

Análise de desenvolvimentos no domínio dos materiais de construção auto-reparadores

Anabela de Sá Gomes^{1†}, Fernando Pacheco Torgal², Aires Camões de Azevedo³

Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800 Guimarães, Portugal

RESUMO

A degradação de infraestruturas é atualmente um tema de grande importância quer pelos custos associados na sua futura reparação e reabilitação, quer também pelas gravosas consequências sociais e económicas devido à sua utilização condicionada aquando da execução das obras de reparação e reabilitação. As investigações sobre materiais que permitam minimizar estes problemas levaram ao estudo mais aprofundado de materiais com capacidade de auto-reparação, possibilitando a obtenção de estruturas mais sustentáveis, duráveis e com custos mais baixos.

Neste artigo serão aprofundadas quatro vertentes para a auto-reparação do betão, nomeadamente, a auto-reparação com recurso à utilização de cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos, por hidratação posterior, betões com ductilidade ultraelevada e auto-reparação por recurso a bactérias. Também se terá em atenção o estudo destes materiais que favoreçam a durabilidade do betão e minimizem os efeitos prejudiciais para o ambiente durante a sua produção.

1. INTRODUÇÃO

Muito embora as atividades de construção contribuam para melhorar a qualidade de vida dos seres humanos, estas também têm um impacto significativo sobre o meio ambiente, pois a produção de materiais de construção requer um elevado consumo de energia e conduz à emissão de gases responsáveis pelo efeito de estufa (GEE). A indústria de produção do betão é um dos principais contribuintes para as alterações climáticas, contribuindo com cerca de 5% das emissões de GEE através da produção de cimento Portland. Junto com estas emissões atmosféricas, a construção, reparação e reabilitação de infraestruturas de betão levam à produção de grandes quantidades de betão e seus constituintes (Lepech et al., 2010).

De acordo com a Academia de Engenharia dos EUA a degradação de infraestruturas é um dos principais desafios que atualmente os engenheiros civis enfrentam (Pacheco-Torgal, 2013). Estima-se que naquele país quase 30% de todas as obras de arte apresentem sinais de degradação devido a problemas de corrosão e ainda que nos próximos 5 anos os custos

¹ Mestre em Engenharia Civil

[†] Autor para correspondência (a51336@alunos.uminho.pt)

² Doutor em Engenharia Civil

³ Professor Auxiliar

associados à reparação e reabilitação de infraestruturas ascendam a 1.6 triliões de dólares. Na Europa quase 84.000 pontes de betão armado e pós-esforçado precisam de obras de manutenção, reparação ou reforço estrutural cujo custo anual ascende a mais de 250 milhões de euros (Pacheco-Torgal, 2013). E estima-se que neste continente, 50% do orçamento de construção anual é gasto na reabilitação e reparação das estruturas existentes (Schlangen et al., 2013).

Por outro lado, quando tais obras incidem em infraestruturas viárias, isso pode afetar o fluxo de tráfego e, conseqüentemente, resultará em elevados custos sociais e económicos. Estima-se que só nos EUA tais constrangimentos se traduzem num desperdício anual de tempo e combustível acima de 100 biliões de dólares (Pacheco-Torgal, 2013).

Durabilidade do betão significa, acima de tudo, minimizar a possibilidade de elementos agressivos entrarem no betão, sob determinadas condições ambientais (Pacheco-Torgal et al., 2013).

A pouca durabilidade do material é muitas vezes a causa da deterioração prematura das infraestruturas e a fissuração é uma das principais razões por esta pouca durabilidade das estruturas de betão. De um modo geral, as fissuras no betão podem ocorrer em qualquer etapa da vida útil das estruturas devido a instabilidades de volume, tais como retração autógena e/ou retração por secagem. Quando ocorre a fissuração em elementos de betão armado, não só a rigidez é reduzida como também acontece a corrosão do aço devido à penetração da chuva e substâncias agressivas, reduzindo a segurança estrutural e facilidade de manutenção (Mihashi et al., 2012).

Uma forma de contribuir para a durabilidade do betão é a utilização de tratamentos da superfície deste com materiais impermeabilizantes, para impedir a entrada de substâncias agressivas para o seu interior. Contudo, os tratamentos mais comuns utilizam resinas epoxídicas, silicone (siloxanos), acrílicos, poliuretanos, polimetacrilatos, os quais apresentam algum tipo de toxicidade (Pacheco-Torgal, 2013).

Neste contexto, a disponibilidade de materiais com a capacidade de auto-reparação e com baixa toxicidade contribuiria para um aumento da durabilidade do betão permitindo a redução quer dos trabalhos de reabilitação quer da construção de novas infraestruturas, uma redução dos custos associados e das emissões de GEE.

Na década de 90, Dry começou a trabalhar na auto-reparação do betão (Dry, 1994 apud Van Tittelboom et al., 2013) e de polímeros (Dry, 1996 apud Van Tittelboom et al., 2013), mas foi apenas em 2001, quando White et al. (2001) publicaram um artigo sobre a auto-reparação em materiais à base de polímeros que a investigação sobre materiais de auto-reparação começou a atrair muita atenção (Figura 1).

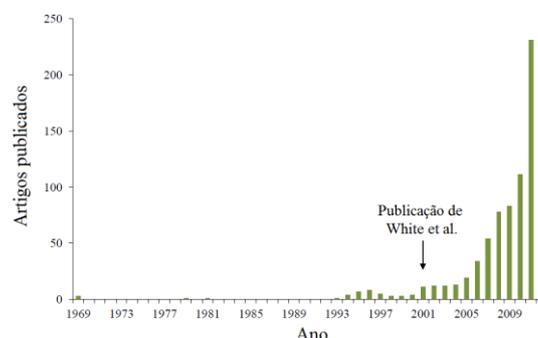


Figura 1 – Evolução da quantidade de artigos publicados sobre materiais de auto-reparação (Van Tittelboom et al., 2013)

No que diz respeito à forma de como dotar materiais compósitos com propriedades de auto-reparação e melhorar a eficiência de auto-reparação, vários estudos foram já realizados

durante as últimas décadas, tendo os mesmos gerado uma série de estratégias inovadoras que no entanto são pouco conhecidas por parte dos profissionais que atuam no sector da construção e até mesmo de uma parte substancial da comunidade científica que estuda o material betão.

Note-se que a base de dados Scopus revela que em Portugal foram já produzidos quase uma centena de artigos em revistas internacionais sobre betão, contudo uma pesquisa mostrou que não foi detetado um único com o termo “self-healing concrete” no campo das palavras-chave o que mostra que o presente tema é absolutamente uma novidade no nosso país. Pacheco-Torgal (2013) procedeu a uma análise sucinta do estado da arte destes materiais contudo a novidade, pertinência e importância dos mesmos justificam uma análise mais recente como a levada a cabo no presente artigo.

2. AUTO-REPARAÇÃO COM RECURSO À UTILIZAÇÃO DE CÁPSULAS OU FIBRAS OCAS CONTENDO AGENTES QUÍMICOS

Esta vertente de auto-reparação consiste na mistura de cápsulas ou fibras ocas frágeis (por vezes referido como pipetas ocas ou tubos, dependendo do diâmetro) contendo agentes químicos, denominados agentes de reparação, com o betão. Estes agentes libertam o seu conteúdo e preenchem as fissuras originadas no betão devido à sua retração ou a ações externas (White et al., 2001).

Yang et al. (2011) estudaram o desempenho de compósitos de cimento reforçados com microfibras de carbono constituídos por dois tipos de cápsulas, umas contendo um catalisador (trietilborano) e outras contendo um agente reparador (metacrilato de metilo). As microcápsulas foram dispersas em argamassa de cimento fresco juntamente com as microfibras de carbono.

A Figura 2 apresenta um esquema da auto-reparação. Quando a fenda rompe as microcápsulas, é libertado o agente de reparação para o interior desta por ação capilar. Posteriormente, a polimerização do agente de reparação é iniciada por contato com o catalisador provocando o fecho das fissuras. Com este estudo descobriu-se que quando este compósito de cimento é submetido a um esforço de compressão inferior a 80% da resistência máxima, ocorre uma redução de quase 70% da permeabilidade aos 30 dias. Os resultados mostraram ainda que o uso dos dois tipos de cápsulas melhora a resistência à fissuração e leva ao aumento da tenacidade.

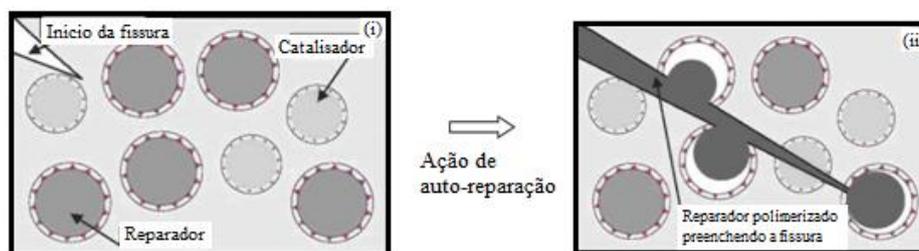


Figura 2 – i) Matriz cimentícia com cápsulas de catalisador e de material reparador onde é evidente o início de uma fissura no canto superior esquerdo; ii) a fenda rompe as cápsulas libertando o agente de reparação para o interior desta e quando em contato com o catalisador, provoca a polimerização garantindo assim o fecho das fissuras (Yang et al., 2011)

Também é relatado que Rattner (2011) apud Wu et al. (2012) utilizou microcápsulas contendo 2% de silicato de sódio. Nesta pesquisa, o betão foi primeiramente carregado até ao ponto de quase rutura e após uma semana sem carregamento, verificou-se uma recuperação de

26% da sua resistência original, enquanto o material de referência só recuperou 10% da mesma. Acredita-se que a percentagem de recuperação da resistência poderia ser ainda mais elevada se for aumentada a quantidade do agente de reparação.

Um dos primeiros estudos com aplicação em materiais de base cimentícia foi realizado por Dry (1994) apud Mihashi et al. (2012). Mais tarde, Dry (2000) estudou a aplicação de fibras ocas com selante sob a parte superior de dois tabuleiros de uma ponte em grande escala, a fim de reparar as fissuras de retração. O aparecimento das fissuras permite a entrada de água e outros elementos na matriz do betão do pavimento e, mais importante pode propiciar o risco da plataforma cair sobre a estrutura de suporte inferior. Isto conduz a danos estruturais significativos dessa estrutura de apoio.

Os resultados mostraram que após um mês de monitoramento a maioria das fibras quebraram devido à retração e foram criadas juntas de reparação, isto é, uma linha transversal de fissuras reparadas (área mais escura) como apresenta a Figura 3 (à esq.). A Figura 3 mostra também o aspeto das fibras ocas de vidro (à dir.).

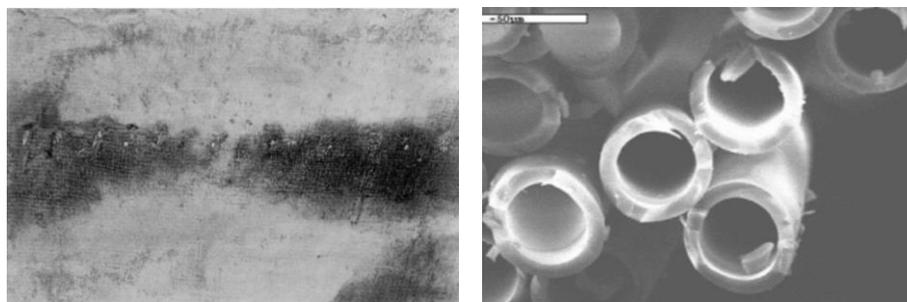


Figura 3 – Foto da junta de reparação criada pela libertação de selante dos tubos totalmente embutidos no betão (à esq.) (Dry, 2000); Fibras ocas de vidro (à dir.) (Wu et al., 2012)

Nos testes realizados por Joseph et al. (2007) o cianoacrilato de etilo foi usado como agente de reparação em tubos curvos de plástico e adotaram um sistema de auto-reparação ativa, ou seja, o sistema é acionado por intervenção humana. Na Figura 4 é apresentado um esquema representativo do teste. No interior de uma matriz cimentícia foram colocadas fibras ocas, com uma das extremidades selada e a outra ligada ao sistema de abastecimento do agente de reparação. Assim, quando ocorre uma fenda liberta-se a quantidade necessária de agente reparador. Concluiu-se que o agente de reparação fornecido por meio de um sistema de alimentação externa era capaz de alcançar uma auto-reparação bem-sucedida e este foi capaz de penetrar uma área significativa das superfícies das fissuras sob a influência das forças de sucção de capilaridade e gravidade.

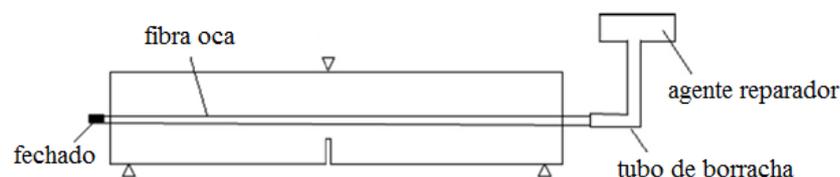


Figura 4 – Diagrama esquemático do sistema de abastecimento externo contendo o agente de reparação, baseado na descrição de Mishashi e Joseph (Wu et al., 2012)

Outra investigação de Joseph et al. (2010) baseou-se na utilização de tubos de vidro selados em ambas as extremidades com cianoacrilatos e concluíram que apenas uma pequena quantidade de agente de reparação foi libertado e que a maior parte deste permaneceu no interior dos tubos, possivelmente devido às forças de pressão negativa criadas pelo selante em ambas as extremidades dos tubos.

Em suma as vantagens e desvantagens desta vertente de auto-reparação de materiais de base cimentícia podem ser divididas como se apresenta de seguida.

Utilização de cápsulas

Vantagens:

- Libertação do agente de reparação quando necessário;
- Possível eficácia em vários eventos de danos;
- Tratamento é fácil;
- Resposta em diferentes locais de danos ao mesmo tempo (devido à dispersão das cápsulas dentro de uma matriz).

Desvantagens:

- Dificuldade na preparação e no lançamento das cápsulas para a matriz;
- Quantidade limitada de agente de reparação;
- A aderência entre as cápsulas e a matriz é uma preocupação;
- Possível efeito negativo sobre as propriedades mecânicas da matriz de cimento, se demasiadas cápsulas adotadas (Wu et al., 2012);
- Aumento da porosidade do betão levando a uma redução da resistência mecânica do mesmo.

Utilização de fibras ocas

Vantagens:

- Libertação do agente de reparação quando necessário;
- Disponível uma quantidade média de agente de cura;
- Possível eficácia em vários eventos de danos.
- Possível redução da permeabilidade à água;
- Possível melhoria da resistência do betão.

Desvantagens:

- Dificuldade no lançamento das fibras para a matriz;
- Possível dificuldade de libertação do agente de reparação, devido aos efeitos de sucção;
- Possível efeito negativo sobre as propriedades mecânicas da matriz de cimento, se demasiadas fibras ocas adotadas;
- Necessidade de fibras ocas frágeis para quebrarem aquando dos esforços que originam as fissuras, pois a probabilidade das mesmas poderem quebrar logo na fase da betonagem das estruturas é elevada;
- Aumento da porosidade dos betões levando a uma redução da resistência mecânica dos mesmos.

Utilização do sistema de abastecimento externo

Vantagens:

- Libertação do agente de reparação quando necessário;
- Grande quantidade ajustável de agente de reparação;
- Eficácia sob diversos tipos de danos;
- Elimina os efeitos de sucção das extremidades fechadas, não deixando que a maior parte do agente reparador permaneça no interior dos tubos;
- Possível melhoria da resistência do betão.

Desvantagens:

- Possível efeito negativo sobre as propriedades mecânicas da matriz de cimento, se demasiadas fibras ocas adotadas (Wu et al., 2012);
- Como o agente de reparação tem de ser fornecido para dentro do reservatório, esta técnica não pode ser totalmente considerada como auto-reparação.

3. AUTO-REPARAÇÃO POR HIDRATAÇÃO POSTERIOR

Uma outra solução para reparar as fendas no betão é a auto-reparação autónoma do próprio betão, o dano em si é o estímulo para a auto-reparação. Os betões, principalmente aqueles com baixa razão água/cimento, contêm no seu interior partículas de cimento não hidratadas uniformemente distribuídas, cuja hidratação posterior poderá levar à redução das fissuras entretanto formadas (Pacheco-Torgal, 2013).

Para Edvardsen (1999) a cristalização do carbonato de cálcio (CaCO_3) no interior da fissura é a principal causa pela auto-reparação autónoma do betão. No entanto, a auto-reparação autónoma está limitada a fissuras com uma largura reduzida.

Li e Yang (Li et al., 2007) resumiram os três critérios gerais essenciais, identificados por diversos investigadores, para presenciar a auto-reparação autónoma em materiais de betão:

- (a) Presença de espécies químicas específicas, como iões de bicarbonato (HCO_3^-), iões de carbonato (CO_3^{2-}), iões livres de cloreto (Cl^-), iões livre de cálcio (Ca^{2+}) e cimento não hidratado (C_3A);
- (b) Exposição a diferentes condições ambientais: água (submersa), pH ambiental, ciclos de molhagem/secagem (ação capilar), temperatura acima dos 80°C para alguns autores enquanto para outros deverá ser acima dos 300°C ;
- (c) Largura máxima da fenda de acordo com diversos estudos: $5\text{-}10\mu\text{m}$, $53\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $205\mu\text{m}$ e $300\mu\text{m}$.

Outras investigações mostraram que os betões reforçados com fibras têm uma capacidade muito superior de auto-reparação relativamente aos betões correntes pois conseguem que as fissuras mantenham uma largura muito reduzida o que permite o seu posterior preenchimento com carbonato de cálcio. Por outro lado as fibras podem também funcionar como núcleos de precipitação do carbonato de cálcio o que contribui para reforçar a capacidade de auto-reparação destes betões (Pacheco-Torgal, 2013). Surgem assim, os betões de ductilidade ultraelevada reforçados com fibras usualmente designados na literatura científica pela abreviatura ECC correspondente a “engineered cementitious composites”.

Apesar do betão não ser projetado para suportar cargas de tração, estas podem ocorrer quando este sofre flexão, esforço transversal ou retração e este material não possui mecanismos de modo a dissipar a energia evitando que as fissuras resultem numa fratura instável e rápida perda de capacidade de carga.

Estes betões são constituídos por uma razão de água/cimento reduzida e por um volume de fibras inferior a 2%. Caracterizam-se, ainda, por uma elevada ductilidade de deformação e fendas estreitas com largura em torno de $60\mu\text{m}$, a qual é muito menor que a largura de fenda típica observada em betão armado e betão reforçado com fibra normal (Li, 2009 e Zhou et al., 2010).

A curva de tensão-deformação resultante quantifica o comportamento mecânico do material sob carga. Quando sujeitos a um esforço de tração, enquanto o betão normal é caracterizado por uma extensão máxima de 0,01%, os betões de ductilidade ultraelevada, ECC, podem apresentar extensões entre 3 a 5% (Li, 2012).

A partir da Figura 5 é possível comparar o desempenho de um pilar de betão corrente (Figura 5a) com um pilar de betão de ductilidade ultraelevada (Figura 5b) quando sujeitos a uma ação mecânica horizontal semelhante à ação sísmica. Conforme a figura apresentada, é evidente que o desempenho do pilar de ECC é nitidamente superior ao do betão corrente, o qual não consegue manter a sua capacidade resistente inicial devido à perda de uma parte substancial do betão. O pilar de ECC apresenta microfissuras (linhas a marcador vermelho e verde), mas permanece intacto, mesmo sem armadura transversal.

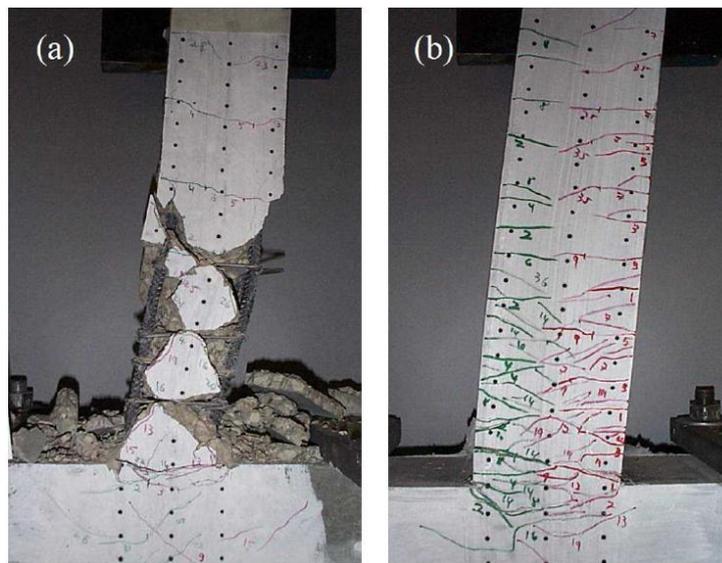


Figura 5 – Pilares de betão após ensaio mecânico semelhante ao que pode ocorrer durante um terremoto (Li, 2012)

A sequência de fotos em lapsos de tempo de uma amostra de ECC comprova como ela pode estar sujeita a auto-reparação (Figura 6). A amostra foi previamente danificada numa máquina de carregamento e sofreu auto-reparação das suas microfissuras quando exposta a ciclos de molhagem e secagem em laboratório. O autor Li (2012) menciona que o processo de reparação é revelado com um microscópio eletrónico de monitoramento (SEM) em que novos produtos químicos formaram-se na superfície da ponte de fibras dentro da fenda, assim como nas faces desta. Descobriu-se que estes produtos químicos tiveram origem numa mistura de hidrato de silicato de cálcio e bicarbonato de cálcio, formados quando a água e o ar (transportando o CO_2) entraram nas microfissuras e reagiram com os iões de cálcio lixiviados no ECC. Com o tempo, os produtos químicos selaram completamente a microfissura. Os resultados mostraram a recuperação das propriedades mecânicas do ECC e descobriu-se que a rigidez, a resistência e a ductilidade inicial foram recuperadas após a auto-reparação sob carregamentos e cenários de exposição mais comuns.

Alguns investigadores (Yang et al., 2009) estudaram a capacidade de auto-reparação dos ECC após terem sido submetidos a ciclos de molhagem e secagem indicando que estes conseguem recuperar quase 100% da ductilidade inicial, desde que as larguras da fenda sejam abaixo dos $50\mu\text{m}$. Verificaram também, que a maioria dos produtos produzidos na auto-reparação são característicos de cristais de carbonato de cálcio, correspondendo ao resíduo branco presente ao longo das linhas das fissuras tal como é possível observar na Figura 7b (Figura 7).

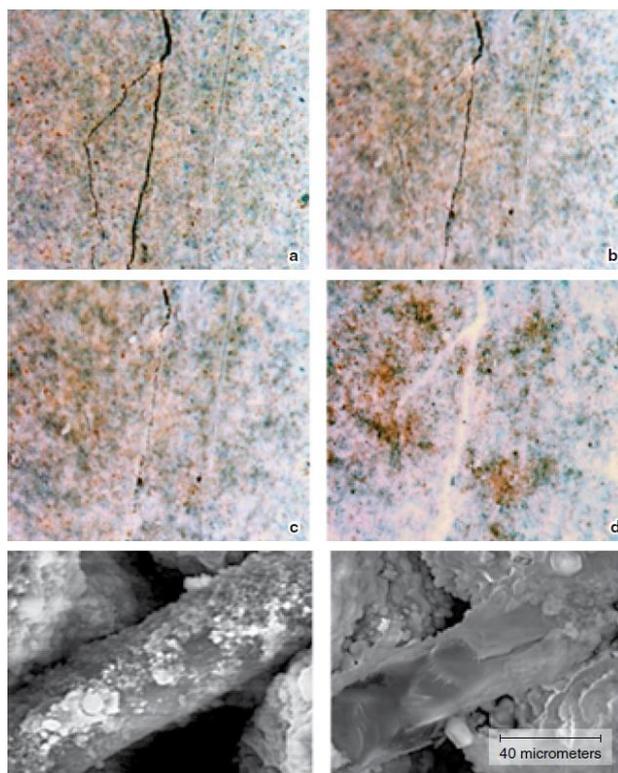


Figura 6 – Fotografias em lapsos de tempo (a-d) exibem uma amostra de ECC passando por auto-reparação. Micrografias mostram as faces da fenda e a superfície da fibra imediatamente após fissuração (canto inferior esquerdo) e com novos produtos de reparação formados após 36 horas de imersão em água (canto inferior direito) (Li, 2012)

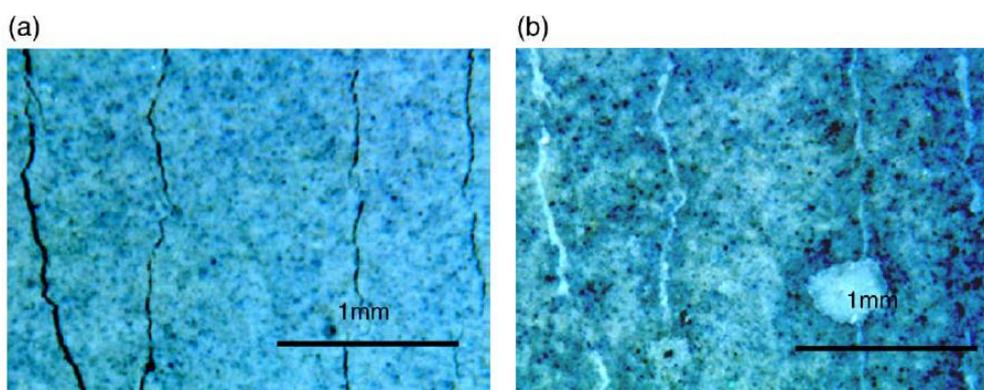


Figura 7 – Microfissuras no ECC, antes (a) e depois (b) da auto-reparação (Yang et al., 2009)

Antes de proceder à aplicação prática de uma laje de ligação de ECC num tabuleiro de uma ponte no sudeste de Michigan (EUA), o Departamento de Transportes de Michigan (Lepech et al., 2010) estudou, em laboratório, a capacidade de carga, o desempenho de fadiga e o desenvolvimento de fissuras na face à tração desta laje, juntamente com uma laje de ligação de betão para fins de comparação. Testes cíclicos revelaram que, tanto a laje de ECC como a de betão corrente, não mostravam qualquer degradação da rigidez após 100.000 ciclos de carga. No entanto, as larguras das fendas na laje de ligação de betão cresceram para mais de 600 μ m durante o teste cíclico, enquanto as larguras das fissuras na laje de ligação de ECC permaneceram pequenas, em todos os casos menores a 60 μ m. Conclui-se que o material ECC foi uma escolha adequada para a construção de lajes de ligação para substituir juntas de dilatação convencionais.

Apesar da pouca pesquisa existente no campo da auto-reparação de materiais de base cimentícia por hidratação posterior e de algumas aparentes contradições entre diferentes autores é possível indicar alguns benefícios e inconvenientes desta auto-reparação. Esta vertente é mais económica e eficaz e a auto-reparação ocorre sem a adição de componentes funcionais. No entanto, está limitada a fissuras com uma largura reduzida e depende do ambiente a que o material se encontra exposto.

Quanto à utilização de betões de ductilidade ultraelevada, esta apresenta como vantagens: Auto-reparação do próprio material sem adição de componentes funcionais; Aplicação em obras em zonas de elevada sismicidade como também para reparação de infraestruturas; Redução do impacto ambiental; Possibilidade de obter betões de ductilidade ultraelevada, reduzindo o consumo de cimento e diminuindo a libertação de CO_2 ; Excelente durabilidade; Elevada ductilidade; Resistência à fissuração e como desvantagens: Auto-reparação limitada a fissuras com uma largura reduzida, cerca de $60\mu\text{m}$.

4. AUTO-REPARAÇÃO POR RECURSO A BACTÉRIAS

Na auto-reparação por recurso a bactérias o principal conceito é a biomineralização. Este é um fenómeno pelo qual as bactérias levam à formação de minerais, tal como carbonato de cálcio (CaCO_3). A decomposição da ureia por bactérias urolíticas é uma das vias mais comuns para obter o CaCO_3 precipitado e neste processo é também produzido amónio, reconhecido como um poluente ambiental. A Figura 8 mostra uma representação simplificada da produção de CaCO_3 por bactérias urolíticas: (Figura 8-A) Após adição de ureia à bactéria, libertam-se carbono inorgânico dissolvido (DIC) e amónia (AMM) para o microambiente da bactéria; (Figura 8-B) O fenómeno anterior conjugado com a presença de iões de cálcio leva à supersaturação e início da precipitação de carbonato de cálcio na parede celular bacteriana; (Figura 8-C) Depois de um tempo, ocorre o encapsulamento da bactéria.

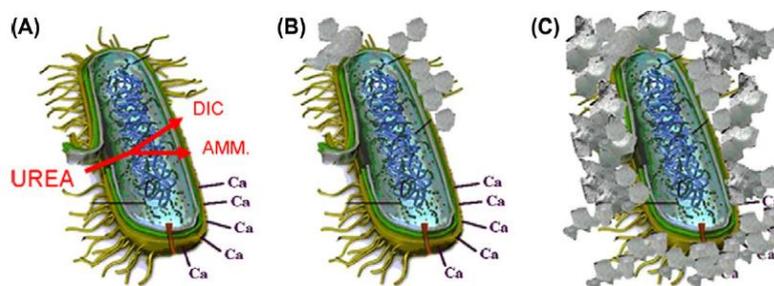


Figura 8 – Representação simplificada da produção de carbonato de cálcio por bactérias urolíticas (De Muynck et al., 2010)

Na maioria dos estudos, as bactérias urolíticas do género *Bacillus* foram usadas como agente para a produção biológica de minerais de carbonato de cálcio.

Nesta vertente de auto-reparação há estudos sobre duas maneiras de aplicação das bactérias, como tratamento superficial do betão ou como aditivo neste.

Ramachandran et al. (2001) relataram que um pH elevado dificulta o crescimento de bactérias e que o pH ótimo para o crescimento de *Bacillus pasteurii* é cerca de 9. Referiram também que o uso desta bactéria como aditivo no betão tem uma influência positiva sobre o desempenho das composições de cimento, nomeadamente para a reparação de fissuras. De acordo com Arunachalam et al. (2010), a bactéria *Bacillus sphaericus* induziu a precipitação do carbonato de cálcio a pH igual a 8 produzindo melhores resultados.

A fim de ultrapassar o problema da produção de amoníaco excessiva associada com o uso de género *Bacillus*, Jonkers et al. (2010) utilizaram os esporos bacterianos (*Bacillus*

conhii). Eles relataram uma perda de bactérias devido à diminuição contínua do diâmetro dos poros à medida que vai progredindo a hidratação do cimento. A fim de evitar a perda de bactérias, estes autores sugerem a sua encapsulação, antes da adição à mistura de betão, ou a utilização de agentes de entrada de ar para manter as bactérias ativas.

De Muynck et al. (2008) analisaram a durabilidade de betões (tendo em conta como parâmetros a carbonatação, difusão de cloretos e gelo-degelo) para superfícies tratadas com culturas de bactérias e verificaram uma redução da permeabilidade e confirmaram a semelhança do desempenho entre o tratamento com bactérias e os materiais impermeabilizantes convencionais.

Por último, esta técnica de auto-reparação apresenta como vantagens: Atividades biológicas de uma maneira livre de poluição e natural; Redução da permeabilidade; Redução da absorção de água e como desvantagens: Restrição do crescimento das bactérias devido ao alto ambiente alcalino do betão; O tempo de vida das bactérias em betão é muito mais curto do que a vida útil de serviço dos edifícios e infraestruturas; A produção de amoníaco aumenta o risco de corrosão da armadura e é um poluente que contribui para vários problemas ambientais.

5. CONCLUSÕES

Apesar das investigações promissoras na incorporação de cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos para a auto-reparação de betões, existem controvérsias relativamente à sua utilização. O facto de ser necessário cápsulas ou fibras ocas bastante frágeis e de as mesmas aumentarem a porosidade do betão, são algumas das razões que impedem a sua aplicação imediata pela indústria de construção.

A auto-reparação por hidratação posterior inclui a hidratação posterior de partículas de cimento não hidratadas e também a formação de carbonato de cálcio a partir do cálcio da pasta de cimento que reage com o dióxido de carbono dissolvido na água. Os estudos sobre a auto-reparação por hidratação posterior são insuficientes e há muitas contradições entre diferentes autores.

Um caso de sucesso da auto-reparação por hidratação posterior diz respeito aos betões de ductilidade ultraelevada reforçados com fibras. Estes são materiais com uma razão água/cimento reduzida e um volume de fibras inferior a 2%. Estes materiais promissores possuem uma elevada capacidade de auto-reparação (por hidratação posterior) pelo facto de conseguirem impedir que as fissuras não excedam 60µm mesmo no caso de elevadas deformações. Os mesmos têm sido utilizados com êxito em edifícios, mas principalmente em infraestruturas viárias como pontes e reparos de estradas. Apesar dos ECC terem um custo inicial superior ao dos betões correntes é mais vantajosa a utilização dos primeiros, pois devido ao aumento da durabilidade haverá no futuro uma menor necessidade de obras de conservação e manutenção.

O uso de bactérias para a auto-reparação do betão é um método natural e está associado com a precipitação mineral que ajuda a preencher os microporos e fissuras, reduzindo assim a sua permeabilidade. As pesquisas até agora efetuadas relativamente à auto-reparação por recurso a bactérias centraram-se mais no lado da durabilidade enquanto há pouco sobre as propriedades mecânicas. Contudo estes materiais ainda se encontram numa fase de investigação inicial longe da sua utilização efetiva pelo sector da construção.

A elaboração deste artigo evidencia que os estudos efetuados não encerram todo o conhecimento sobre as técnicas de auto-reparação do betão. Esta área está em constante investigação e todos os anos surgem novos estudos. Portanto, a engenharia de auto-reparação

de betões promete obter estruturas de betão mais duradouras, a menores custos e reduções de libertação de GEE.

Recomenda-se para trabalhos futuros: Mais investigação devem ser efetuadas para melhorar as estratégias mencionadas; Estudo em laboratório das vertentes aludidas; Estudar para que larguras de fendas é possível ocorrer a auto-reparação com recurso à utilização de cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos; Pesquisa de métodos para que não ocorra a quebra das cápsulas e dos tubos ocas na mistura do betão; Mais estudos sobre a eficiência dos agentes reparadores; Mais estudos acerca das melhores condições para uma auto-reparação autónoma; Procurar uma referência para a conceção de um betão com uma boa capacidade de auto-reparação autónoma; Aprofundar o estudo do efeito das bactérias sobre as propriedades do betão; Métodos que possibilitem o crescimento das bactérias quando aplicadas no betão; Aprofundar o estudo acerca da eficiência da mistura de bactérias no betão e destas para tratamento superficial; Desenvolver uma técnica de modo a aumentar o tempo de vida das bactérias. No que diz respeito aos ECC, neste momento, são o estudo mais avançado visto que já são aplicados com sucesso, principalmente em infraestruturas viárias. Desta forma, a contínua pesquisa destes betões e das suas propriedades será benéfico e talvez no futuro, apostar na sua aplicação em Portugal.

REFERÊNCIAS

Arunachalam, K.; Sathyanarayanan, K.; Darshan, B.; Raja, R., Studies on the characterisation of Biosealant properties of *Bacillus sphaericus*. *International Journal Engineering Science and Technology*, **2(3)**, 270–277 (2010).

De Muynck, W.; Cox, K.; De Belie, N.; Verstraete, W., Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*, **22**, 875–885 (2008).

De Muynck, W.; De Belie, N.; Verstraete, W., Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. *Ecological Engineering*, **36**, 118–136 (2010).

Dry C., Three design for the internal release of sealants, adhesives and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability. *Cement and Concrete Research*, **30**, 1969–77 (2000).

Edvardsen, C., Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, **96**, 448–454 (1999).

Jonkers, H.; Thijssen, A.; Muyzer, G.; Copuroglu, O.; Schlangen, E., Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, **36**, 230–235 (2010).

Joseph, C.; Jefferson, A.; Cantoni, M., Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials. In: *Proceedings of the first international conference on self-healing materials*, 1-8 (2007).

Joseph, C.; Jefferson, A.; Isaacs, B.; Lark, R.; Gardner, D., Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials. *Magazine of Concrete Research*, **62(11)**, 831–843 (2010).

Lepech, M.; Li, V., Sustainable pavement overlays using engineered cementitious composites. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **3(5)**, 241–250 (2010).

Li, V., Can concrete be bendable?, *American Scientist*, **10**, 484–493 (2012).

Li, V., Engineered cementitious composites (ECC) – material, structural and durability performance. In: *Nawy E, editor. Concrete Construction Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press; Chapter 24 (2009).

Li, V.; Yang, E., Self-healing in concrete materials. *In: Self-healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science*. Dordrecht: Springer, 161–193 (2007). ISBN 978-1-4020-6250-6.

Mihashi, H.; Nishiwaki, T., Development of engineered self-healing and self-repairing concrete-State-of-the-Art Report. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **10**, 170–184 (2012).

Pacheco-Torgal, F., Betões com capacidade de auto-reparação: Um contributo para a redução de custos de infra-estruturas. *Revista Maquinaria*, (**231**), 56–62 (2013).

Pacheco-Torgal, F.; Labrincha, J., Biotech cementitious materials: Some aspects of an innovative approach for concrete with enhanced durability. *Construction and Building Materials*, **40**, 1136–1141 (2013).

Ramachandran, S.; Ramakrishnan, V.; Bang, S., Remediation of concrete using micro-organisms. *ACI Materials Journal*, **98**, 3–9 (2001).

Schlangen, E.; Sangadji, S., Addressing Infrastructure Durability and Sustainability by Self-Healing Mechanisms – Recent Advances in Self-Healing Concrete and Asphalt. *Procedia Engineering*, **54**, 39–57 (2013).

Van Tittelboom, K.; De Belie, N., Self-healing in cementitious materials – A review. *Materials*, **6**, 2182–2217 (2013).

White, S.; Sottos, N.; Geubelle, P.; Moore, J.; Kessler, M.; Sriram, S.; Brown, E.; Viswanathan, S., Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, **409**, 794–797 (2001).

Wu, M.; Johannesson, B.; Geiker, M., A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, **28**, 571–583 (2012).

Yang Y.; Lepech M. D.; Yang E.; Li VC., Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles. *Cement and Concrete Research*, **39**, 382–390 (2009).

Yang, Z.; Hollar, J.; He, X.; Shi, X., A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. *Cement and Concrete Composites*, **33**, 506–512 (2011).

Zhou, J.; Qian, S.; Ye, G.; Van Breugel, K.; Li, V., Development of engineered cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag. *Materials and Structures*, **43**, 803–814 (2010).