

PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS MAIS RESILIENTES COM A INCORPORAÇÃO DE AGENTES ENCAPSULADOS

Rui Micaelo

CERIS NOVA, NOVA School of Science and Technology | NOVA FCT, Departamento de Engenharia Civil,
2829-516 Caparica, Portugal, ruilm@fct.unl.pt

Ana Cristina Freire

Departamento de Transportes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC),
Lisboa, Portugal, acfreire@lnec.pt

RESUMO: As misturas betuminosas incorporando agentes encapsulados são uma inovação nos materiais de pavimentação com enorme potencial para assegurar uma maior resiliência aos pavimentos rodoviários. Os agentes encapsulados são adicionados no fabrico da mistura betuminosa e pretendem aumentar a capacidade autógena de autorreparação do ligante betuminoso. Nesta comunicação resumem-se alguns estudos recentes relativos à caracterização e avaliação do desempenho, em laboratório, de misturas betuminosas com adição de cápsulas de cálcio-alginato com óleo vegetal, realizados no âmbito da colaboração entre a NOVA FCT e o LNEC. O encapsulamento por extrusão simples de óleo vegetal numa estrutura polimérica de cálcio-alginato permite obter cápsulas com resistência térmica e mecânica suficiente para serem incorporados em misturas betuminosas. As misturas betuminosas com agentes encapsulados têm uma menor rigidez inicial, variando esta diferença com o envelhecimento, e apresentam uma resistência semelhante no comportamento à fadiga e à deformação permanente. Por outro lado, existem outros fatores, nomeadamente a granulometria do agregado que influencia o dano nas cápsulas e na libertação do agente encapsulado.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos resilientes, Materiais autorreparáveis, Misturas betuminosas, Rejuvenescedores.

1. Introdução

Nas últimas décadas têm-se observado um aumento do número de eventos climáticos extremos, justificados com o aumento da temperatura média da Terra, e que previsivelmente irá continuar, afetando todas as construções da engenharia civil. Os pavimentos rodoviários são especialmente sensíveis aos ciclos de variação de temperatura e do nível freático nas camadas não ligadas, em particular na fundação. Por outro lado, apesar do investimento anual na manutenção e reabilitação de estradas nos países desenvolvidos ser elevado (superior a 11 mil milhões de euros em 2022 nos países europeus [1]), não é, em geral, suficiente para manter a totalidade das diferentes redes (nacional, regional e local) numa condição aceitável. Deste modo, é essencial desenvolver soluções de pavimentos rodoviários mais resilientes aos eventos climáticos, permitindo prolongar o seu período útil em serviço e reduzir o esforço financeiro das administrações rodoviárias.

A capacidade autógena de autorreparação (*self-healing*) dos pavimentos betuminosos entre passagens de tráfego é amplamente reconhecida e contribui positivamente para a extensão da sua vida útil [2, 3]. Entretanto, a sua eficácia diminui significativamente nas temperaturas usuais de serviço e reduz ainda mais com o envelhecimento do material. A incorporação de agentes rejuvenescedores encapsulados nas misturas betuminosas é uma inovação recente que explora a capacidade autógena de autorreparação do betume para prolongar a durabilidade de pavimentos rodoviários e aeroportuários. Neste conceito, o agente rejuvenescedor é introduzido durante o fabrico da mistura betuminosa, mas só atua quando ocorre dano físico no material. O mecanismo de autorreparação com o auxílio de agentes encapsulados já foi comprovado em laboratório por meio de ensaios específicos [4]. Contudo, é necessário demonstrar os benefícios em termos de desempenho e durabilidade dessas misturas através de ensaios convencionais para que a tecnologia seja adotada e generalizada na indústria. A Figura 1 ilustra o mecanismo da autorreparação promovido pelos agentes encapsulados e o efeito pretendido na vida útil dos pavimentos. Nesta comunicação resumem-se alguns estudos

recentes relativos à caracterização e avaliação do desempenho, em laboratório, de misturas betuminosas com adição de cápsulas de cálcio-alginato com óleo vegetal, realizados no âmbito da colaboração entre a NOVA FCT e o LNEC.

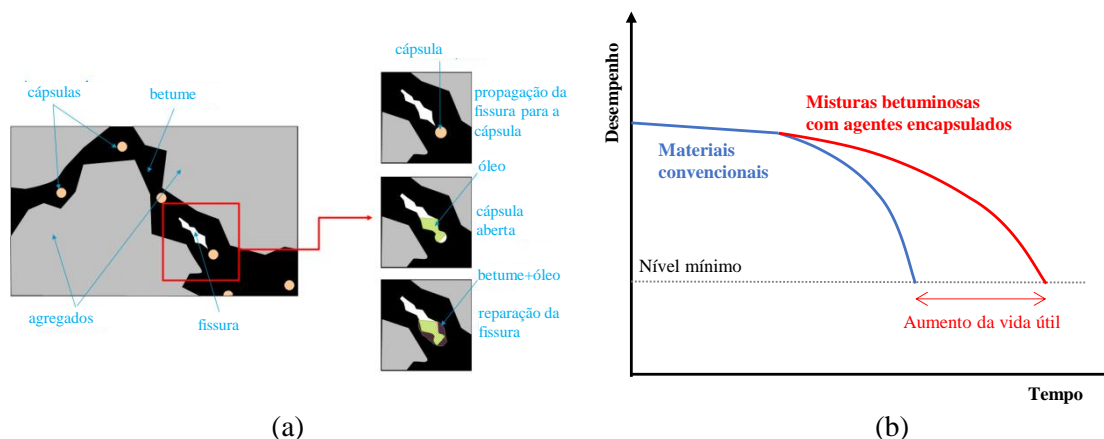


Figura 1. (a) Mecanismo de autorreparação com agentes encapsulados (adaptado de [5]); (b) efeito pretendido dos agentes encapsulados na vida útil dos pavimentos antes de ações M&R

2. Gelificação ionotrópica – Cápsulas de cálcio-alginato

A microencapsulação corresponde ao processo de aprisionamento de partículas sólidas ou gotículas de líquidos ou gases numa camada inerte, que os isolam e protegem do ambiente externo. A gelificação ionotrópica é um método de microencapsulação físico-químico que tem sido muito utilizado no encapsulamento de agentes rejuvenescedores para a promoção da autorreparação em misturas betuminosas. Nesta técnica, o polímero base (alginato, goma de gelano, pectina ou quitosano) é reticulado com a adição de catiões divalentes de cloreto de cálcio, cloreto de bário ou cloreto de potássio, formando esferas de hidrogel de forma quase instantânea. O agente a encapsular é aprisionado na estrutura polimérica tridimensional devido à rapidez do processo. As principais vantagens associadas a este método são a rapidez e a produtividade do processo, a facilidade em implementar a técnica e a compatibilidade com os materiais que se pretendem encapsular.

O procedimento utilizado para o fabrico de cápsulas de alginato de cálcio contendo agentes rejuvenescedores para a incorporação em misturas betuminosas compreende os seguintes passos [6]:

- Fabrico de uma emulsão de alginato de sódio, agente rejuvenescedor e água com um agitador mecânico. Os agentes rejuvenescedores utilizados são muito variados (óleos vegetais, óleo de aquecimento, etc.), sendo requerido que possuam boa compatibilidade com o betume e apresentem uma viscosidade baixa à temperatura ambiente. A emulsão é produzida habitualmente com uma relação óleo/água de 0,1-0,5 ml/ml e de óleo/alginato de sódio de 2,5-3,5 ml/g. Em alguns trabalhos é adicionada à emulsão um aditivo estabilizante da emulsão (Polietileno anidrido maleico ou Tween 20).
- Fabrico de uma solução de cloreto de cálcio em água (concentração de 2%).
- Gotejamento da emulsão na solução de cloreto de cálcio. Na Figura 2(a) ilustra-se a produção com extrusão simples da emulsão através de seringa na solução de cloreto de cálcio. A abertura do canal da agulha ou do tubo do funil de gotejamento influenciam a dimensão da gota e da cápsula final. A produção de microcápsulas de menor dimensão (< 1 mm) pode ser obtida com atomização de ar pressurizado, ilustrada na Figura 2(b). Neste processo, a emulsão passa por um pulverizador em que as gotículas de emulsão são cortadas por um fluxo de ar pressurizado.
- As cápsulas de alginato de cálcio são removidas da solução de cálcio, lavadas com água e etanol para remover o óleo superficial e desidratadas à temperatura ambiente ou em estufa a temperatura moderada (30-40 °C) (vd. Figura 3(a)).

No âmbito dos estudos de colaboração NOVA FCT – LNEC as cápsulas de alginato de cálcio foram produzidas contendo óleo de girassol. A Tabela 1 resume as propriedades mais relevantes destas cápsulas. Em geral, as cápsulas têm tamanho próximo do limite inferior do agregado grosso (2-3 mm), embora possam ser produzidas com um tamanho menor, e apresentam muito boa resistência térmica. O conteúdo em rejuvenescedor é

variável, podendo atingir valores muito significativos (75 %). A resistência mecânica é baixa (< 40 N), contudo têm elevada deformabilidade, permitindo adaptar a sua forma ao espaço entre os agregados.

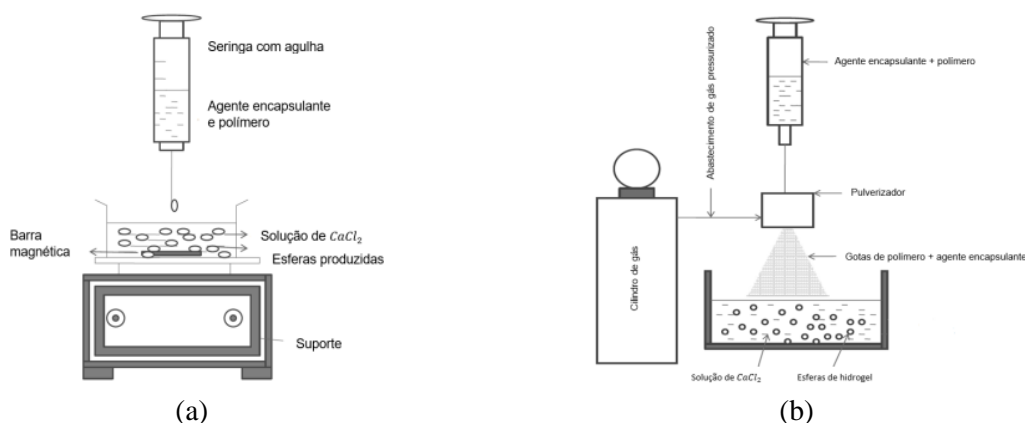


Figura 2. Produção de cápsulas de cálcio-alginato por gelificação inotrópica. (a) extrusão simples; (b) atomização de ar pressurizado. (adaptado de [7])

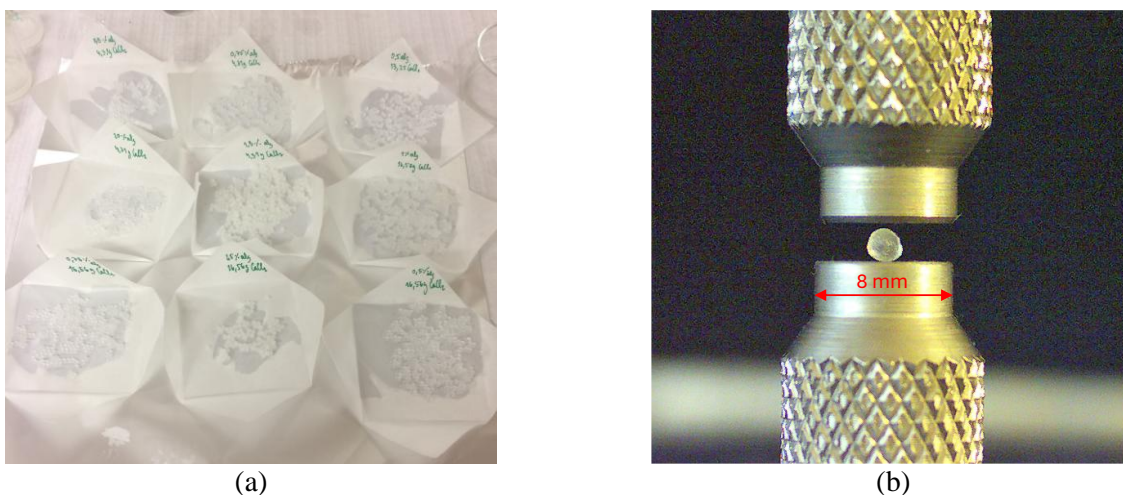


Figura 3. Cápsulas de cálcio-alginato com óleo de girassol [6]. (a) durante a secagem; (b) cápsula seca.

Tabela 1. Cápsulas de cálcio-alginato com óleo de girassol.

Fonte	Dimensão ϕ [mm]	Resistência mecânica F_{max} [N]	Resistência térmica P_T @ 200 °C [%]	Rejuvenescedor P_R [% massa]
[6]	0,82-1,77	0,7-3,0	5,4-19,6	15-69
[8]	2,9	21,9	2,9	48
[9]	2,8	33,0	6,8	75
[10]	2,4-3,0	17,3-29,2	-	-

Nota: ϕ – diâmetro médio; F_{max} – força máxima na primeira rotura em compressão não confinada; P_T – percentagem de perda de massa; P_R – percentagem de rejuvenescedor em massa.

3. Misturas betuminosas com cápsulas de cálcio-alginato

3.1 Propriedades volumétricas

A incorporação dos rejuvenescedores encapsulados deve ter desejavelmente um impacto reduzido nas propriedades volumétricas da mistura betuminosa para não comprometer o desempenho e a durabilidade do material, os quais estão indiretamente relacionados com as propriedades volumétricas (ex. o volume de vazios influencia a permeabilidade e o envelhecimento do ligante betuminoso). Na Tabela 2 apresentam-se alguns

resultados de estudos laboratoriais realizados com misturas betuminosas do tipo Betão Betuminoso, com diferentes granulometrias e conteúdo de cápsulas, e recorrendo a diferentes procedimentos de compactação (impacto, giratório e rolo). Para incorporações de cápsulas entre 0,5% e 4,0% da massa total de mistura betuminosa verifica-se uma redução da baridade dos provetes compactados. Contudo, atendendo que a baridade máxima teórica diminui com o conteúdo em cápsulas, o volume de vazios nem sempre aumenta. Estas cápsulas têm uma massa volúmica ligeiramente inferior à do betume, mas com pouca variação entre diferentes materiais ($0,90 \pm 0,05 \text{ Mg/m}^3$).

Para investigar o efeito das cápsulas contendo rejuvenescedores na mesoestrutura do material foram fabricados provetes de mistura betuminosa com ligante sintético (sem cor) e incorporadas cápsulas coloridas para uma mais fácil avaliação visual [10]. Conforme ilustrado na Figura 4(a), as cápsulas inserem-se na estrutura de agregado grosso, por vezes aglomerando-se, mas não têm um efeito significativo na mesoestrutura da mistura betuminosa. Este efeito está relacionado com a ductilidade muito elevada deste tipo de cápsulas que se deformam para adaptar aos vazios na estrutura de agregados grossos (*vd.* Figura 4(b)). Contudo, a deformação da cápsula resulta, em geral, numa perda de rejuvenescedor encapsulado, a qual, se for significativa pode afetar o desempenho da mistura betuminosa em serviço. A uma maior rigidez da matriz polimérica corresponde uma maior resistência e menor perda no fabrico da mistura, mas pode comprometer a libertação do rejuvenescedor necessário à autorreparação.

Tabela 2. Cápsulas de cálcio-alginato com óleo de girassol.

Fonte	Mistura betuminosa	Betume [% , massa]	Cápsulas [% , massa]	Baridade* [Mg/m^3]	Volume de vazios [%]
[8]	AC 20 Base 35/50	4,7	0	2,460	3,7
			0,5	2,460	3,4
[9]	AC 20 Base 35/50	4,7	0	2,432	4,6
			0,5	2,422	4,4
			0,75	2,415	4,4
			1,0	2,390	5,1
[11]	AC 14 Surf 35/50 granulometria A/B	4,9	0	2,435 / 2,402	1,7 / 3,2
			1,0	2,370 / 2,295	2,8 / 6,1
			2,0	2,338 / 2,267	2,6 / 5,7
			4,0	2,255 / 2,191	3,7 / 6,6

Nota: * [8] provete cilíndrico, compactador giratório; [9] laje, compactador de rolo; [11] provete cilíndrico, compactador de impacto.

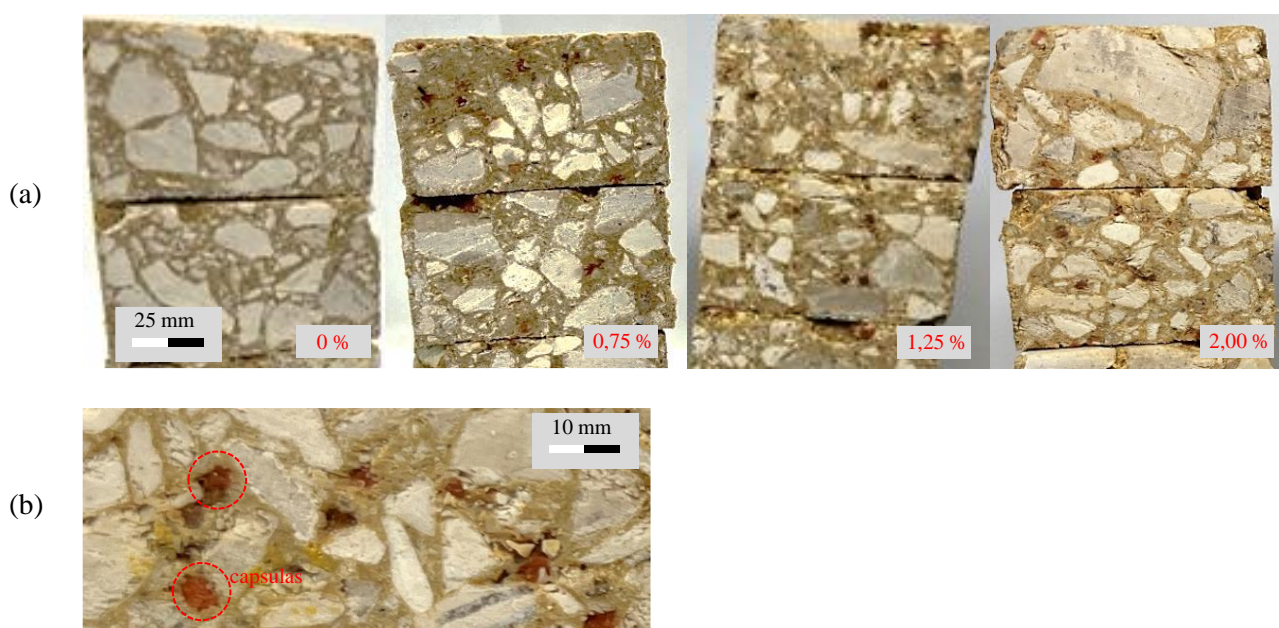


Figura 4. Mistura AC 14 Surf Recofal S100-P com cápsulas [10]: (a) efeito conteúdo cápsulas; (b) identificação das cápsulas.

3.2 Propriedades viscoelásticas lineares

As propriedades viscoelásticas lineares da mistura betuminosa nas condições de serviço são muito importantes para um bom desempenho, nomeadamente a capacidade de relaxação a temperaturas baixas, a flexibilidade a temperaturas intermédias, e a resistência à acumulação de deformação a temperaturas elevadas. No estudo de Pereira [9], foram medidos o módulo de rigidez $|E^*|$ e o ângulo de fase (ϕ) de uma mistura betuminosa (AC 20 Base 35/50), com diferentes conteúdos de cápsulas, na condição inicial (após fabrico) e envelhecida em laboratório. O ensaio de viga em flexão em 4 pontos foi realizado à temperatura de 20 °C e repetido a diferentes frequências de carregamento (f). Conforme ilustrado na Figura 5, na condição não envelhecida, os agentes encapsulados não afetam a variação das medidas de $|E^*|$ e ϕ com a frequência de carregamento (*i.e.*, o aumento de $|E^*|$ e a redução de ϕ com o aumento de f). Contudo, verificou-se uma redução média de $|E^*|$ em 11%, 4% e 14% para os conteúdos de 0,50%, 0,75% e 1,00%. O ângulo de fase variou ligeiramente entre $-0,6^\circ$ e $+1,4^\circ$ dependendo da mistura e da frequência. A redução do módulo de rigidez está relacionada com a rigidez das cápsulas e a perda de óleo do processo de fabrico da mistura betuminosa. Note-se que dada a sua dimensão, as cápsulas fazem parte da estrutura resistente e transmitem as forças entre as partículas (agregados).

Após envelhecimento observou-se, conforme esperado, um aumento de $|E^*|$ e a diminuição de ϕ . As misturas com 0,50% e 0,75% de cápsulas apresentaram valores próximos à mistura sem cápsulas que indica um menor impacto das cápsulas com o aumento da rigidez do betume com o envelhecimento.

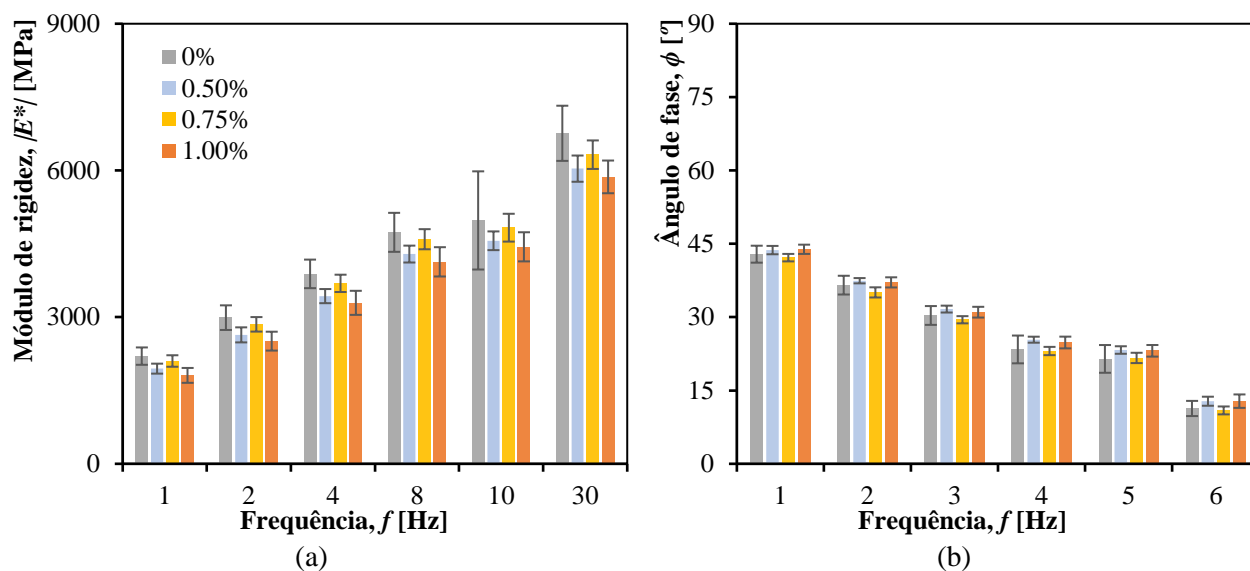


Figura 5. Propriedades viscoelásticas lineares (flexão de viga em 4 pontos) a 20 °C no estado inicial [9]: (a) módulo de rigidez; (b) ângulo de fase.

3.3 Resistência à tração

A resistência à tração, medida em compressão diametral, é habitualmente utilizada na avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas. No estudo de Paciência [8], recorreu-se a este ensaio mecânico simples para a avaliar o desempenho de uma mistura betuminosa (AC 20 Base 35/50) com e sem agentes encapsulados. Na Figura 6(a) apresentam-se as curvas força-deformação, e na Figura 6(b) comparam-se os valores médios da resistência à tração. Para a mistura com agentes encapsulados (MBC) o ensaio de compressão diametral foi realizado a diferentes temperaturas. À temperatura de 20 °C, as curvas força-deformação são muito semelhantes, contudo a força máxima reduz com a adição das cápsulas. Como esperado, a ductilidade da mistura betuminosa reduz significativamente com a redução da temperatura de ensaio.

Para avaliar a capacidade de autorreparação das misturas betuminosas, os provetes foram ensaiados segunda vez após um período de repouso à temperatura ambiente. A recuperação, correspondente ao rácio entre as forças máximas no 2º e no 1º ensaio, é apresentada na Figura 7(a). A recuperação da mistura com cápsulas foi moderada à temperatura de 20 °C e baixa às temperaturas de ensaio de 10 °C e -14 °C. A mistura betuminosa com cápsulas teve uma recuperação superior à da mistura sem cápsulas, demonstrando o benefício deste

constituente. Contudo, admite-se que o nível de dano muito extenso induzido no ensaio (vd. Figura 7(b)) limitou a capacidade de autorreparação promovida pelo óleo vegetal.

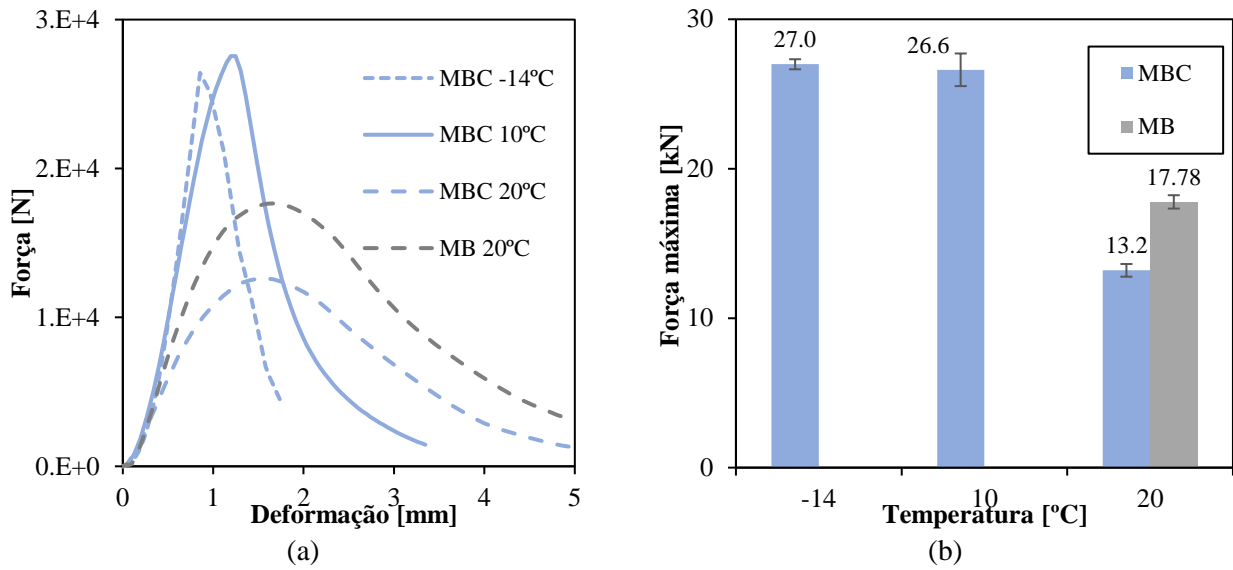


Figura 6. Resistência à tração (tração indireta) [8]: (a) força Vs. deformação; (b) variação da força máxima com a temperatura.

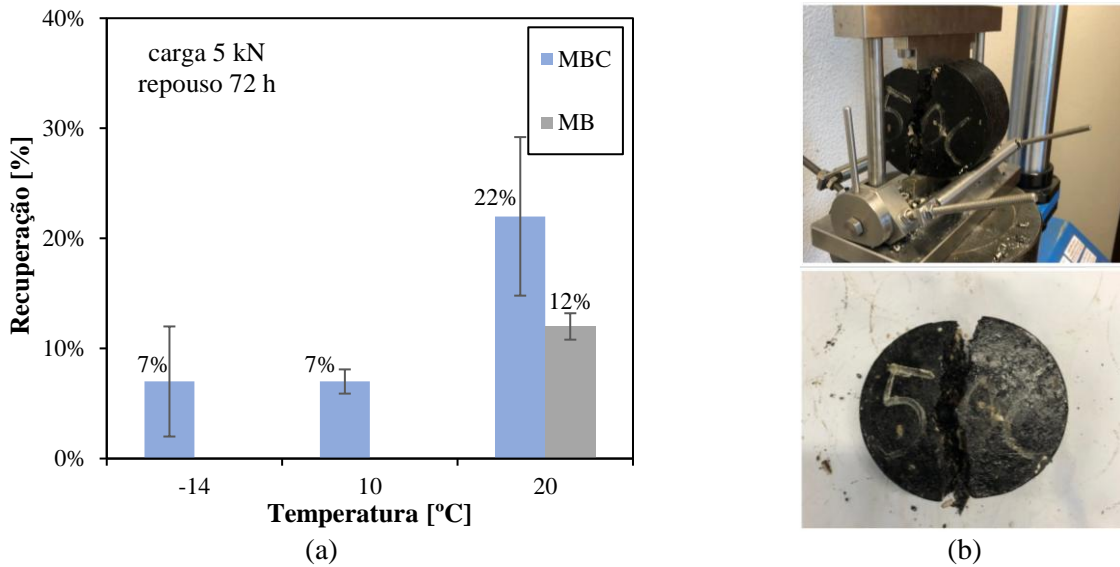


Figura 7. Autorreparação medida em ensaio de tração indireta [8]: (a) recuperação da resistência à tração; (b) provete durante e após ensaio.

3.4 Resistência à fadiga

A resistência à fadiga das misturas betuminosa é avaliada através de ensaios de carregamento cíclico e pode ser também utilizada para avaliar a capacidade de autorreparação. Deste modo, no estudo de Pereira [9] avaliou-se a resistência à fadiga no ensaio de flexão em 4 pontos (20 °C) e o ensaio foi realizado duas vezes sobre as mesmas vigas para avaliar a capacidade de autorreparação. Os provetes de mistura betuminosa do tipo AC 20 base 35/50 incorporando cápsulas (0%, 0,50%, 0,75% e 1,00%) foram envelhecidos em laboratório antes do primeiro ensaio. Em seguida, as vigas foram comprimidas e repousaram por 5 dias a 20 °C antes do 2º carregamento. Conforme se observa na Figura 8, a resistência à fadiga medida nos dois carregamentos é semelhante nas misturas betuminosas com e sem cápsulas e, com a exceção da mistura betuminosa com 0,50% de cápsulas, não existiu uma redução significativa da resistência entre o 1º e o 2º ensaio. No estudo concluiu-se ter existido a libertação do óleo pelas cápsulas antes do 2º carregamento pelo que uma explicação possível

para o efeito das cápsulas na capacidade de autorreparação ser quase nula, quando medida no ensaio de fadiga é existirem dois mecanismos com efeitos opostos. Por um lado, o rejuvenescedor contribui para a reparação de fendas existentes, mas, por outro lado, pode diminuir a rigidez da mistura betuminosa se houver uma libertação elevada.

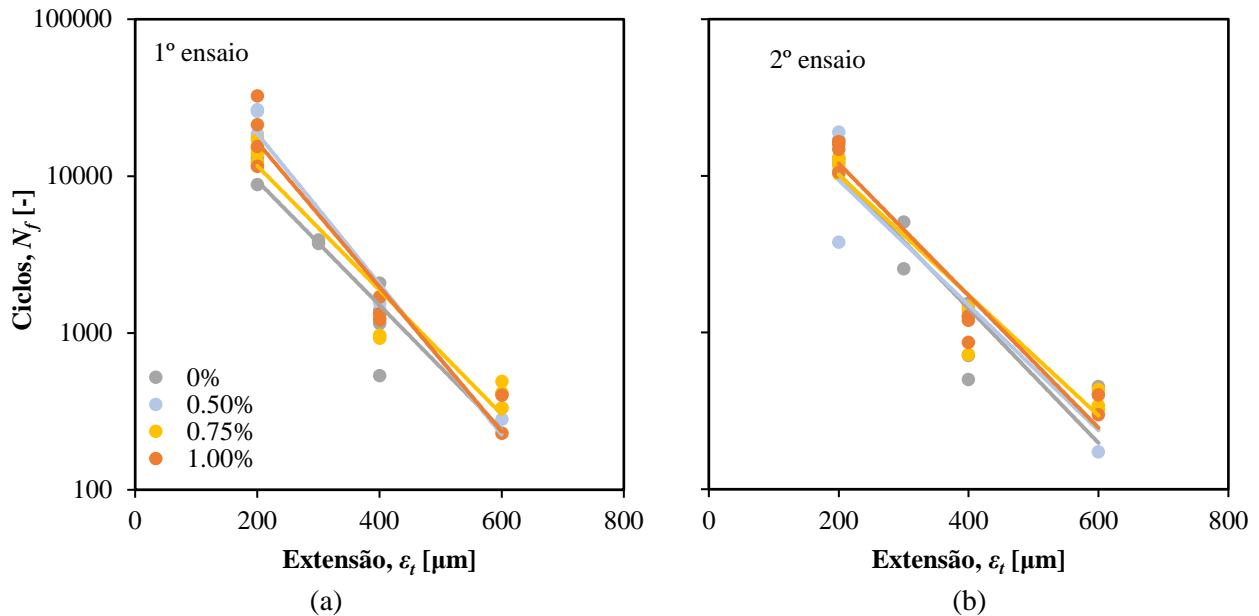


Figura 8. Resistência à fadiga (flexão de viga em 4 pontos) a 20 °C [9]: (a) 1º carregamento; (b) após repouso.

3.5 Resistência à deformação permanente

A resistência à deformação permanente das misturas betuminosas com agentes encapsulados pode ficar comprometida se existir, no período inicial em serviço, uma libertação significativa de rejuvenescedor e a consequente redução do módulo de rigidez do material. Para investigar o desempenho destas misturas, no estudo de Pereira [9] realizou-se o ensaio de pista à temperatura de 60 °C. O carregamento foi realizado em duas fases, com um período de repouso de 5 dias à temperatura ambiente entre as duas fases de carregamento. O primeiro ensaio foi interrompido quando a profundidade da rodeira atingiu 10 mm ou 20000 ciclos de carregamento. Conforme apresentado na Figura 9, a resistência da mistura AC 20 base 35/50 com até 1,00% de cápsulas é adequada. As misturas com 0,50% e 1,00% de cápsulas apresentaram uma maior taxa de acumulação de deformação que a mistura betuminosa sem cápsulas. Contudo, observou-se um aumento da resistência para as misturas betuminosas com cápsulas no 2º carregamento (após o repouso). Assim, estes resultados sugerem que os agentes encapsulados podem também melhorar o desempenho da mistura betuminosa a temperaturas elevadas.

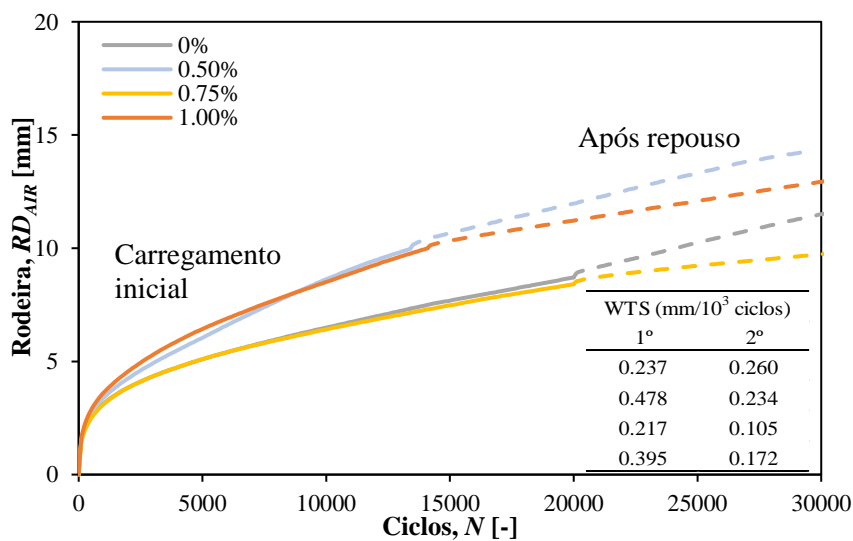


Figura 9. Resultados no ensaio de pista a 60 °C [9].

3.6 Ação dos agentes encapsulados

Os resultados experimentais apresentados nas seções anteriores, utilizando óleo vegetal encapsulado em alginato de cálcio, não mostram um benefício claro no desempenho e na durabilidade das misturas betuminosas estudadas. Note-se que os agentes encapsulados alteram as propriedades da mistura betuminosa, e estas diferenças tendem a evoluir com as condições (dano, envelhecimento, etc.) devido à degradação da matriz polimérica e à liberação do agente encapsulado. Por outro lado, o mecanismo de autorreparação ilustrado na Figura 1(a) pode não representar totalmente a ação dos agentes encapsulados no interior da mistura betuminosa. Para aumentar o conhecimento relativo à ação dos agentes encapsulados, Ribeiro [10] observou a condição das cápsulas e a dispersão do óleo pigmentado em provetes de mistura betuminosa com ligante sintético (sem cor). Neste estudo conclui-se que os resultados variam consideravelmente com o tipo de mistura betuminosa e o tipo e conteúdo de cápsulas. Por exemplo, relativamente à influência da granulometria do agregado, os resultados mostraram maior ação das cápsulas numa mistura com granulometria contínua (do tipo AC) do que na mistura com granulometria descontínua (do tipo SMA). Na Figura 10(a) observa-se uma maior área pigmentada, não considerando as cápsulas, que na Figura 10(b). Esta diferença aparente observada na liberação do agente encapsulado estará relacionada com a transmissão de forças às cápsulas que originam a liberação do óleo presente nas cápsulas.



Figura 10. Pigmentação do mastique em provetes com dano [10]: (a) AC 14; (b) SMA 11.

No mesmo estudo foi ainda investigada a ação do óleo pigmentado através da injeção de óleo em fendas existentes na mistura betuminosa. Conforme se ilustra na Figura 11, o óleo pigmentado escoou através das fendas devido à sua baixa viscosidade e difunde-se na área próxima da fenda. A coloração das margens da fenda diminui com a distância à fenda devido à menor concentração do óleo e à eventual perda (separação) do pigmento ao longo do percurso. Estas imagens apresentam uma ação do óleo semelhante à ilustrada na Figura 1(a). Deste modo, conclui-se que, para atingir uma maior capacidade de autorreparação da mistura betuminosa, contribuindo para melhor desempenho e durabilidade, será necessário ajustar as características das cápsulas e do agente encapsulado às características da mistura betuminosa e das condições de serviço.

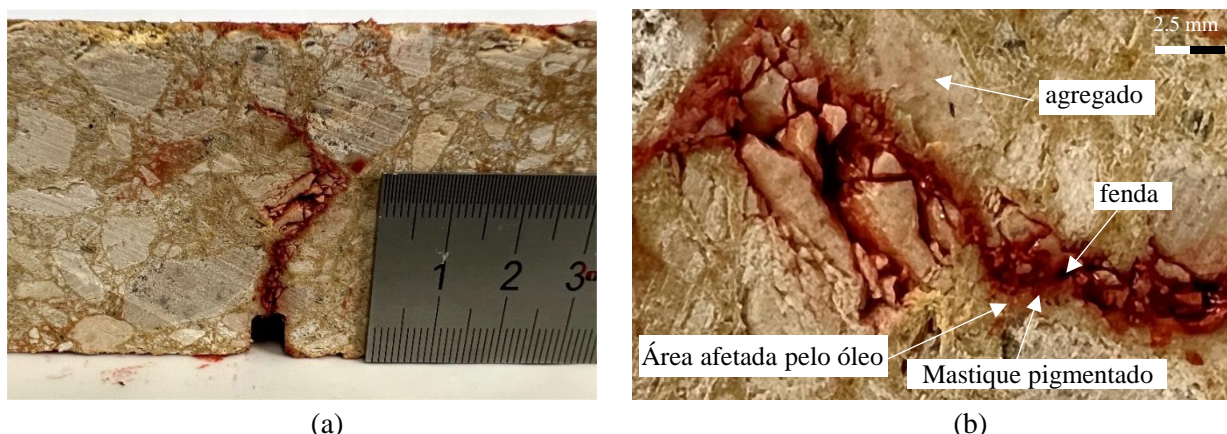


Figura 11. Dispersão do óleo pigmentado na mistura betuminosa com dano [10].

4. Considerações finais

A incorporação de rejuvenescedores encapsulados na mistura betuminosa é uma tecnologia inovadora com enorme potencial para assegurar uma maior resiliência aos pavimentos rodoviários. No âmbito da colaboração científica entre a NOVA FCT e o LNEC foram realizados diversos estudos experimentais com misturas betuminosas contendo cápsulas de alginato de cálcio com óleo vegetal. O encapsulamento por extrusão simples do óleo vegetal numa estrutura polimérica de cálcio-alginato permite obter cápsulas com resistência térmica e mecânica suficiente para serem incorporados em misturas betuminosas. As misturas betuminosas com agentes encapsulados têm uma menor rigidez inicial, variando esta diferença com o envelhecimento, e apresentam uma resistência semelhante no comportamento à fadiga e à deformação permanente. Por outro lado, existem outros fatores, nomeadamente a granulometria do agregado que influencia o dano nas cápsulas e na libertação do agente encapsulado.

Os métodos experimentais atuais foram desenvolvidos e normalizados para caracterizar as misturas betuminosas tradicionais, não sendo assim adequados às misturas betuminosas com agentes encapsulados. A validação desta técnica terá de ser realizada em condições reais. Assim, no futuro próximo pretende-se desenvolver uma formulação otimizada de uma mistura betuminosa com cápsulas de alginato de cálcio que possa ser testada e validada num caso real.

Agradecimentos

O autor Rui Micaelo agradece o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

Referências bibliográficas

1. Road Maintenance and Investment 2024 – ERF. <https://erf.be/statistics/road-maintenance-and-investment-2024/>. Accessed 13 Jan 2025
2. Bazin P, Saunier J (1967) Deformability, fatigue and healing of asphalt mixes. In: International conference on the structural design of asphalt pavements. Ann Arbor, USA
3. Williams AD, Little DN, Lytton RL, et al (2001) Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, vol II: laboratory and field testing to assess and evaluate microdamage and microdamage healing. Texas Transportation Institute, Texas, USA
4. Micaelo R, Al-Mansoori T, Garcia A (2016) Study of the mechanical properties and self-healing ability of asphalt mixture containing calcium-alginate capsules. *Construction and Building Materials* 123:734–744. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.095>
5. Garcia A, Schlangen E, Van de Ven M (2009) Two Ways of Closing Cracks on Asphalt Concrete Pavements: Microcapsules and Induction Heating. *KEM* 417–418:573–576. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.417-418.573>
6. Caeiro A (2017) Fabrico e Caracterização de Microcápsulas Poliméricas para Misturas Betuminosas. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa
7. Patil JS, Kamalapur MV, Marapur SC, Kadam DV (2010) Ionotropic gelation and polyelectrolyte complexation: the novel techniques to design hydrogel particulate sustained, modulated drug delivery system: a review. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* 5:8
8. Paciência E (2018) Auto-regeneração de misturas betuminosas com agentes encapsulados. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia
9. Pereira G (2019) Avaliação das propriedades mecânicas e de autorregeneração de misturas betuminosas com rejuvenescedores encapsulados. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia
10. Ribeiro T (2022) Study of asphalt self-healing with colorless binder and pigmented oil. Dissertação de Mestrado, NOVA School of Science and Technology
11. Alexandre J Self-healing bituminous mixtures with encapsulated rejuvenators. Contribution of aggregate gradation (Ongoing). Dissertação de Mestrado, NOVA School of Science and Technology