

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS COM AGENTES ENCAPSULADOS

Rui Micaelo¹

¹CERIS NOVA, NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA, Departamento de Engenharia Civil, 2829-516 Caparica, Portugal

email: ruilbm@fct.unl.pt <http://www.dec.fct.unl.pt/>

Sumário

Nesta comunicação são apresentados e discutidos os desenvolvimentos recentes na caracterização física e na avaliação do desempenho de misturas betuminosas com agentes encapsulados. Dado o estado atual de desenvolvimento da técnica, verificou-se serem utilizados métodos de ensaio para a caracterização dos materiais deste a nano-escala até à macro-escala. Para a avaliação do desempenho relacionado mais diretamente com a capacidade de autorreparação de fendas são utilizados protocolos de ensaio adaptados, nomeadamente ensaios de fratura- e fadiga-reparação, e com resultados distintos. De forma diferente, a avaliação da rigidez, da resistência à acumulação de deformação permanente ou da sensibilidade à água tem seguido protocolos de ensaios normalizados na maioria.

Palavras-chave: Misturas betuminosas; Materiais autorreparáveis; Rejuvenescedores; Encapsulamento.

1 INTRODUÇÃO

A capacidade autógena de autorreparação (*self-healing*), entre passagens do tráfego, dos pavimentos betuminosos é reconhecida deste há muito tempo e tem uma contribuição positiva para a sua vida útil [1, 2]. Contudo, a sua eficácia é relativamente baixa às temperaturas habituais de serviço e reduz-se de forma importante com o envelhecimento que ocorre no material. A incorporação de agentes rejuvenescedores encapsulados nas misturas betuminosas é uma das inovações propostas neste século que recorre à capacidade autógena de autorreparação do betume para prolongar a vida útil de pavimentos rodoviários e aeroportuários. Na conceção original, o agente rejuvenescedor é introduzido na mistura betuminosa durante o fabrico, mas apenas irá atuar sobre o material quando ocorre dano físico. A prova do mecanismo de autorreparação com o auxílio de agentes encapsulados foi já conseguida em laboratório recorrendo a ensaios específicos [3], sendo necessário demonstrar o benefício em termos de desempenho e durabilidade destas misturas betuminosas recorrendo a ensaios convencionais para que a tecnologia seja aceite pela indústria. Nesta comunicação apresentam-se os conceitos mais importantes sobre os mecanismos de autorreparação, autógena e estimulada pelos agentes encapsulados, e discutem-se as escalas e os métodos de caracterização da mistura betuminosa modificada.

2 MECANISMOS DE AUTORREPARAÇÃO

A autorreparação de (micro-)fendas no betume foi explicada inicialmente por Philips [4], baseado no modelo definido para polímeros por Wool & O'Connor [5], através de um processo sequencial de três etapas: (1) deformação (*flow*); (2) humedecimento (*wetting*); e (3) difusão (*diffusion*). Primeiro ocorre a deformação na zona da fenda para aproximar as superfícies, segue-se o humedecimento das superfícies controlada pelas características de tensão superficial, e finalmente a difusão molecular entre lados e a randomização conduzem à recuperação das propriedades do material (reológicas, mecânicas, etc.). O processo de autorreparação inicia-se imediatamente após o descarregamento no material na zona de propagação da fratura [6]. A reparação total corresponde ao desaparecimento da interface entre os lados iniciais da fenda e uma estrutura molecular semelhante. No entanto, de acordo com Kringos et al. [7] dano e recuperação ocorrem ambos à escala nano das estruturas moleculares que caracterizam a natureza multifásica do material. No modelo proposto de fases, o dano inicia-se nas interfaces porque as tensões são maiores nestes pontos e há uma menor resistência à fratura. O dano evolui sequencialmente

de dimensão da escala nano para micro e meso, mas pode ser revertido através da introdução de energia térmica/mecânica e alterando a cinética do material.

Para o caso de fendas abertas o processo de autorreparação depende da ocorrência de deformação suficiente previamente ao envolvimento das superfícies e difusão molecular. Garcia [8] propôs que esta deformação do betume na mistura betuminosa é possível de acordo com a teoria do escoamento capilar, considerando para tal um comportamento reológico Newtoniano do betume à temperatura de reparação e que as diferenças de pressão são suficientes para promover a deformação.

Deste modo, em qualquer das explicações, o mecanismo intrínseco de autorreparação é físico-químico. A eficácia deste mecanismo é dependente de fatores intrínsecos [9], tais como o betume (propriedades químicas e reológicas, estado de envelhecimento) e a mistura betuminosa (propriedades volumétricas), e extrínsecos como o tráfego (cargas, períodos de repouso) e o clima (temperatura, humidade). A elevada rigidez do betume às temperaturas de serviço conduz a um processo muito lento de reparação, e reduz o benefício prático. Para aumentar a eficácia da autorreparação, nas últimas décadas foram propostas duas técnicas [10], o aquecimento da mistura e a utilização de agentes rejuvenescedores encapsulados. Em ambas as técnicas, a viscosidade do betume é diminuída para que ocorra mais rapidamente a deformação, o envolvimento das superfícies e a difusão molecular. Na Fig. 1 é ilustrado o princípio de funcionamento da reparação promovida pelos agentes rejuvenescedores encapsulados, designada de técnica autónoma de autorreparação, e o efeito pretendido na vida útil dos pavimentos.

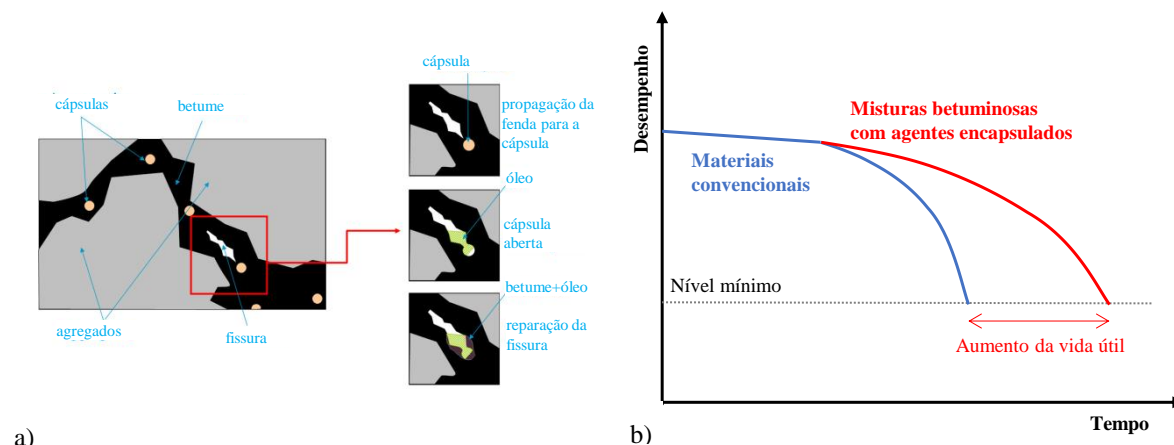


Fig.1. (a) Mecanismo de autorreparação com agentes encapsulados (adaptado de [10]); (b) efeito pretendido dos agentes encapsulados na vida útil dos pavimentos antes de ações M&R

3 MISTURAS BETUMINOSAS COM AGENTES ENCAPSULADOS

3.1 Aspetos gerais

Para a materialização da técnica de autorreparação estimulada por rejuvenescedores encapsulados é necessário primeiramente fabricar um sistema que seja capaz de (1) armazenar o rejuvenescedor, (2) sobreviver ao fabrico da mistura betuminosa, e (3) libertar o rejuvenescedor em consequência de carregamento, propagação de fenda ou um outro mecanismo decidido (ex. tempo). Assim, o estudo do encapsulamento dos agentes rejuvenescedores para incorporação em misturas betuminosas tem sido alvo de intensa investigação, sendo os métodos derivados de outros desenvolvidos para diferentes áreas técnico-científicas (ex.: indústria química e farmacêutica). O encapsulamento foi já proposto sob a forma de elementos aproximadamente esféricos (cápsulas) ou unidimensionais (fibras) e, em ambos os casos, com ou sem compartimentação do rejuvenescedor no elemento encapsulador. Os três métodos de fabrico estudados são os seguintes: (1) saturação de agregados porosos com o rejuvenescedor e revestimento das partículas com mistura de cimento-resina (cápsulas) [10]; (2) método de gelificação iónica de alginato de sódio com íons de cálcio (cápsulas e fibras) [3, 11]; (3) polimerização *in situ* de ureia-formaldeído ou outros polímeros (cápsulas) [12]. Na Fig. 2 são apresentados alguns destes sistemas de encapsulamento.

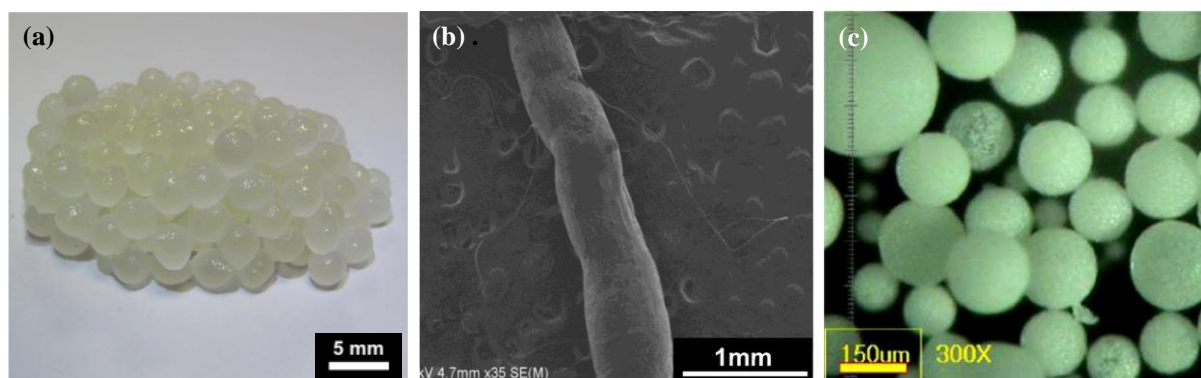


Fig.2. Rejuvenescedor encapsulado em (a) cápsulas de cálcio-alginato, (b) fibras de cálcio-alginato [13] e (c) cápsulas de resina uretano [14]

Contudo, a investigação para o desenvolvimento desta técnica não se resume ao estudo do encapsulamento de rejuvenescedores. O estudo dos mecanismos de autorreparação e da mistura betuminosa contendo rejuvenescedores encapsulados requer o emprego de técnicas e métodos de ensaio ao longo de várias ordens de magnitude, da nano à macro escala.

Nano escala (10^{-9} – 10^{-6} m): o estudo da composição, interação e mobilidade das estruturas moleculares do betume, e o efeito das novas estruturas moleculares do rejuvenescedor, é fundamental para compreender os mecanismos de autorreparação. Técnicas de análise química (ex. FTIR-ATR) e microscopia (SEM, AFM) são empregues.

Micro escala (10^{-6} – 10^{-3} m): parte significativa do processo de dano (abertura/propagação da fenda) e de reparação (deformação e fecho da fenda, e escoamento do rejuvenescedor) ocorrem nesta dimensão. É também relevante a distribuição das cápsulas na mistura e o processo de libertação do rejuvenescedor da cápsula. Para este estudo são habitualmente utilizadas técnicas de microscopia de fluorescência e a tomografia de raios-X.

Meso/macro escala ($>10^{-3}$ m): é nesta faixa de dimensão que são realizados os estudos relativos às misturas betuminosas contendo rejuvenescedores encapsulados, sendo especialmente relevante a formulação das misturas, a comparação das propriedades volumétricas, mecânicas e de desempenho de misturas com e sem cápsulas, e a caracterização da capacidade de autorreparação. Enquanto para os primeiros elementos são utilizados em geral métodos normalizados, não existem métodos normalizados para o estudo da capacidade de autorreparação, sendo deste modo utilizados métodos normalizados, adaptados de métodos normalizados e outros métodos definidos para este efeito. Deve ser também referido que em muitos estudos sobre os agentes encapsulados são utilizados provetes de betume ou de masticue, e não da mistura betuminosa. Os estudos mencionados neste trabalho utilizaram misturas betuminosas como elemento base.

3.2 Caracterização dos novos constituintes

De acordo com a normas em vigor, as misturas betuminosas e os seus constituintes (ligante betuminoso, agregados, misturas betuminosas recuperadas) têm de cumprir com determinados requisitos físicos, geométricos, químicos, reológicos e/ou de desempenho. A utilização em pequenas quantidades de aditivos comuns, tais como fibras, ceras ou pigmentos, capazes de influenciar as características mecânicas, a trabalhabilidade ou a cor, é permitida pelas normas das misturas betuminosas a quente (NP EN 13108, partes 1 a 8), não estando definidos requisitos. A utilização de rejuvenescedores é corrente quando são incorporadas misturas betuminosas recuperadas. No entanto, dado o estado embrionário de desenvolvimento da técnica, nos estudos consultados a caracterização das cápsulas contendo rejuvenescedores é extensa e recorre a técnicas avançadas. Nestes estudos, a caracterização do rejuvenescedor foca-se na compatibilização com o betume e nas propriedades deste após modificação. No Quadro 1 são listadas as propriedades e técnicas reportadas para a caracterização destes constituintes. É de referir que não se encontraram estudos sobre o efeito da contaminação no ambiente pelos rejuvenescedores. No futuro, as cápsulas contendo rejuvenescedores serão um produto comercial e muitas destas propriedades provavelmente incluídas nas fichas de produto.

Quadro 1. Propriedades e métodos de ensaio para caracterização de agentes encapsulados

Propriedade		Cápsulas/fibras com rejuvenescedores
Geométrica	Granulometria	- microscopia (MEV, fluorescência ou ótica) - difração laser
	Forma	- microscopia
Física	Massa volúmica	- método do picnómetro (água, queroneze) - calculada da composição
	Absorção de água	- NR
	Resistência térmica	- termogravimetria
Química	Composição	- espectroscopia de infravermelho - calculada da formulação/produção
Mecânica	Resistência à compressão	- ensaio monotónico de compressão (cápsulas)
	Resistência à tração	- ensaio monotónico de tração (fibras)
Compatibilidade rejuvenescedor-betume	Dispersão	- microscopia de fluorescência
	Química Composição	- espectroscopia de infravermelho - composição SARA
	Consistência	- penetração com agulha - temperatura de amolecimento
	Ductilidade	- ensaio de força-ductilidade
	Viscosidade	- viscosidade cinemática - viscosidade dinâmica
	Comportamento reológico	- módulo complexo/ângulo de fase
	Comportamento a temperatura baixa	- ensaio de flexão 3 pontos

NR – não reportado.

3.3 Caracterização da mistura betuminosa

Nos estudos anteriores em que são caracterizadas misturas betuminosas contendo rejuvenescedores encapsulados foram incorporadas no processo de fabrico diferentes proporções de cápsulas relativamente à mistura final ou ao ligante betuminoso. Em alguns estudos apenas uma proporção é estudada e noutros é variada a proporção. Em qualquer caso, não foi encontrado um processo de formulação da mistura final atendendo aos efeitos dos rejuvenescedores encapsulados. A análise apresentada nas secções seguintes refere-se maioritariamente a sistemas de encapsulamento de cálcio-alginato (cápsulas ou fibras) por ser o mais estudado. Não foram encontrados estudos de misturas betuminosas contendo microcápsulas ($<10^{-4}$ m) obtidas por polimerização *in situ*.

3.3.1 Propriedades volumétricas

A massa volúmica máxima teórica da mistura betuminosa contendo rejuvenescedores encapsulados é mais baixa que a convencional devido ao novo elemento. A massa volúmica dos sistemas de encapsulamento a partir de agregados porosos (1.973 g/cm^3 [15]) é maior que as de polímeros (cálcio-alginato $1.110\text{-}1.201 \text{ g/cm}^3$ [16]), em ambos os casos mais baixa que a dos agregados. Os rejuvenescedores têm uma massa volúmica ligeiramente inferior à do betume mas com pouca variação entre diferentes materiais ($0.90\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$). Os provetes de mistura betuminosa compactada têm um aspeto geral semelhante aos de mistura convencional (vd. Fig. 3). Relativamente aos vazios, seja esta avaliada em termos dos vazios na mistura de agregados (VMA) ou do volume de vazios final, estes variam com o efeito do novo elemento na compactibilidade da mistura. Durante a compactação, as cápsulas de agregados porosos são rígidas e têm um efeito semelhante ao dos outros agregados enquanto os sistemas poliméricos conseguem deformar-se para se adaptar à estrutura de agregados base da mistura, conforme é ilustrado em [3] para cápsulas de cálcio-alginato. Esta deformação leva contudo a uma perda de rejuvenescedor para a mistura betuminosa (1.53% do total das cápsulas reportado em [3]) que pode alterar a compactibilidade. Em diversos estudos [17–19] a variação do volume de vazios pelo efeito das cápsulas é baixo.

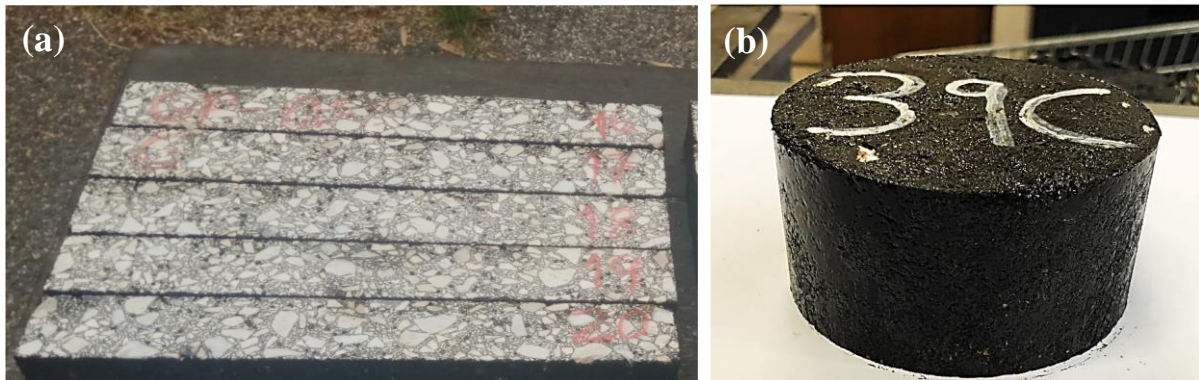


Fig.3. Provetes de mistura betuminosa com cápsulas de cálcio-alginato com óleo de girassol: (a) prismáticos cortados de lajetas compactadas por rolo [20]; (b) cilíndrico no compactador giratório [21]

3.3.2 Módulo de rigidez

O módulo de rigidez da mistura betuminosa contribui significativamente para a deformação do pavimento quando sujeito ao carregamento do tráfego, sendo uma variável fundamental no dimensionamento da estrutura. Na Fig. 4 são apresentados os resultados de dois estudos sobre o efeito de cápsulas e fibras de cálcio-alginato em misturas betuminosas com diferentes configurações de ensaio (viga à flexão em 4 pontos e tração indireta em cilindro), ambas previstas na norma EN 12697-26. Enquanto no 1º estudo, em que utilizou a configuração de viga à flexão em 4 pontos, se verifica uma redução da rigidez da mistura (betão betuminoso) pelo efeito das cápsulas, no outro estudo foi reportado o aumento da rigidez (betão drenante) com as fibras e o conteúdo adicionado, embora com influência da composição de fabrico das mesmas. Note-se que dependendo da dimensão e rigidez do sistema de encapsulamento existe uma interação diferente com a estrutura dos agregados grossos, e esta interação também deverá variar com a curva granulométrica da mistura. Deste modo, o efeito final das cápsulas/fibras na rigidez da mistura deve ser determinado em cada caso. Os métodos normalizados demonstraram nos estudos referidos, e em estudos similares [17, 22], serem capazes de caracterizar adequadamente o comportamento inicial (sem dano) das misturas.

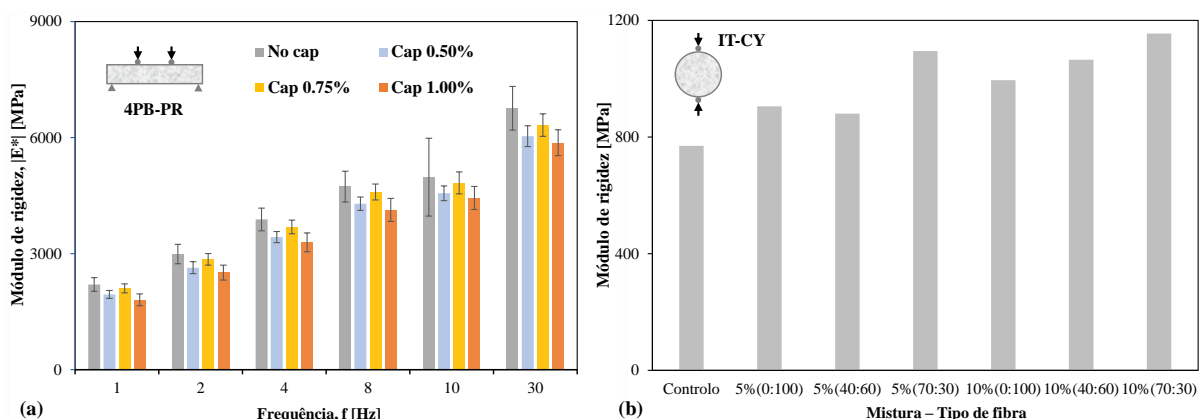


Fig.4. Efeito de agentes encapsulados no módulo de rigidez: (a) cápsulas de cálcio-alginato (dados [20]); (b) fibras de cálcio-alginato (adaptado de [11])

3.3.3 Resistência ao carregamento cíclico

Duas das patologias mais comuns nos pavimentos rodoviários – as rodeiras e o fendilhamento – estão diretamente relacionadas com o comportamento das misturas betuminosas com o acumulado de tráfego em serviço, embora

em condições diferentes de temperatura e tipo de tráfego. Se por um lado os agentes rejuvenescedores reduzem a viscosidade do betume para promover a autorreparação de fendas, esse efeito ou do sistema de encapsulamento não deve aumentar a sensibilidade da mistura betuminosa ao carregamento, com o aparecimento mais rápido de fendas ou a acumulação de deformação permanente. Caso contrário, o benefício da autorreparação seria anulado.

Para a caracterização da resistência à fadiga, na normalização europeia, recorre-se a ensaios de carregamento cíclico baseada numa abordagem fundamental, sendo as configurações de ensaio mais comuns os ensaios de tração indireta em provetes cilíndricos e de viga à flexão em 4 pontos (EN 12697-24) também utilizados para a caracterização da rigidez. Na Fig. 5 apresentam-se os resultados de dois estudos em que foi comparada a resistência à fadiga, em configurações de ensaio distintas, de misturas betuminosas densas com e sem cápsulas/fibras de cálcio-alginato. Num dos estudos observa-se um efeito negativo dos agentes encapsulados e no outro estudo não se verifica. As interfaces entre a fibra/cápsula e o betume ou agregado tem características de adesão diferentes do agregado/betume e podem ser mais propensas à abertura da fenda. A interface agregado-cápsula não tem resistência à tração se a cápsula não estiver envolvida em betume, ou esta resistência é diminuta se estiver afetada pelo rejuvenescedor eventualmente libertado. Em [3], as imagens tomográficas mostraram muito contactos cápsula-agregado.

Note-se que nos métodos normalizados o provete é sujeito a carregamento cíclico, sem períodos de descanso, e o limite da resistência à fadiga (nº de ciclos) é definido quando o provete atinge determinada deformação ou redução da rigidez. Assim, a resistência determinada do ensaio não considera o benefício da autorreparação intrínseca e estimulada pelas cápsulas (autónoma).

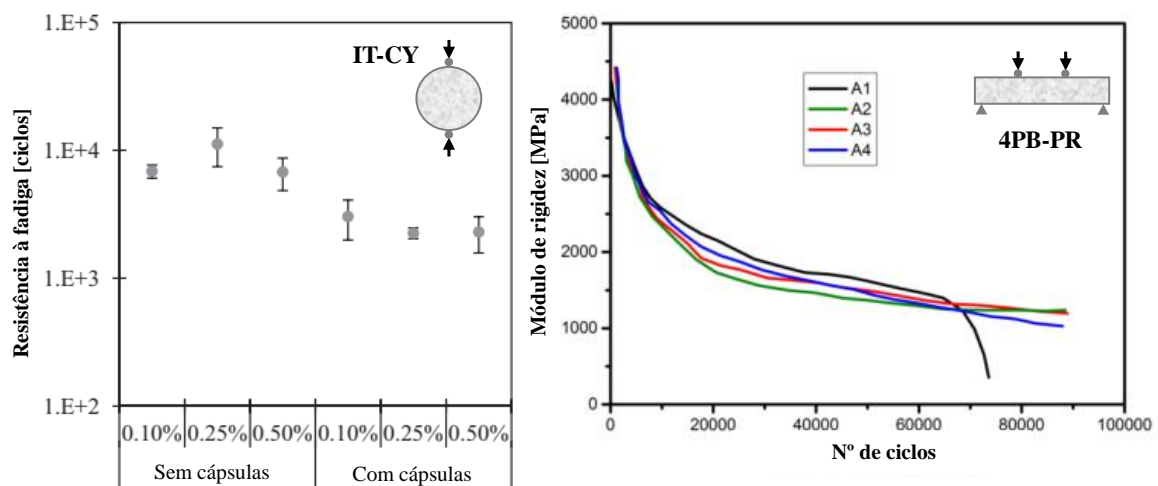


Fig.5. Efeito de agentes encapsulados na resistência à fadiga: (a) cápsulas de cálcio-alginato (adaptado de [17]); (b) fibras de cálcio-alginato (adaptado de [23])

A avaliação da resistência à acumulação de deformação permanente de misturas betuminosas com agentes encapsulados tem sido realizada também com métodos normalizados, nomeadamente o ensaio de pista (EN 12697-20) e o ensaio de compressão uniaxial cíclica (DD 226:1996, EN 12697-25). Note-se que uma libertação prematura do rejuvenescedor, e a conseqüente menor rigidez em compressão/tração da mistura betuminosa, assim como a eventual menor rigidez ao corte das interfaces agregado-cápsula/fibra podem levar à mais rápida acumulação de deformação permanente no pavimento. Contudo, os resultados experimentais (vd. Fig. 6) mostraram um comportamento global da mistura com agentes encapsulados semelhante ao da mistura convencional. Aliás, em [19] as lajes foram ensaiadas duas vezes, antes e depois de um período de descanso longo (5 dias), e o comportamento global não se alterou. As razões indicadas para o bom comportamento da mistura betuminosa com agentes encapsulados são a semelhança das propriedades volumétricas relativa às misturas convencionais e a deformação permanente resultar essencialmente da deformação por corte e não da densificação. Também não é excluída a hipótese dos agentes encapsulados poderem mitigar a taxa de evolução das deformações microestruturais com o carregamento, nomeadamente no período entre cargas. Contudo, em [24] foi concluído que a deformação permanente aumenta com a quantidade de rejuvenescedor libertado para a mistura betuminosa.

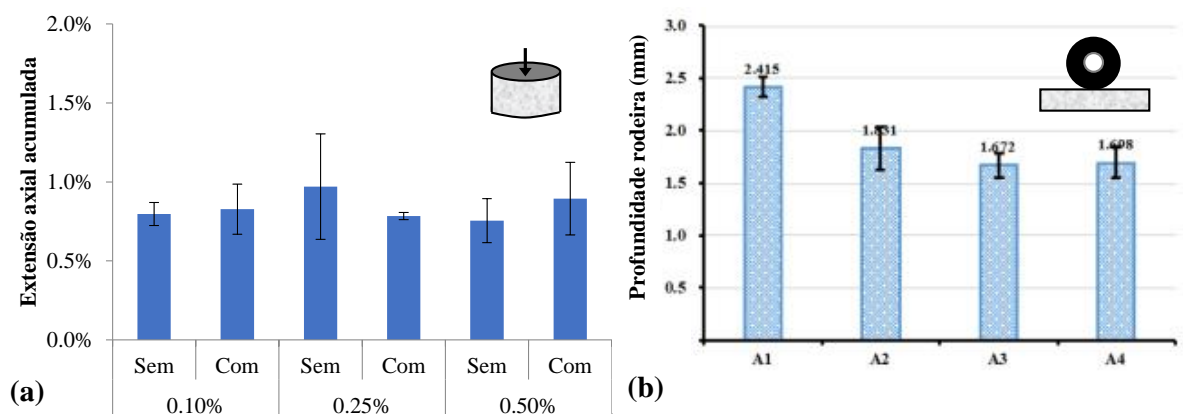


Fig.6. Efeito de agentes encapsulados na deformação acumulada: (a) cápsulas de cálcio-alginato (dados [17]); (b) fibras de cálcio-alginato (adaptado de [23])

3.3.4 Coesão e sensibilidade à água

Uma das famílias de degradações de pavimentos mais importante é a desagregação da camada de desgaste, que está relacionada com a qualidade da ligação entre os constituintes (coesão da mistura) e a sensibilidade à ação da água ou do gelo/degelo (não importante em Portugal). Os ensaios em misturas betuminosas mais utilizados são a tração indireta de provetes cilíndricos (EN 12697-23), avaliada pela resistência conservada em provetes condicionados ou não em água (EN 12697-12), e em misturas betuminosas drenantes com a avaliação da perda por desgaste na máquina de Los Angeles (EN 12697-17). Foram encontrados alguns estudos em que estes ensaios foram realizados em misturas betuminosas com cápsulas/fibras de alginato de cálcio. Em [17, 22] observou-se valores semelhantes de resistência conservada em misturas tipo AC e SMA com e sem cápsulas. De forma diferente, para a perda por desgaste, em [25] foi observada um aumento da perda de material com o aumento das cápsulas, e em [17] esta tendência não se verificou e a perda foi menor nos provetes com cápsulas, inclusive quando condicionados previamente em água. Estes dados experimentais são bons indicadores do sucesso da tecnologia.

3.3.5 Capacidade de autorreparação

De forma diferente das propriedades anteriores, não existem métodos normalizados para a caracterização da autorreparação, intrínseca ou autónoma. Relativamente ao procedimento de ensaio, em estudos anteriores foram utilizados ensaios que se podem classificar em dois grupos distintos, fratura-reparação e fadiga-reparação. Nos ensaios de fratura-reparação é aplicado ao provete um carregamento monotónico que induz uma fenda grande e bem definida, em alguns casos com a fratura total do provete em duas metades, sendo em seguida realizado um protocolo para a reparação, e finalmente sujeito a novo carregamento. Nos ensaios de fadiga-reparação, é aplicado um carregamento cíclico até atingir um determinado nível de dano, seguido do procedimento para reparação dos danos e finalmente realizado novo carregamento. A reparação depende do mecanismo de funcionamento, que no caso da autorreparação intrínseca ou autónoma corresponde a um período de repouso e no caso da estimulada pela temperatura corresponde à realização de um aquecimento. Aliás, um dos métodos mais utilizados para avaliar a autorreparação intrínseca da mistura betuminosa é introduzir períodos de repouso curtos periódicos no carregamento cíclico.

Geralmente, no método de fratura-reparação, é realizado no provete um entalhe no local pretendido para o início da fenda e o carregamento é aplicado com o provete condicionado previamente em condições de muito baixa temperatura (congelamento) para que a fenda (fratura) ocorra quase sem deformação em outras zonas do provete. Assim, o método de fratura-reparação avalia a capacidade de reparar uma fenda única e grande, situação que se afasta significativamente das condições reais nos pavimentos. Em geral, o fendilhamento visto à superfície é o resultado de um processo lento que inicia com microfendas que posteriormente se interligam para formar fendas largas. Os ensaios de carregamento cíclico (fadiga) pretendem simular este processo natural (lento) de dano no material, o qual é mais complexo de caracterizar e de medir o efeito da autorreparação. Por isso, alguns estudos

anteriores chegaram a conclusões distintas quando baseados em ensaios do tipo fadiga-reparação ou fratura-reparação. Em [17, 20] os autores avaliaram o efeito de cápsulas de cálcio-alginato contendo óleo de girassol (com distintas formulações) na capacidade de autorreparação numa mistura betuminosa contínua. Os resultados do estudo [17] em que utilizou a fratura-reparação, em viga com flexão em 3 pontos, mostraram uma capacidade de autorreparação notável que não foi verificada com o ensaio de fadiga-reparação num outro estudo [20]. Note-se que com um conteúdo de cápsulas de 0.5%, relativo à massa da mistura betuminosa, foi possível recuperar cerca de 50% da resistência à flexão inicial num segundo ensaio após cerca de 80 h de repouso a 20 °C. De forma diferente, as leis de fadiga obtidas para provetes de mistura betuminosa, sem e com cápsulas (0.50%, 0.75% e 1.00%), foram semelhantes no 1^o e 2^o ensaios, após 5 dias de repouso, tendo todo o processo decorrido à temperatura ambiente (20 °C). Tendo os autores concluído que as cápsulas haviam libertado o óleo para a mistura 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. Contudo, esta alteração de rigidez será muito menos importante se o provete for ensaiado a temperaturas muito baixas.

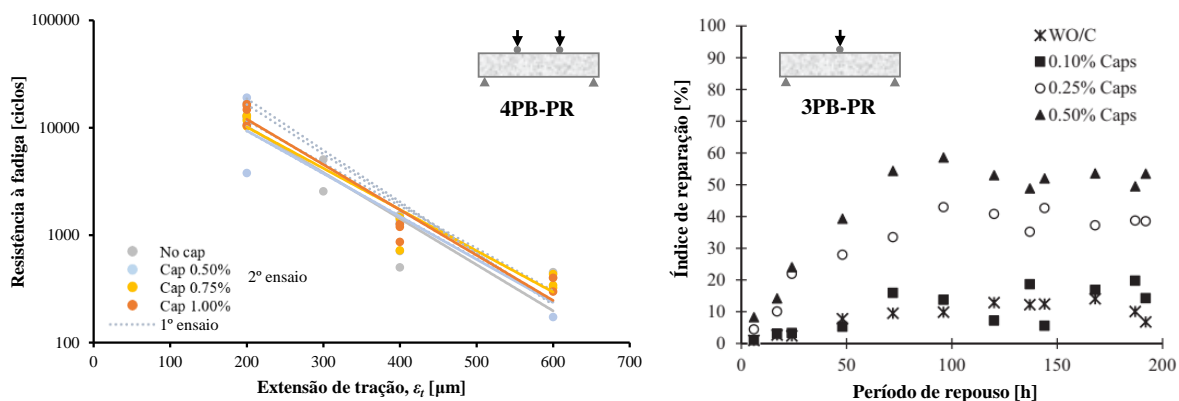


Fig.7. Capacidade de autorreparação induzida pelos agentes encapsulados: (a) carregamento cíclico (dados [20]); (b) carregamento monotónico (adaptado de [17])

No entanto, em outros estudos foram utilizados procedimentos de ensaio que se afastam mais dos procedimentos normalizados de avaliação da resistência mecânica à tração ou da resistência à fadiga. Por exemplo, em [24] a resistência à fadiga foi avaliada no equipamento do ensaio de pista e introduzindo uma base deformável para permitir a flexão da viga sob o carregamento da roda. A viga foi colocada sobre dois blocos de betão com interrupção central de 30 mm e os blocos apoiados numa base de Neopreno.

Note-se que são muitas diversas as condições do ensaio mecânico que influenciam a resposta de autorreparação do material. Por exemplo, é expectável que a eficiência da autorreparação seja maior quanto menor o dano no material, e este varia com o modo de carregamento, a deformação imposta, a velocidade de aplicação de carga, a introdução de períodos de repouso e das condições de interrupção do ensaio. Mais ainda, outras condições importantes são a temperatura de ensaio e o estado de envelhecimento do material.

A avaliação relativa à capacidade de autorreparação do material pode ser também influenciada pelo método de análise dos resultados do ensaio mecânico. Por exemplo, para ensaios do tipo fadiga-reparação, a quantificação do índice de reparação (IR) a partir da avaliação da resposta nos 1^o e 2^o carregamentos pode ser efetuada para cada provete individual ou para um conjunto de provetes. Assim, o índice de um provete i (IR_i) testado duas vezes, antes e depois do repouso, é:

$$IR_i = \frac{N_f^2}{N_f^1} \quad (1)$$

em que, N_f^1 e N_f^2 são o número de ciclos aplicados no 1^o e 2^o ensaios, respetivamente. Um método alternativo, reportado em [26], determina o índice considerando uma distribuição probabilística dos resultados. Assim, aos

resultados (N_f) do conjunto de provetes no 1º ensaio é ajustada com uma distribuição de Weibull, a partir da qual se determina o número de ciclos com uma probabilidade de falha de 50% no 1º ensaio ($N_{f0,5}$). O IR_i do provete i é:

$$IR_i = \frac{N_f^2 - N_{f0,5}}{N_{f0,5}} \quad (2)$$

Em ambos os casos, o IR do conjunto de provetes, testados em condições idênticas, é obtido pela média dos valores individuais.

4 CONCLUSÕES

A incorporação de rejuvenescedores encapsulados na mistura betuminosa é uma tecnologia inovadora para aumentar o período de vida útil dos pavimentos rodoviários e aeroportuários. A prova do mecanismo de autorreparação com o auxílio de agentes encapsulados foi já conseguida em laboratório recorrendo a ensaios específicos, sendo necessário demonstrar o benefício em termos de desempenho e durabilidade destas misturas betuminosas recorrendo a ensaios convencionais para que a tecnologia seja aceite pela indústria.

Esta comunicação apresenta e discute os desenvolvimentos recentes na caracterização física e avaliação do desempenho de misturas betuminosas com agentes encapsulados. Os estudos sobre as misturas betuminosas fazem parte da investigação ao nível da meso/macro escala, contudo uma parte significativa da investigação realiza-se em escalas de dimensão inferior (nano e micro), como é o caso do desenvolvimento de novos sistemas de encapsulamento. Neste trabalho são apresentados os métodos utilizados para caracterizar as misturas betuminosas contendo rejuvenescedores encapsulados relativamente às propriedades volumétricas, módulo de rigidez, resistência ao carregamento cíclico, coesão, sensibilidade à água e capacidade de autorreparação. Para avaliar a capacidade de autorreparação foram utilizados maioritariamente protocolos de ensaio normalizados e com resultados satisfatórios. Para a avaliação do desempenho relacionado mais diretamente com a capacidade de autorreparação de fendas foram utilizados protocolos de ensaio adaptados, nomeadamente ensaios de fratura- e fadiga-reparação, e com métodos de análise dos resultados distintos. Conclui-se ser necessário investigar no futuro estes diferentes métodos de avaliação, nomeadamente a capacidade de representar de forma realista os mecanismos de dano e autorreparação, e comparando-os entre si com os mesmos materiais.

5 AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento (UIDB/04625/2020) da unidade de investigação CERIS.

6 REFERÊNCIAS

1. 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
2. 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
3. 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>
4. Qiu J, van de Ven MFC, Wu SP, et al (2011) Investigating self healing behaviour of pure bitumen using Dynamic Shear Rheometer. *Fuel* 90:2710–2720. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.016>
5. Wool RP, O'Connor KM (1981) A theory crack healing in polymers. *Journal of Applied Physics* 52:5953–5963. <https://doi.org/10.1063/1.328526>
6. Little DN, Bhasin A (2007) Exploring Mechanism of Healing in Asphalt Mixtures and Quantifying its Impact. In: van der Zwaag S (ed) *Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 205–218
7. Kringos N, Schmetts A, Scarpas A, Pauli T (2011) Towards an understanding of the self healing capacity of asphaltic mixtures. *Heron* 56:49–79

8. García Á (2012) Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel* 93:264–272. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.009>
9. Varma R, Balieu R, Kringos N (2021) A state-of-the-art review on self-healing in asphalt materials: Mechanical testing and analysis approaches. *Construction and Building Materials* 310:125197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125197>
10. 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>
11. Tabaković A, Braak D, van Gerwen M, et al (2017) The compartmented alginate fibres optimisation for bitumen rejuvenator encapsulation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 4:347–359. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.01.004>
12. Su J-F, Qiu J, Schlangen E (2013) Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen. *Polymer Degradation and Stability* 98:1205–1215. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.03.008>
13. Shu B, Wu S, Dong L, et al (2019) Microfluidic synthesis of polymeric fibers containing rejuvenating agent for asphalt self-healing. *Construction and Building Materials* 219:176–183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.178>
14. Chung K, Lee S, Cho W, et al (2018) Rheological analysis of self-healing property of microcapsule-containing asphalt. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 64:284–291. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.03.026>
15. García Á, Schlangen E, van de Ven M, Sierra-Beltrán G (2010) Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials* 184:603–611. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.078>
16. Al-Mansoori T, Norambuena-Contreras J, Micaelo R, Garcia A (2018) Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators. *Construction and Building Materials* 161:330–339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.125>
17. Al-Mansoori T, Micaelo R, Artamendi I, et al (2017) Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials* 155:1091–1100. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.137>
18. Norambuena-Contreras J, Yalcin E, Garcia A, et al (2018) Effect of mixing and ageing on the mechanical and self-healing properties of asphalt mixtures containing polymeric capsules. *Construction and Building Materials* 175:254–266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.153>
19. Micaelo R, Freire AC, Pereira G (2020) Asphalt self-healing with encapsulated rejuvenators: effect of calcium-alginate capsules on stiffness, fatigue and rutting properties. *Mater Struct* 53:20. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-1453-7>
20. 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
21. Paciência E (2018) Auto-regeneração de misturas betuminosas com agentes encapsulados. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia
22. Norambuena-Contreras Jose, Yalcin Erkut, Hudson-Griffiths Robin, García Alvaro (2019) Mechanical and Self-Healing Properties of Stone Mastic Asphalt Containing Encapsulated Rejuvenators. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31:04019052. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002687](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002687)
23. Shu B, Bao S, Wu S, et al (2019) Synthesis and Effect of Encapsulating Rejuvenator Fiber on the Performance of Asphalt Mixture. *Materials (Basel)* 12:.. <https://doi.org/10.3390/ma12081266>
24. Ruiz-Riancho N, Saadoon T, Garcia A, et al (2021) Optimisation of self-healing properties for asphalts containing encapsulated oil to mitigate reflective cracking and maximize skid and rutting resistance. *Construction and Building Materials* 300:123879. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123879>
25. Norambuena-Contreras J, Liu Q, Zhang L, et al (2019) Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures. *Mater Struct* 52:78. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1376-3>
26. Garcia A, Salih S, Gómez-Meijide B (2020) Optimum moment to heal cracks in asphalt roads by means electromagnetic induction. *Construction and Building Materials* 238:117627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117627>