Os autores relataram que a escória de aço à quente apresentou melhor capacidade de absorção, demonstrando uma taxa de cerca de 60% de substituição em volume de agregados para misturas asfálticas de autocorreção. Dessa forma, a escória de aço provou-se eficiente para fins de autorregeneração.

Sun et al. (2020) aplicaram a tecnologia de microcápsulas com óleo de girassol, preparadas pela técnica de polimerização *in situ*. As microcápsulas foram inseridas em selante à base de betume, e observou-se que elas se apresentavam bem dispersas e sem aglomeração. O teor ideal de microcápsulas foi idealizado em 2%. O óleo de girassol é bastante útil para diminuir a viscosidade do ligante asfáltico e possibilita o manuseio da mistura asfáltica em temperaturas inferiores as comumente utilizadas.



Tan et al. (2020) realizaram um estudo com microencapsulação de resina epóxi e um agente facilitador de autorregeneração do ligante asfáltico. Análises das características microscópicas das microcápsulas foram realizadas a fim de detectar tamanho das partículas, componentes químicos e dispersão das microcápsulas. Verificou-se que os teores ótimos de emulsificador são de 0,5% para microcápsula com resina epóxi e 0,7% para microcápsula com o agente de autorregeneração. A resina epóxi necessita ser autoregenerada à temperatura ambiente por mais de 48 horas para obter a melhor resistência, e o intervalo de uma hora do ensaio é relativamente curto quando comparado com o necessário, ocasionando uma autorregeneração ineficiente.

Investigação do comportamento reológico do ligante asfáltico misturado com microcápsulas de autorregeneração foi objeto de pesquisa de Wang et al. (2020). Três amostras de microcápsulas foram analisadas, com diâmetros médios de 10, 20 e 30  $\mu\text{m}$ . Misturas asfálticas com 1, 2, 3, 4 e 5% foram avaliadas. Como já é esperado, as microcápsulas menores apresentaram maior área superficial. Corroborando com Sun et al. (2020), as microcápsulas apresentavam-se dispersas e sem aglomeração. As curvas de espectroscopia no infravermelho apresentaram conexão das microcápsulas com macromoléculas betuminosas. Maiores adições de microcápsulas levaram a maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico, o que implica o ligante asfáltico apresentando um aumento da recuperação elástica.

As paredes das microcápsulas são feitas comumente com a ureia-formaldeído (PUF) (Miguel et al. 2016), melamina-formaldeído (MF) e melamina-ureia-formaldeído (MUF) (SUN et al., 2015). Costa et al. (2018) realizaram um estudo com autorregeneração de polímeros por microencapsulação. A pesquisa foca na alteração dos diâmetros de microcápsulas por meio de variações da concentração de octanol. As microcápsulas apresentaram formatos irregulares pela síntese com ausência de octanol, além da formação de aglomerados de ureia-formaldeído. Uma maior utilização de octanol ocasionou uma diminuição da quantidade de bolhas de ar durante a síntese e aumento do diâmetro frequente das microcápsulas, assim como a rugosidade da parede, pelo aumento da formação de nanocápsulas em emulsão.

Cervi, Pezzin e Meier (2017) desenvolveram um estudo de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) com a resina epóxi. A pesquisa utilizou éter diglicidílico do bisfenol A (DGBA), trietilenotetramina (TETA) e um polidimetilsiloxano aminado (ADM) como agente de autorregeneração e poli-ureia-formaldeído (PUF) como parede da microcápsula. Os resultados apresentados foram satisfatórios acerca deste uso na autorregeneração, de modo a demonstrar necessidade de fornecer calor para iniciar os processos de polimerização, que



começam a 40 °C para TETA e a 180 °C para ADM. O estudo concluiu que a energia de ativação para o DGEBA/TETA é 87.2 kJ/g e DGEBA/ADM é 262.1 kJ/g.

Luo, Birgisson e Lytton (2020) estudaram a autorregeneração de misturas asfálticas afirmando que a autorregeneração ocorre quando o asfalto obedece ao período de descanso e, conseqüentemente, as fissuras autoregeneradas com melhor eficiência são em pavimentos com menor carga de tráfego. Implementação de aditivos metálicos ou microcápsulas em materiais asfálticos é um dos temas mais populares na atualidade (DAI et al., 2013; GALLEGO et al., 2013; CHUNG et al., 2015; NORAMBUENA-CONTRERAS e GARCIA, 2016). A fim de quantificar a efetividade dessas tecnologias, testes mecânicos e reológicos são realizados nas misturas asfálticas com processo de autorregeneração, sendo um deles o ensaio de flexão com três pontos e flexão semicircular.

Al-Sabaei et al. (2020) realizaram uma revisão sistemática acerca da utilização de bio-asfalto em pavimentos asfálticos. Os autores afirmam que dentre os artigos analisados, a categoria de microencapsulação de bio-óleos rejuvenescedores é a que apresenta menor número de estudos laboratoriais. Esta categoria foi ainda subdividida em cápsulas com ligante de bio-asfalto e tecnologia de capsulação em misturas asfálticas. Enfatiza-se a necessidade de métodos sustentáveis para redução do teor de água nos bio-óleos utilizados na tecnologia de bio-asfalto, assim como adoção de biomateriais combinados nas aplicações em pavimentos asfálticos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos achados, conclui-se que a autorregeneração de misturas asfálticas ocorre com o rompimento das microcápsulas após solicitação externa, que físsura o revestimento asfáltico e as microcápsulas, simultaneamente, acarretando a autorregeneração das fissuras do pavimento.

A combinação das técnicas de microencapsulação e aquecimento por indução são mais satisfatórias em sistemas de autorregeneração de misturas asfálticas do que os métodos aplicados isoladamente. A maioria das microcápsulas avaliadas nos estudos são fabricadas com ureia-formaldeído, melamina-formaldeído, melamina-ureia-formaldeído e gelificação ionotrópica de alginato na presença de íons de cálcio, apresentando boa resistência nos procedimentos de usinagem e compactação. Fibras poliméricas resistem também a estes procedimentos.





A autorregeneração apresentou-se mais eficiente em asfaltos porosos, porém há eficácia nos asfaltos densos. Autorregeneração de misturas asfálticas pelo método de micoondas é eficaz com a utilização de escória de aço à quente. O uso de bio-óleo como agente rejuvenescedor tem ganhado bastante visibilidade nos últimos anos, sendo assim implementados na microencapsulação.

A conexão entre as microcápsulas e macromoléculas betuminosas foi comprovada, favorecendo a autorregeneração e acarretando um aumento em massa do conteúdo da parte gel. A quantidade de octanol utilizada na fabricação de microcápsulas influenciam no tamanho e rugosidade das mesmas.

Por fim, destaca-se a importância do período de descanso na autorregeneração de misturas asfálticas para uma autorregeneração mais eficiente.

## REFERÊNCIAS

AIREY, G. D.; COLLOP, A. C.; ZOOROB, S. E.; ELLIOTT, R. C. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. **Construction and Building Materials**, 22(9): 2015-2024, 2008.

AL-MANSOORI, T.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GARCIA, A. Effect of capsule addition and heal-ing temperature on the self-healing potential of asphalt mixtures. **Materials and Structures**, 51(53), 2018.

AL-SABAEI, A. M.; NAPIAH, M. B.; SUTANTO, M. H.; ALALOUL, W.S.; USMAN, A. A systematic re-view of bio-asphalt for flexible pavement applications: coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions. **Journal of Cleaner Production**, 2020.

AYAR, P.; MORENO-NAVARRO, F.; RUBIO-GAMEZ, C. The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review. **Journal of Cleaner Production**, 113:28-40, 2016.

BUTTLAR, W. G.; CHABOT, A.; DAVE, E. V.; PETIT, C.; TEBALDI, G. Mechanisms of Cracking and Debonding in Asphalt and Composite Pavements. **Springer**, 237p, 2018.

CERVI, G.; PEZZIN, S. H.; MEIER, M. M. Differential Scanning Calorimetry study on curing kinetics of diglycidyl ether of bisphenol A with amine curing agents for self-healing systems. **Revista Matéria**, 22(2):1-6, 2017.

CHUNG, K.; LEE, S.; PARK, M.; YOO, P.; HONG, Y. Preparation and characterization of microcapsule-containing self-healing asphalt. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 29:330-337, 2015.



COSTA, S. F.; ANDRADE, A. G. L. L.; MEIER, M. M.; PEZZIN, S. H. Modificação do diâmetro de micro-cápsulas de poli(ureia-formaldeído) pelo uso de octanol. **Revista Matéria**, 23(4):1-9, 2018.

DAI, Q.; WANG, Z.; HASAN, M. R. M. Investigation of induction healing effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests. **Construction and Building Materials**, 49:729-737, 2013.

GALLEGO, J.; DEL VAL, M. A.; CONTRERAS, V.; PÁEZ, A. Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing. **Construction and Building Materials**, 42:1-4, 2013.

GARCÍA, A.; SCHLANGEN, E.; VAN DE VEM, M. Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. **Fuel**, 90:583-591, 2011.

GARCÍA, A. Self-healing of open cracks in asphalt mastic. **Fuel**, 93:264-272, 2012.

GARCIA-HERNÁNDEZ, A.; SALIH, S.; RUIZ-RIANCHO, I.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; HUD-SON-GRIFFITHS, R.; GOMEZ-MEIJIDE, B. Self-healing of reflective cracks in asphalt mixtures by the action of encapsulated agents. **Construction and Building Materials**, 252, 2020.

GROSSEGER, D.; GARCIA, A. Influence of the thermal expansion of bitumen on asphalt self-healing. **Applied Thermal Engineering**, 156:23-33, 2019.

HAGER, M. D. 2010. Self-healing materials. **Advanced Materials**, 22(47):5424-5430, 2010.  
JACKSON, R. J.; WOJCIK, A.; MIODOWNIK, M. 3D printing of asphalt and its effect on mechanical prop-erties. **Materials & Design**, 160:468-474, 2018.

LI, J.; YANG, S.; MUHAMMAD, Y.; SAHIBZADA, M.; ZHU, Z.; LIU, T.; LIAO, S. Fabrication and appli-cation of polyurea formaldehyde-bioasphalt microcapsules as a secondary modifier for the preparation of high selfhealing rate SBS modified asphalt. **Construction and Building Materials**, 246, 2020.

LOU, B.; SHA, A.; LI, Y.; WANG, W.; LIU, Z.; JIANG, W.; CUI, X. Effect of metallic-waste aggregates on microwave self-healing performances of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, 246, 2020.

LUO, X.; BIRGISSON, B.; LYTTON, R. L. Kinetics of healing of asphalt mixtures. **Journal of Cleaner Production**, 252, 2020.

MIGUEL, M. D. L. P.; OLLIER, R.; ALVAREZ, V.; VALLO, C. Effect of the preparation method on the structure of linseed oil-filled poly(urea-formaldehyde) microcapsules. **Progress in Organic Coatings**, 97:194-202, 2016.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GARCIA, A. Self-healing of asphalt mixture by microwave and induc-tion heating. **Materials and Design**, 106:404-414, 2016.

PAN, C.; TANG, P.; RIARA, M.; MO, L.; LI, M.; GUO, M. Effect of Healing Agents on Crack Healing of Asphalt and Asphalt Mortar. **Materials**, 11(8), 2018.



READ, J.; WHITEOAK, D. **The Shell Bitumen Handbook**, Thomas Telford, 2003.

REDDY, K. R.; EL-ZEIN, A.; AIREY, D. W.; ALONSO-MARROQUIN, F.; SCHUBEL, P.; MANALO, A. Self-healing polymers: Synthesis methods and applications. **Nano-Structures & Nano-Objects**, 23, 2020.

SHU, B.; WU, S.; DONG, L.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; LI, Y.; LI, C.; YANG, X.; LIU, Q.; WANG, W.; WANG, F.; BARBIERI, D. M.; YUAN, M.; BAO, S. Self-healing capability of asphalt mixture contain-ing polymeric composite fibers under acid and saline-alkali water solutions. **Journal of Cleaner Production**, 268, 2020.

SU, J. F.; QIU, J.; SCHLANGEN, E. Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuve-nator for bitumen. **Polymer Degradation and Stability**, 98:1205-1215, 2013.

SUN, D.; AN, J.; WU, G.; YANG, J. Double-layered reactive microcapsules with excellent thermal and non-polar solvente resistance for self-healing coatings. **Journal of Materials Chemistry A**, 3:4435-4444, 2015.

SUN, D.; LI, B.; YE, F.; ZHU, X.; LU, T.; TIAN, Y. Fatigue behavior of microcapsule-induced self-healing 33 asphalt concrete. **Journal of Cleaner Production**, 188:466-476, 2018.

SUN, D.; SUN, G.; ZHU, X.; GUARIN, A.; LI, B.; DAI, Z.; LING, J. A comprehensive review on self-healing of asphalt materials: mechanism, model, characterization and enhancement. **Advances in Colloid and Interface Science**, 256:65-93, 2018.

SUN, G.; ZHANG, J.; TAN, X.; GUO, D.; ZHOU, Y.; GUAN, Y. Evaluation of conventional technical proper-ties and self-healing ability of bitumen-based sealants containing sunflower-oil microcapsules for pavement cracks. **Construction and Building Materials**, 254, 2020.

TABAKOVIC, A.; SCHILANGEN, E. **Self-healing Technology for Asphalt Pavements**. Springer International Publishing, **Springer**, 2016.

TAN, X.; ZHANG, J.; GUO, D.; SUN, G.; ZHOU, Y.; ZHANG, W.; GUAN, Y. Preparation, characterization and repeated repair ability evaluation of asphalt-based crack sealant containing microencapsulated epoxy resin and curing agent. **Construction and Building Materials**, 256, 2020.

XIAO, Y.; HUANG, H.; PENG, X. Synthesis of self-healing waterborne polyurethanes containing sulpho-nate groups. **Royal Society of Chemistry**, 7:20093-20100, 2017.

XU, S.; GARCÍA, A.; SU, J.; LIU, Q.; TABAKOVIC, A.; SCHLANGEN, E. Self-healing asphalt review: from idea to practice. **Advanced Materials Interfaces**, 5(17). 2018a.

XU, S.; LIU, X.; TABAKOVIC, A.; SCHLANGEN, E. Investigation of the potential use of calcium alginate capsules for self-healing in porous asphalt concrete. **Materials**, 12(1), 2019a.



XU, S.; LIU, X.; TABAKOVIC, A.; SCHLANGEN, E. The influence of asphalt ageing on induction healing effect on porous asphalt concrete. **RILEM Technical Letters**, 30:98-103, 2019b.

XU, S.; LIU, X.; TABAKOVIC, A.; SCHLANGEN, E. A novel self-healing system: Towards a sustainable porous asphalt. **Journal of Cleaner Production**, 259:1-10, 2020.

XU, S.; TABAKOVIC, A.; LIU, X.; SCHLANGEN, E. **Preparation of calcium alginate capsules and the application in asphalt mastic**. In: 6th International Conference on Self-Healing Materials, Friedrichshafen, Germany, 2017.

XU, S.; TABAKOVIC, A.; LIU, X.; SCHLANGEN, E. Calcium alginate capsules encapsulating rejuvenator as healing system for asphalt mastic. **Construction and Building Materials**, 169:379-387, 2018b.

XU, S.; TABAKOVIC, A.; LIU, X.; PALIN, D.; SCHLANGEN, E. Optimization of the calcium alginate capsules for self-healing asphalt. **Applied Sciences**, 9(3), 2019c.

XUE, B.; WANG, H.; PEI, J.; LI, R.; ZHANG, J.; FAN, Z. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt. **Construction and Building Materials**, 135:641-649, 2017.

WANG, X.; XIE, X.; WANG, L.; SU, J.; GUO, Y.; MU, R. Rheological behaviour of bitumen blending with self-healing microcapsule: Effects of physical and chemical interface structures. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 586, 2020.

YANG, W.; LIU, G.; CHEN, T. **Highway Operation Management Mode of New Ideas**. In: International Conference on Science & Social Research, 2013.

YUAN, L.; LIANG, G. Z.; XIE, J. Q.; GUO, J.; LI, L. Thermal stability of microencapsulated epoxy resins with poly (urea-formaldehyde). **Polymer Degradation and Stability**, 91:2300-2306, 2006.

ZHANG, Z. P.; RONG, M. Z.; ZHANG, M. Q. Mechanically robust, self-healable, and highly stretchable living crosslinked polyurethane based on a reversible C-C bond. **Advanced Functional Materials**, 28(11), 2018.

ZHANG, C.; LUAN, J.; YU, X.; CHEN, W. Characterization and adsorption performance of graphene oxide – montmorillonite nanocomposite for the simultaneous removal of Pb<sup>2+</sup> and p-nitrophenol. **Journal of Hazardous Materials**, 378, 2019.