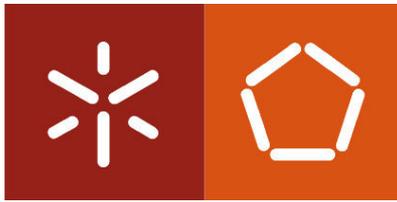




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Anabela de Sá Gomes

Materiais de construção auto-reparadores



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Anabela de Sá Gomes

Materiais de construção auto-reparadores

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Aires F. Camões de Azevedo
e do
Doutor Fernando M. Alves S. Pacheco Torgal

Outubro 2013

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que participaram de uma forma ativa na minha aprendizagem ao longo da vida e que disponibilizaram tempo e paciência a corrigir os meus erros e a esclarecer as minhas dúvidas. Apesar da tarefa algo ingrata de mencionar todos aqueles a quem reconheço o apoio prestado, gostaria de referir alguns pela particular atenção que me dedicaram.

À minha família pelo apoio incondicional e por todo o incentivo que me concederam.

Aos meus amigos que me ajudaram nesta escalada académica e da vida, através das muitas risadas, conversas, algumas discussões e muito companheirismo. Em especial à Tânia Fortes, David Branco, Patrícia Fernandes, Mariana Conde e Catarina Cupertino.

A todos os meus professores da Universidade do Minho, em especial ao meu orientador e Professor Doutor Aires F. Camões de Azevedo do Departamento de Engenharia Civil.

Ao meu coorientador Doutor Fernando M. Alves S. Pacheco Torgal, membro da Unidade de Investigação C-TAC na Universidade do Minho, pela disponibilidade, por todo o conhecimento transmitido e pela mestria no encaminhamento que me deu na resolução da presente dissertação de mestrado.

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 a custos mais baixos.

Este trabalho visa reunir investigações de vanguarda relativamente a materiais de construção auto-reparadores, como forma de perspetivar um futuro mais sustentável para a indústria da construção. 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.

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 betões de ductilidade ultraelevada reforçados com fibras usualmente designados na literatura científica pela abreviatura ECC são materiais com uma razão água/cimento reduzida e um volume de fibras inferior a 2%. Estes promissores materiais 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. 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. Contudo estes materiais ainda se encontram numa fase de investigação inicial longe da sua utilização efetiva pelo sector da construção.

Palavras-chave: auto-reparação, betão, encapsulação, hidratação posterior, ECC, bactérias, durabilidade

ABSTRACT

Infrastructures deterioration is currently a topic of great importance due to the associated costs in its future repair and rehabilitation and also of serious social and economic consequences related to its conditioned use upon the execution of repair and rehabilitation works. Investigations into materials that can minimize these problems led to the further study of materials capable of self-healing, allowing for sustainable structures, with higher durability at lower costs.

This work aims to bring together cutting-edge research on self-healing building materials as a way of shaping a more sustainable future for the construction industry. Four particular areas are addressed in this work. The cases of self-healing of concrete, in particular with the use of capsules or hollow fibers containing chemical agents, self-healing by subsequent hydration, ultra high ductility concrete and self-healing using bacteria. Concerns related to self-healing towards enhanced concrete durability and lower environmental impacts are also addressed.

Despite the promising investigations on incorporation of capsules or hollow fibers containing chemical agents for self-healing of concrete, there are still some controversies regarding its use. Capsules or hollow fibers are quite fragile and increases the porosity of the concrete, constituting some of the reasons that prevent their immediate application in the construction industry. The case of self-healing by further hydration focuses on the potential of the concrete to auto repair itself, it evolves the hydration of unreacted particles and formation of calcium carbonate, a result of reaction between calcium ions from the matrix of concrete and atmospheric carbon dioxide dissolved in water. Concrete based on engineered cementitious composites fibre reinforced usually know as ECC are materials with a low water/cement binder and a low fibre content (below 2%). These promising materials have a high self-healing ability (by further hydration) because they can maintain microcrack width below 60 μ m even for high strain conditions. The use of bacteria for self-repair of concrete is a natural method and is associated with mineral precipitation which helps fill in the micro pores and cracks, thus reducing its permeability. However, these materials are still in an early investigation stages far from real applications by the construction sector.

Keywords: self-healing, concrete, encapsulation, further hydration, ECC, bacteria, durability

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
2. AUTO-REPARAÇÃO COM RECURSO À UTILIZAÇÃO DE CÁPSULAS OU FIBRAS OCAS CONTENDO AGENTES QUÍMICOS	9
3. AUTO-REPARAÇÃO POR HIDRATAÇÃO POSTERIOR	30
4. BETÕES DE DUCTILIDADE ULTRAELEVADA (ECC).....	32
5. AUTO-REPARAÇÃO POR RECURSO A BACTÉRIAS	55
6. CONCLUSÕES.....	62
7. PERSPETIVAS FUTURAS.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Causas responsáveis pela fissuração do betão (Bai, 2009).	4
Figura 2 – Evolução da quantidade de artigos publicados sobre materiais de auto-reparação (Van Tittelboom et al., 2013).	6
Figura 3 – Princípio básico comum dos materiais auto-reparadores. a) A carga mecânica provoca uma fenda; b) Visão detalhada da fenda; c) Uma “fase móvel” é induzida; d) Fecho da fenda pela "fase móvel"; e) Imobilização após a reparação (Hager et al., 2010).	7
Figura 4 – Esquema de auto-reparação: 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 microcápsulas libertando o agente de reparação para o interior desta por ação capilar e quando em contato com o catalisador, provoca a polimerização garantindo assim o fecho das fissuras próximas (Yang et al., 2011).	10
Figura 5 – Microcápsula numa rutura típica (Wu et al., 2012).	11
Figura 6 – Fibras ocas de vidro (Wu et al., 2012).	12
Figura 7 – Amostra do pórtico de teste (Mihashi et al., 2012).	13
Figura 8 – Realce visual dos danos num composto laminado pela ação de “sangramento” de um corante fluorescente em fibras ocas de vidro (Pang et al., 2005).	14
Figura 9 – Uma foto dos tubos encaixados na superfície superior da plataforma (Dry, 2000). 15	
Figura 10 – Um desenho da superfície superior das plataformas de 6x1,20 m na qual os tubos de reparação foram incorporados (Dry, 2000).	16
Figura 11 – Uma foto da junta de reparação criada pela libertação de selante dos tubos totalmente embutidos no betão (Dry, 2000).	16
Figura 12 – Libertação do adesivo para a fenda no segundo carregamento à flexão no Pavimento 3 (Dry, 2000).	18
Figura 13 – Foto de amostras nas quais a libertação de produto químico vermelho tingido (áreas escuras) da fibra para dentro da matriz de cimento branco pode ser vista (Dry, 2000).	19
Figura 14 – Diagrama esquemático da estrutura compósita de autodiagnóstico (Mihashi et al, 2012).	20
Figura 15 – Sistema de auto-reparação para o betão com aquecimento seletivo em torno das fendas (Nishiwaki et al., 2006).	20
Figura 16 – Distribuição da temperatura medida pela termografia. a) Antes da fissuração; b) Depois da fissuração (Mihashi et al, 2012).	21

Figura 17 – Diagrama esquemático do sistema de abastecimento externo contendo o agente de reparação, baseado na descrição de Mishashi e Joseph (Wu et al., 2012). 22

Figura 18 – Sistema de auto-reparação do método de encapsulamento interno com tubos de vidro ocos. (a) Vista a meia seção; (b) Vista lateral; (c) Tubo de vidro abastecido com resina epóxi e com aquastick como selante (Wu et al., 2012). 23

Figura 19 – Direção Y da seção transversal das amostras. (A) amostra com os tubos de vidro de 2mm de diâmetro, (B) amostra dos tubos de vidro com 3mm de diâmetro e (C) amostras com tubos cerâmicos (Van Tittelboom et al., 2011). 25

Figura 20 – Desempenho de material ECC quando submetido a ensaio de flexão (Li, 2012). 32

Figura 21 – Imagens de um ECC sob tensão com um (à esquerda) ou dois entalhes (à direita) mostram que as microfissuras espalham-se para longe dos entalhes, redistribuindo as altas concentrações de tensão nas pontas do entalhe (Li, 2012). 33

Figura 22 – Relação tensão-deformação de tração uniaxial do betão (Lepech et al., 2010). 34

Figura 23 – Numa curva de tensão-deformação, o material é forçado até à rutura total para determinar a sua resistência. Esta curva para os ECC tem três regimes antes da rutura: deformação elástica (ED), o regime de transição (TR) e endurecimento por deformação (SH); o regime “d” com um declínio acentuado é depois da rutura (ou perda da capacidade de carga). Imagens a cores avançadas dos ECC (à direita, a-d) mostram a evolução de padrões de fissuras em pontos correspondentes na curva. A fissura inicial não é necessariamente a que levou à rutura total da amostra, mostrando a natureza distribuída de fissuras nos ECC. Os regimes de transição e de tensão de endurecimento não existem na curva de tensão-deformação de betão normal, mesmo que seja reforçado com fibra (Li, 2012). 36

Figura 24 – Curva tensão de tração-extensão e evolução da largura de fendas para um ECC (Kan et al., 2010). 37

Figura 25 – Fibras formando uma ponte entre as faces da microfissura (a largura da imagem é de cerca de 5 milímetros), o que vai fornecer capacidade de carga (Li, 2012). 38

Figura 26 – Pilares de betão após ensaio mecânico semelhante ao que pode ocorrer durante um terremoto: a) betões correntes com armaduras principais e secundárias; b) betões de ductilidade ultraelevada sem estribos, ECC (Li, 2012). 39

Figura 27 – A Torre Residencial Nabeaure Yokohama de 41 andares (à esquerda) foi concluída em 2007. Este contém quatro vigas de ECC por andar entre as paredes de canto (à direita, a amarelo) no núcleo do edifício, que irão reduzir os danos das paredes de canto (a verde) durante um terramoto e estabilizar o edifício (Li, 2012). 40

Figura 28 – Desenvolvimento da largura da fenda ao longo do tempo nos remendos de ECC e de betão normal (Lepech et al., 2010).	41
Figura 29 – Uma laje de ligação de ECC foi aplicada num tabuleiro de uma ponte em Michigan, em 2005 (à esquerda). A "joint jointless" é quase perfeita (à direita) (Li, 2012)....	42
Figura 30 – 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).....	45
Figura 31 – Microfissuras no ECC, antes (a) e depois (b) da auto-reparação (Yang et al., 2009).....	46
Figura 32 – Composição química dos produtos gerados na auto-reparação (Yang et al., 2009). 47	
Figura 33 – (a) Fissuras através do material auto-reparado devido à recarga após os ciclos de molhagem e secagem; (b) Formação de novas fissuras adjacentes a uma fenda anteriormente reparada (Yang et al., 2009).	47
Figura 34 – Imagens ESEM do processo de auto-reparação em ECC (fendas de 15µm): (a) antes da auto-reparação (0 ciclos); (b) após 1 ciclo; (c) após 3 ciclos; (d) após 10 ciclos; (e) após 20 ciclos e (f) após 49 ciclos (Kan et al., 2010).....	49
Figura 35 – Imagens ESEM do processo de auto-reparação em ECC (fendas de 30µm): (a) antes da auto-reparação (0 ciclos); (b) após 1 ciclo; (c) após 3 ciclos; (d) após 10 ciclos; (e) após 20 ciclos e (f) após 49 ciclos (Kan et al., 2010).....	49
Figura 36 – Imagens ESEM do processo de auto-reparação em ECC (fendas de 50µm): (a) antes da auto-reparação (0 ciclos); (b) após 1 ciclo; (c) após 3 ciclos; (d) após 10 ciclos; (e) após 20 ciclos e (f) após 49 ciclos (Kan et al., 2010).....	50
Figura 37 – Imagens ESEM do processo de auto-reparação em ECC na superfície da fibra: (a) antes da auto-reparação (0 ciclos); (b) após 1 ciclo; (c) após 3 ciclos; (d) após 10 ciclos; (e) após 20 ciclos e (f) após 49 ciclos (Kan et al., 2010).....	50
Figura 38 – Observação microscópica de produtos de cristalização na superfície da fenda (Mihashi et al.,2012).....	52
Figura 39 – Representação simplificada da produção de carbonato de cálcio por bactérias urolíticas: (A) Após adição de ureia à bactéria, libertam-se carbono inorgânico dissolvido (DIC) e amónia (AMM) para o microambiente da bactéria; (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; (C) Depois de um tempo, ocorre o encapsulamento da bactéria (De Muynck et al., 2010). 56

Figura 40 – Imagens ESEM que mostram a auto-reparação em amostras de betão à base de bactérias. Carbonato de cálcio maior (50-500 μm) produzido por bactérias incorporadas no betão na superfície das fissuras. (a) 100 μm e (b) 50 μm (Wu et al., 2012). 56

Figura 41 – Visualizações microscópicas comprovativas da selagem das fissuras numa amostra de controlo antes (a) e 100 dias depois (c); numa amostra com a utilização do agente bioquímico antes (b) e 100 dias depois (d) (Wiktor et al., 2011). 60

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Composição de vários betões (kg/m^3) de ductilidade ultraelevada e do betão de referência (Li et al., 2004). 43

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). É por isso muito importante aumentar a vida útil das infraestruturas já construídas reduzindo dessa forma quer os trabalhos de reabilitação quer também a construção de novas infraestruturas.

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). Com uma produção de 10km³/ano, o betão é e continuará a ser nas próximas décadas o material mais utilizado no Planeta Terra. A sua elevada resistência à compressão e o seu baixo custo fazem dele um material imprescindível na construção das infraestruturas necessárias para responder ao expectável aumento exponencial da população a nível mundial nas próximas décadas (Pacheco-Torgal, 2012b).

Além das preocupações com a segurança das infraestruturas de betão expostas a grandes riscos, há também implicações económicas, sociais e ambientais associados à deterioração destas sob condições normais de serviço.

De acordo com a Academia de Engenharia dos EUA a degradação de infraestruturas é um dos principais desafios que atualmente os engenheiros civis enfrentam. 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 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). Vários autores (Thoft-Christensen, 2012 e Sauer et al., 2013) defendem que só uma avaliação ao longo do ciclo de vida da infraestrutura que inclua todos os custos referidos pode permitir contabilizar devidamente os reais impactos da mesma e assim vir a obter infraestruturas sustentáveis.

Do ponto de vista da ecologia, a sustentabilidade é um dos principais problemas na área de construção e engenharia civil. Por este motivo, aumentar a vida útil de serviço das estruturas tornou-se um objetivo importante. Um conjunto completo de técnicas de inspeção e de manutenção para estruturas de betão têm sido desenvolvidas. Em alguns casos, no entanto, é difícil para os engenheiros aceder aos locais danificados para trabalhos de reparação, devido à sua localização e/ou condições ambientais. Alguns exemplos são elementos estruturais subterrâneos, instalações de eliminação de resíduos radioativos e as paredes dos tanques de armazenamento de resíduos altamente tóxicos (Mihashi et al., 2012).

Nas últimas décadas verificou-se que a pouca durabilidade do material é, muitas vezes, a causa da deterioração prematura das infraestruturas, resultando na necessidade de reparação a grande escala e reconstrução das mesmas. As razões para a reduzida durabilidade das estruturas de betão à base de cimento Portland são várias. A maior parte das estruturas de betão foram construídas numa época em que a regulamentação vigente não tinha a durabilidade como uma preocupação central, cumprindo apenas o parâmetro resistência à compressão aos 28 dias. Outras obras localizadas em ambientes pouco agressivos, apresentam sinais de degradação devido a uma deficiente colocação e cura do betão (Pacheco-Torgal, 2012a). O conhecimento atual permite-nos saber que os betões à base de cimento Portland apresentam uma permeabilidade relativamente elevada, que vai permitir a entrada de água, gases e de outros elementos agressivos levando à carbonatação e ao ataque por sulfatos resultando em problemas de corrosão das armaduras. Também que estes betões contêm uma elevada quantidade de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), o qual é facilmente suscetível de ser lixiviado por qualquer solução ácida ou até mesmo por água, contribuindo para um aumento da porosidade e da permeabilidade do betão.

Durabilidade do betão significa, acima de tudo, minimizar a possibilidade de elementos agressivos entrarem no betão, sob determinadas condições ambientais, a partir de qualquer um dos seguintes mecanismos de transporte: permeabilidade, difusão ou capilaridade (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Com uma menor energia de fratura em relação à do aço macio (cerca de $0,1\text{kJ/m}^2$ vs. 100kJ/m^2) (Yang et al., 2011), os materiais de base cimentícia são conhecidos por serem inerentemente frágeis e tendem a quebrar sob esforço. Após ocorrer a formação de microfissuras no betão, estas são difíceis de detetar e reparar por métodos convencionais antes que elas se desenvolvem e se transformem em macro fissuras.

Deste modo, a fissuração é uma das principais razões pela pouca durabilidade das estruturas de betão, levando a uma deterioração muito mais cedo do que a vida útil projetada. 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 autogénea e/ou retração por secagem. A Figura 1 sintetiza as principais causas responsáveis pela ocorrência de fissuras no betão. Além disso, a resistência à tração do betão é de cerca de 10% da resistência à compressão, de modo que o betão é reforçado com varões de aço, pelo menos, nas zonas sujeitas a tensão de tração. 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).

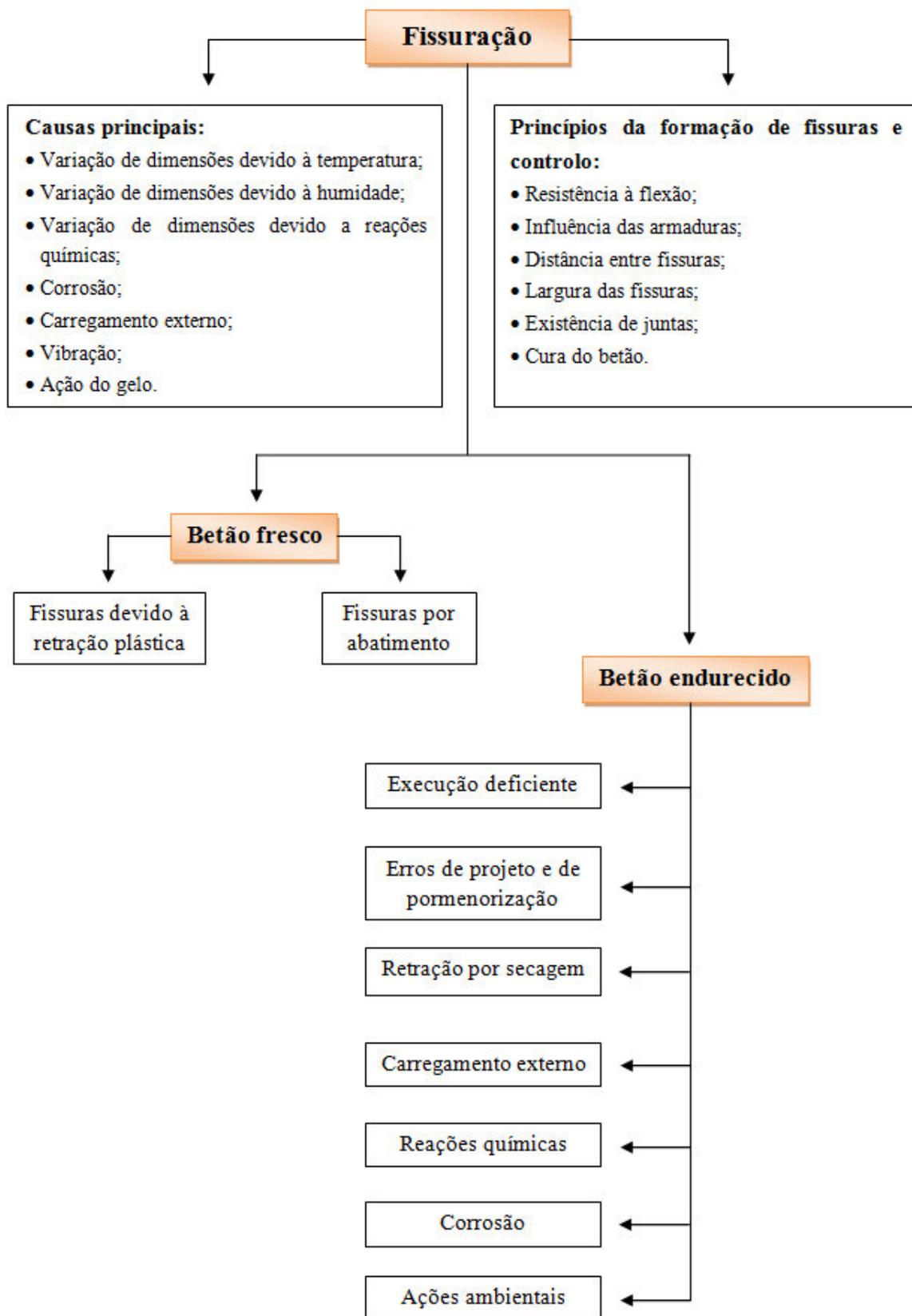


Figura 1 – Causas responsáveis pela fissuração do betão (Bai, 2009).

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. O poliuretano é obtido a partir dos químicos isocianatos e o seu fabrico envolve ainda a produção de substâncias tóxicas como fenol e clorofluorcarbonetos, entre outras (Pacheco-Torgal, 2012a).

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 ao longo da vida útil da infraestrutura reduzir os seus custos associados. Por exemplo, se o controlo e a reparação de fissuras na fase inicial em estruturas de betão fossem possível, a permeação dos fatores determinantes para a deterioração poderia ser evitada prolongando, assim, a vida útil das estruturas de serviço (Mihashi et al., 2012). Como Van der Zwaag (2007) menciona, todos os materiais de engenharia atuais eram e ainda são desenvolvidos com base no paradigma da "prevenção de danos" ao invés de um conceito de "gestão de danos".

O campo dos materiais de auto-reparação tornou-se, assim, uma nova área de pesquisa de materiais. Entre 1969 e 1981 apareceram os primeiros estudos sobre a auto-reparação em materiais poliméricos, sistemas termoplásticos e outros designados por cross-linked. Na década de 90, Dry começou a trabalhar na auto-reparação do betão e de polímeros, 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 2). Em 2005 a International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM) criou um comité com o objetivo de estudar esse fenómeno (Pacheco-Torgal, 2013).

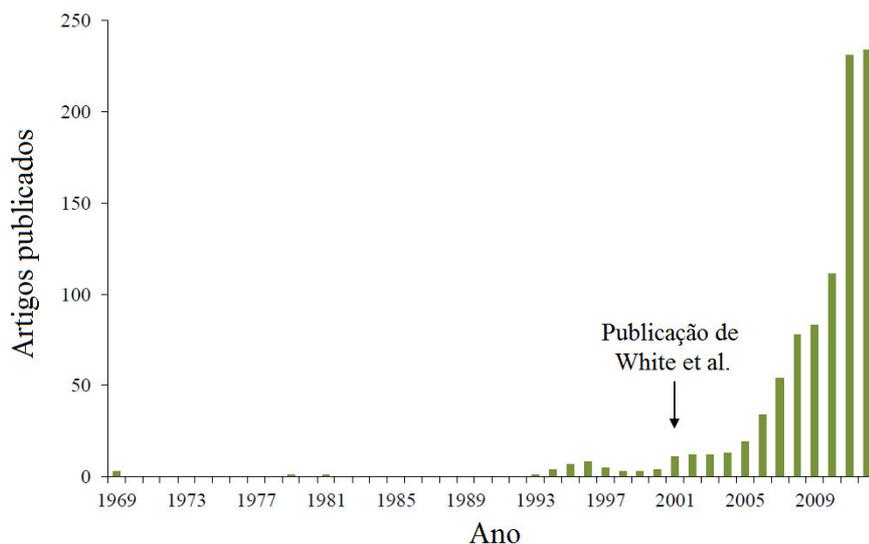


Figura 2 – Evolução da quantidade de artigos publicados sobre materiais de auto-reparação (Van Tittelboom et al., 2013).

Tecidos e peles danificadas podem ser auto-reparadas porque o anfitrião pode assimilar nutrientes para produzir novos substitutos curando as peças danificadas. Assim, de forma análoga para a auto-reparação de materiais cimentícios, a essência é fornecer produtos necessários que possam preencher as fissuras quando o dano acontece.

Segundo a RILEM (De Rooij et al., 2011), materiais auto-reparadores são materiais sintéticos, que têm a capacidade interna para reparar danos estruturais de forma autônoma ou com o apoio de um estímulo externo. A fase inicial de falha nos materiais é muitas vezes causada pela ocorrência de pequenas microfissuras em todo o elemento. Num material auto-reparador a ocorrência destas microfissuras é reconhecida de alguma forma e imediatamente, as espécies móveis, por exemplo átomos, têm de ser acionados para se deslocarem para esses locais e realizar a sua capacidade de auto-reparação (Figura 3). Estes processos são desencadeados pela ocorrência de um dano. Se o dano é aplicado sobre o material (Figura 3a e b), pode surgir uma fenda. A auto-reparação pode ocorrer desde um nível microscópico até a um nível macroscópico. O princípio comum é a imediata geração de uma "fase móvel" (Figura 3c) disparada pela ocorrência do dano (no caso ideal), ou por estímulos externos. Posteriormente, o dano pode ser removido devido ao transporte de massa dirigida para o local danificado e conseqüentemente ocorre a reação de emenda da fenda (Figura 3d). Esta reação assegura a (re)conexão da fenda por interações físicas e/ou ligações químicas. Após a reparação dos

danos, o material previamente móvel é imobilizada de novo, resultando no melhor dos casos, em propriedades mecânicas completamente restauradas (Figura 3e).

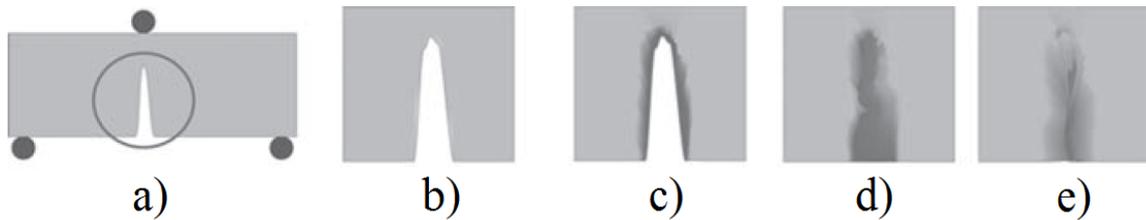


Figura 3 – Princípio básico comum dos materiais auto-reparadores. a) A carga mecânica provoca uma fenda; b) Visão detalhada da fenda; c) Uma “fase móvel” é induzida; d) Fecho da fenda pela "fase móvel"; e) Imobilização após a reparação (Hager et al., 2010).

A designação “betões com capacidade de auto-reparação” utiliza-se neste trabalho apenas para facilitar a leitura pois na realidade esta terminologia é suscetível a alguma discussão, havendo por exemplo necessidade de distinguir o refechamento das fissuras (self-closing) da restauração das propriedades originais (self-healing) conforme estabelece a classificação do RILEM apud Pacheco-Torgal (2013) a qual por sua vez é distinta da divulgada pelo Japan Concrete Institute-JCI ou da proposta por Mihashi e Nishiwaki (Mihashi et al., 2012).

Em “Autogenous Healing in Cementitious Materials” (2009) o Comitê Técnico Japan Concrete Institute (JCI) apud Mihashi et al. (2012) explica que auto-reparação abrange todas as ações de fecho e/ou reparação de fissuras. Por outro lado, em RILEM Comitê Técnico 221-SHC apud Mihashi et al. (2012), os termos de auto-reparação em materiais à base de cimento são definidos com base no resultado da ação: “refechamento das fissuras” (self-closing) ou “restauração das propriedades originais” (self-healing).

É importante também referir que existem variantes de auto-reparação, quer no modo passivo como também de modo ativo. A primeira consiste na incorporação de elementos funcionais, tal como tubos ocios, que estão embutidos na posição concebida do elemento estrutural de forma semelhante às barras de aço de reforço. Na segunda, a fissuração é monitorizada por um sensor e as fissuras são reparadas por meio de dispositivos de acionamento apenas quando estas se tornam mais largas do que uma largura crítica (Mihashi et al., 2012).

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 uma pesquisa feita em 6 de Outubro de 2013 na base de dados Scopus revela que em Portugal foram já produzidos quase uma centena de artigos em revistas internacionais sobre betão, contudo a mesma pesquisa revela 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. Na presente Dissertação procede-se por isso a uma análise das investigações sobre os materiais auto-reparadores.

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

A encapsulação de materiais evoluiu de exemplos da natureza, que vão desde a macro escala até à nano escala. O exemplo mais simples numa escala macroscópica é um ovo de ave ou uma semente, enquanto a uma escala microscópica o melhor exemplo é o de uma célula juntamente com o seu conteúdo (Wu et al., 2012).

A microencapsulação é descrita como um processo que engloba micro partículas de sólidos ou gotículas de líquidos ou gases numa concha inerte, o que por sua vez isola-as e protege-as de reações indesejáveis no ambiente externo (Ghosh, 2006). O desenvolvimento da microencapsulação começou com a preparação de cápsulas contendo corantes. Estas foram incorporadas no papel para fins de cópia e substituiu o papel de carbono (Wu et al., 2012).

No campo do betão na engenharia civil, houve alguns investigadores que adotaram um conceito similar, ou seja, a mistura de cápsulas ou fibras ocas frágeis contendo agentes químicos, denominados agentes de reparação, com o betão. Estes agentes são libertados e preenchem as fissuras originadas no betão devido à sua retração ou a ações externas. Esta aplicação do método de microencapsulação utilizando a incorporação do agente reparador foi demonstrada por 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 e outras contendo um agente reparador. Estas microcápsulas contêm um núcleo de óleo e uma concha de gel de sílica, que consiste em metacrilato de metilo como agente de reparação e trietilborano como catalisador. As microcápsulas foram dispersas em argamassa de cimento fresco juntamente com as microfibras de carbono. A reparação foi concebida para ocorrer através de um modo passivo, isto é, como uma resposta à propagação de fissuras causadas pela hidratação do cimento ou por estímulos mecânicos externos. Para a argamassa endurecida, a auto-reparação é desencadeada pela propagação de fendas através das microcápsulas. Quando a fenda rompe as microcápsulas, é libertado o agente de reparação para o interior desta. O agente reparador e o catalisador têm uma viscosidade similar à da

água (ou seja, uma viscosidade dinâmica é em torno de 1,0cP), para que eles possam facilmente migrar para as microfissuras através de ação capilar. Posteriormente, a polimerização do agente de reparação é iniciada por contato com o catalisador provocando a ligação das faces da fenda e garantindo assim o fecho das fissuras próximas. A Figura 4 apresenta um esquema da auto-reparação atrás descrita e a Figura 5 mostra uma rutura típica de uma microcápsula. 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.

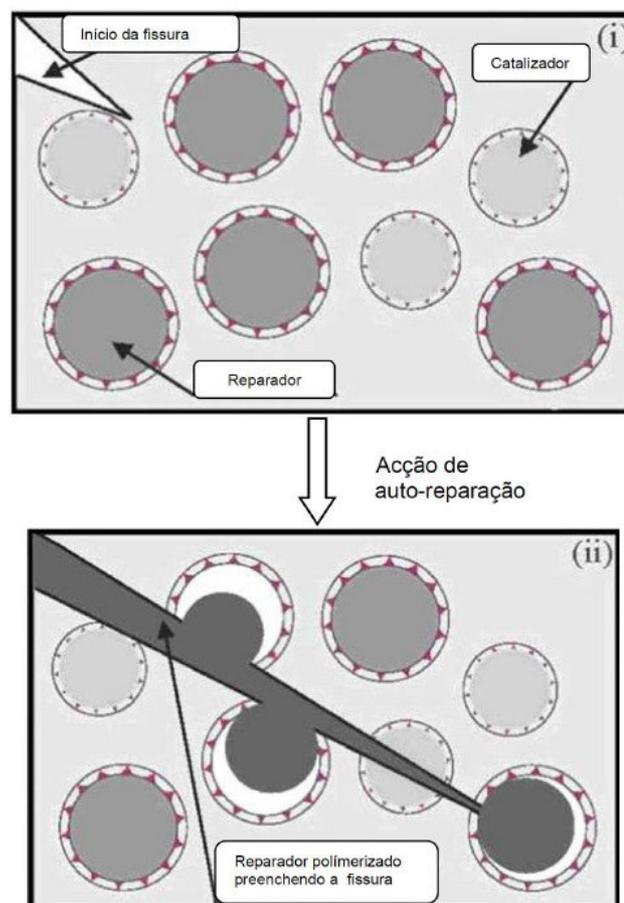


Figura 4 – Esquema de auto-reparação: i) Matriz cimentícia com cápsulas de catalisador e de material reparador onde é evidente o início de uma fissura no canto superior esquerdo; ii) a fenda rompe as microcápsulas libertando o agente de reparação para o interior desta por ação capilar e quando em contato com o catalisador, provoca a polimerização garantindo assim o fecho das fissuras próximas (Yang et al., 2011).

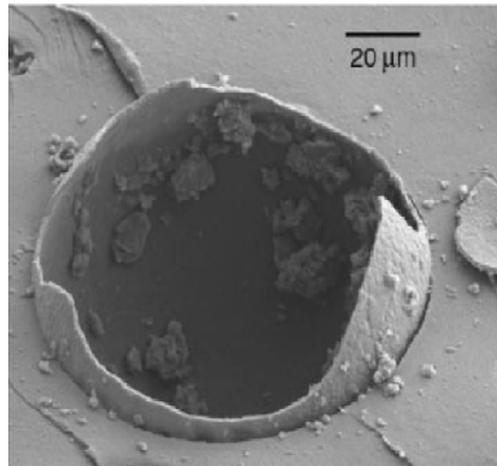


Figura 5 – Microcápsula numa rutura típica (Wu et al., 2012).

Nishiwaki (1997) apud Wu et al. (2012) estudou a aplicação de microcápsulas contendo resina epóxi como agente de reparação (cápsula de ureia-formaldeído formalina com diâmetro de 20-70 μm) e de microcápsulas com resina acrílica como um endurecedor (cápsula de gelatina com diâmetro de 125-297 μm). Tanto os testes de compressão e flexão foram realizados para confirmar os problemas deste método de auto-reparação. Os resultados mostraram: (1) a dificuldade de endurecer o agente de reparação de dois componentes; (2) a quantidade de agente de reparação introduzido nas microcápsulas foi muito pequena; (3) a aderência entre as microcápsulas e a matriz cimentícia tem de ser superior à resistência das microcápsulas. A fim de resolver estes problemas: (1) pode ser utilizado apenas um componente de agente de reparação; (2) o diâmetro da microcápsula deve ser suficientemente grande; (3) a aderência entre as microcápsulas e a matriz cimentícia deve ser melhorada.

Também é relatado que Rattner (2011) apud Wu et al. (2012) utilizou microcápsulas contendo silicato de sódio. Nesta pesquisa, o betão foi primeiramente carregado até ao ponto de quase rutura. Após uma semana sem carregamento, as medições mostraram que a amostra com 2% de silicato de sódio microencapsulados levou à 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.

Boh e Šumiga (2008) concluíram que a incorporação de microcápsulas com aditivos no interior da matriz de materiais de base cimentícia facilita a sua hidratação, reduzindo o aparecimento de fissuras.

Na utilização das microcápsulas, o tratamento é fácil e pode responder à fratura em muitos locais diferentes, devido à dispersão destas dentro de uma matriz. No entanto, uma produção bem-sucedida de microcápsulas desejáveis para aplicação em materiais de base cimentícia, muitas vezes não é tão simples. Além disso, a quantidade de agente de reparação que pode ser utilizado é reduzido e a aderência entre as microcápsulas e a matriz é geralmente um motivo de preocupação. Se a resistência da parede da cápsula é mais elevada do que a aderência à matriz, as microcápsulas não irão romper após o início das fendas, então nenhum agente de reparação será libertado e a reparação das fissuras não acontecerá (Wu et al., 2012).

No que diz respeito à aplicação de fibras ocas (por vezes referido como pipetas ocas ou tubos, dependendo do diâmetro), esta tem o mesmo conceito que a aplicação de microcápsulas, pois consiste em armazenar no interior das fibras, alguns componentes funcionais, ou seja agentes de reparação, que serão incorporados numa matriz compósita. A Figura 6 mostra o aspeto das fibras ocas de vidro.

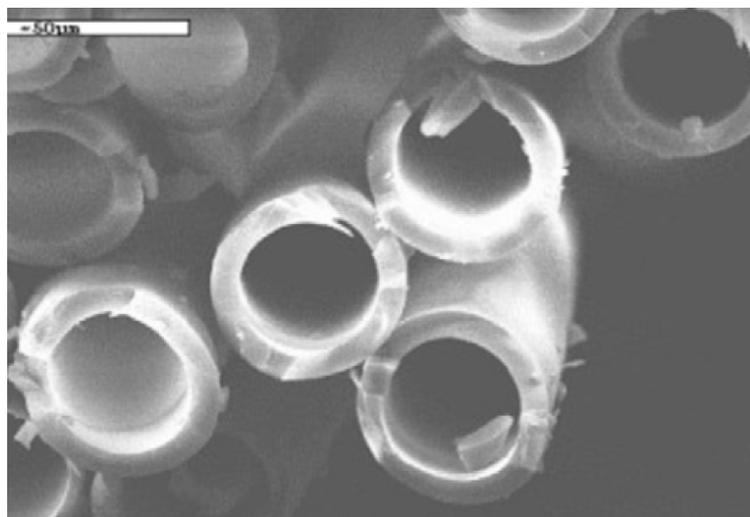


Figura 6 – Fibras ocas de vidro (Wu et al., 2012).

Um dos primeiros estudos com aplicação em materiais de base cimentícia foi realizado por Dry (1994) apud Mihashi et al. (2012), onde um agente adesivo contido nas fibras ocas frágeis

de vidro funcionou como agente reparador. Uma fenda num material de base cimentícia frágil causada pela sobrecarga foi capaz de quebrar as fibras. A fissuração resultante da tração da matriz e a rutura das fibras de vidro estimulou os mecanismos de ativação para reparar a fenda, ou seja, libertou o agente adesivo e este preencheu a fissura neste sistema de material inteligente totalmente passivo.

Após alguns estudos, o mesmo autor investigou a aplicação desta ideia em estruturas de betão. A Figura 7 mostra a aplicação desta ideia num pórtico rígido com uma base de betão monolítico. A tubulação quimicamente inerte foi lançada dentro da seção transversal do elemento e, em seguida, preenchido com agentes adesivos. Como podem ser utilizados agentes adesivos com características diferentes, foram efetuadas uma série de investigações experimentais para avaliar a capacidade de três diferentes agentes adesivos, isto é, cianoacrilato, resina epóxi em duas partes e um agente adesivo com base de silicone. A fim de avaliar a eficiência de cada agente na auto-reparação, foram monitorizadas as variações da rigidez e da frequência de fissuração durante o carregamento. Ambos os parâmetros mostraram que o agente adesivo de cianoacrilato foi o mais eficaz para a recuperação de rigidez e prevenção na reabertura da fenda (Dry, 1998 e Dry, 2001 apud Mihashi et al., 2012).

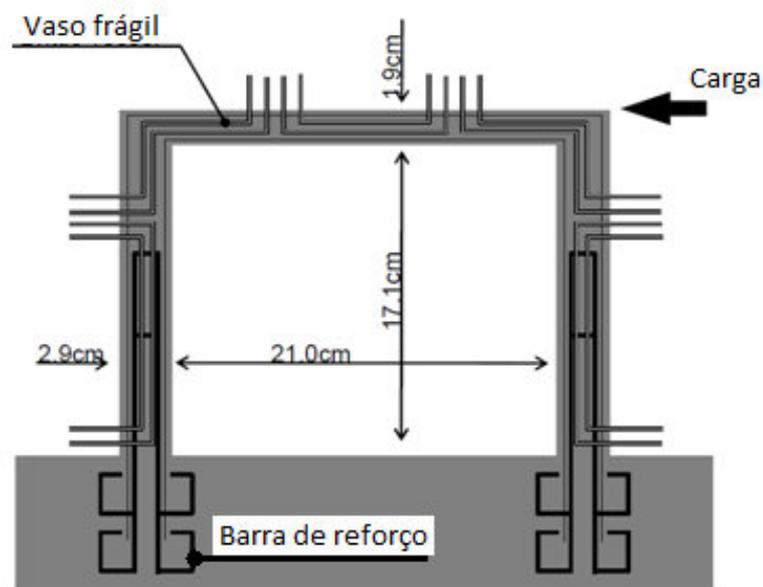


Figura 7 – Amostra do pórtico de teste (Mihashi et al.,2012).

A fim de observar de forma rápida e facilmente os danos internos em materiais compósitos, um método de realce visual dos danos foi projetado por Pang e Bond (Pang et al., 2005a e

Pang et al., 2005b). Este método consiste na mistura das fibras contendo os agentes de reparação com corante fluorescente para monitorizar o processo de cicatrização (Figura 8).

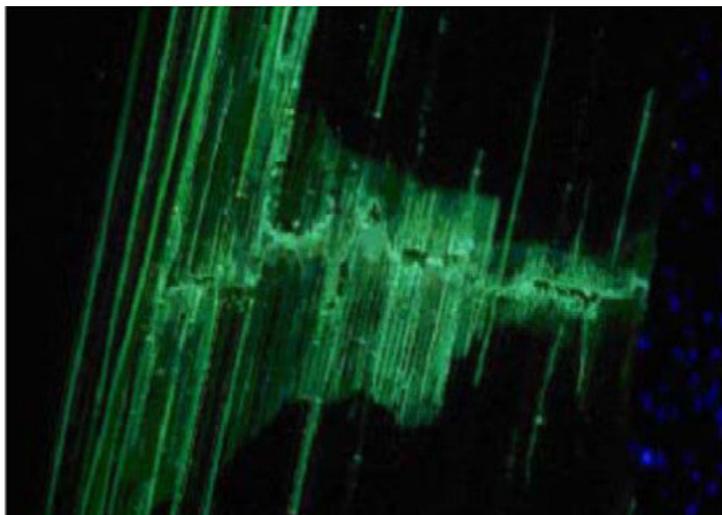


Figura 8 – Realce visual dos danos num composto laminado pela ação de “sangramento” de um corante fluorescente em fibras ocas de vidro (Pang et al., 2005).

A microfissuração dos tabuleiros das pontes é uma preocupação fundamental no projeto destas estruturas. 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. Dry (2000) desenvolveu uma aplicação de uma reparação passiva das fissuras superficiais do betão causadas pela retração de secagem dentro dos primeiros 28 dias. Esta aplicação *in situ* consiste na libertação de selantes para as superfícies externas do betão a partir de fibras ocas de vidro, preenchendo as fissuras de retração. Os tubos são quebrados devido à retração por secagem do betão. A Figura 9 apresenta uma fotografia de uma série destes tubos embutidos na superfície superior de uma plataforma de uma ponte em grande escala. Este método pode ser aplicado para tabuleiros de pontes especificamente para controlar a localização das fissuras de retração transversais, criando juntas de controlo sobre a superfície a partir de uma linha transversal de tubos cheios de agente reparador. Quatro tabuleiros de pontes em grande escala foram fabricados com tubos cheios de selante embutidos em vários locais, como é visível na Figura 10. Os resultados nos dois primeiros pavimentos, nos quais os tubos de reparação encontravam-se apenas sob a parte superior do tabuleiro, mostraram que após um mês de monitoramento a maioria destes quebraram devido

à retração e foram criadas juntas de reparação tal como inicialmente previsto. Os tubos de reparação que foram colocados na superfície do pavimento, mas não totalmente cobertos, quebraram maioritariamente depois de 2 meses, enquanto os tubos colocados totalmente descobertos não quebraram. Embora estes últimos tenham sido os mais expostos ao ambiente e a ciclos de gelo-degelo do que os tubos incorporados integralmente, as ações ambientais não causaram a rutura dos tubos totalmente expostos. Concluiu-se assim que a rutura dos tubos foi devido à tensão de retração por secagem do betão e não aos ciclos de gelo-degelo ou danos do tempo. Na Figura 11 é apresentada uma fotografia com o resultado após a rutura dos tubos: uma junta de reparação, ou seja, uma linha transversal de fissuras reparadas (área mais escura), criada pelo selante dos tubos totalmente incorporados no betão.



Figura 9 – Uma foto dos tubos encaixados na superfície superior da plataforma (Dry, 2000).

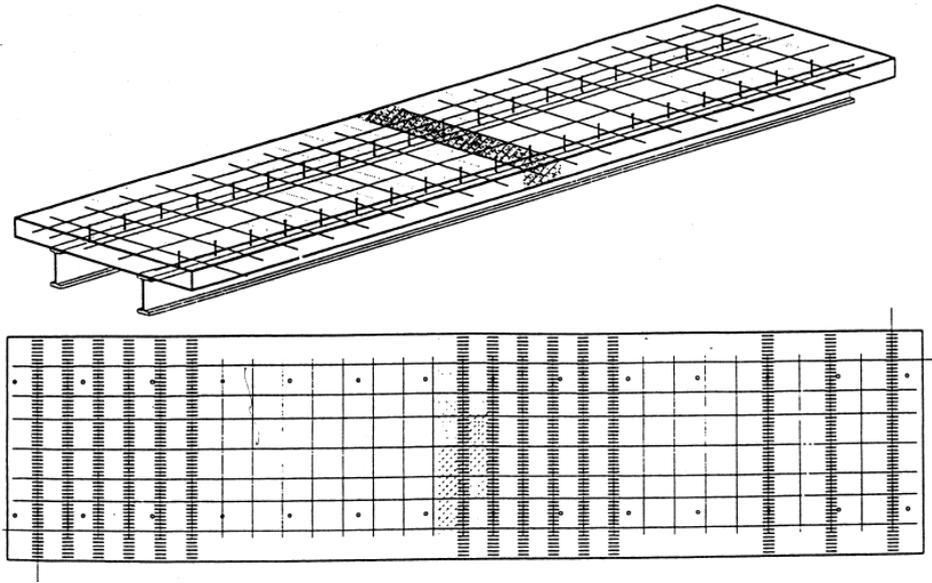


Figura 10 – Um desenho da superfície superior das plataformas de 6x1,20 m na qual os tubos de reparação foram incorporados (Dry, 2000).

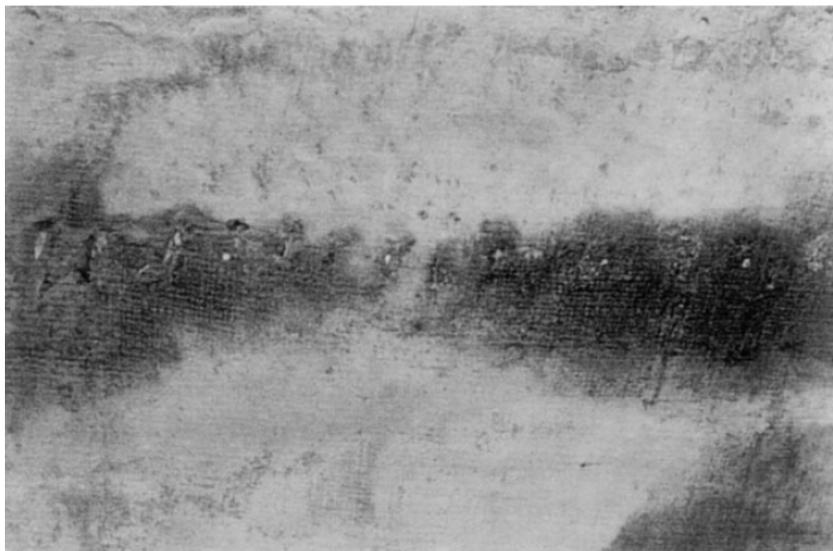


Figura 11 – Uma foto da junta de reparação criada pela libertação de selante dos tubos totalmente embutidos no betão (Dry, 2000).

Outra pesquisa também conduzida por Dry (2000), centrou-se na reparação de fissuras por esforço transversal após 28 dias. Os mesmos quatro pavimentos mencionados anteriormente foram testados três vezes em flexão para estudar a eficácia da reparação em estudo. Aqui os tubos continham adesivos mais fortes e foram colocados abaixo da superfície em áreas de tração devido à carga de flexão induzida (aplicação de uma força de elevação). O Pavimento 1

continha agente selante e adesivo do tipo VOC incorporado na sua superfície e tubos com cianoacrilato, como agente reparador, através da sua secção. O Pavimento 2 foi o pavimento de controlo e não continha agente de reparação. O Pavimento 3 tinha várias centenas de tubos cheias de agente selante e adesivo do tipo Tripp incorporados aleatoriamente através de uma secção de 60 centímetros de largura a meio vão de comprimento. Continha, ainda, uma linha transversal de tubos alinhados longitudinalmente com VOC mesmo abaixo da superfície superior da plataforma, nas zonas de tração. O Pavimento 4 tinha Tripp na sua superfície e nada através da sua secção. Na Figura 12 é apresentada uma fotografia da libertação do adesivo no segundo carregamento à flexão no Pavimento 3. Com este estudo concluiu-se:

- (a) Os Pavimentos 1 e 4 detiveram melhores resultados na reparação das fendas. Em ambos os casos, as fendas originais do primeiro carregamento foram reparadas e as fendas secundárias abriram, pelo menos em porções, durante o segundo carregamento antes das fendas primárias reabrirem.
- (b) Comparando com o segundo e terceiro carregamento do pavimento de controlo, o Pavimento 2, que não continha adesivos de reparação, os Pavimentos 1, 3 e 4, todos mostraram sinais de ganho de resistência à flexão nos seus testes posteriores.
- (c) No segundo e terceiro carregamento, a libertação dos adesivos de reparação ocorreu em todos os pavimentos contendo agentes de reparação. Carregamentos posteriores revelaram a libertação de adesivo adicional ao longo de toda a fissura reaberta. Estes adesivos sobreviveram durante mais de 1 ano em condições ambientais com variações de temperatura entre valores inferiores a zero e mais de 38°C.

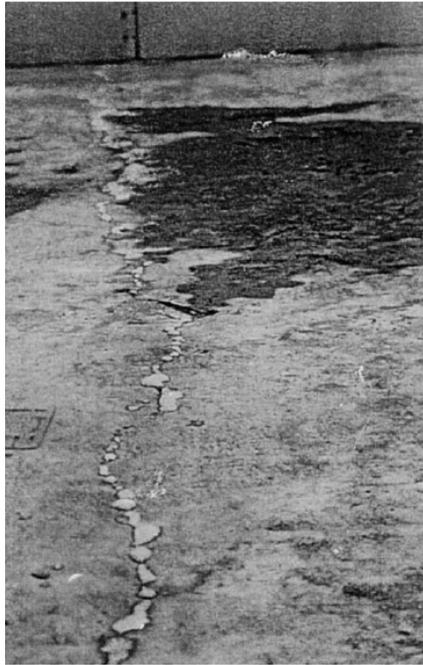


Figura 12 – Libertação do adesivo para a fenda no segundo carregamento à flexão no Pavimento 3 (Dry, 2000).

Dry (2000) abordou um modo ativo com o intuito de reduzir a permeabilidade no interior do betão. Utilizou como agente reparador o metacrilato de metilo líquido dentro de fibras ocas porosas de polipropileno, no interior do betão. Este método é acionado em resposta à intervenção humana, é por isso, uma reparação de modo ativa e foi feita depois de o cimento ter 28 dias de cura, mas poderia ser feito antes. Antes de proceder aos ensaios, foi utilizada uma avaliação visual para avaliar a libertação do metacrilato de metilo a partir das fibras para o cimento branco após aquecimento. Como é demonstrado na Figura 13, a libertação do agente reparador foi um sucesso tingindo o cimento. A investigação apresentou uma redução da permeabilidade, após o metacrilato de metilo polimerizar nos poros e fissuras do betão. Ainda, os testes foram realizados com diversos volumes de fibras para determinar se ocorre deterioração da resistência. Os resultados não mostraram qualquer perda da resistência, independentemente da quantidade de fibras utilizadas.

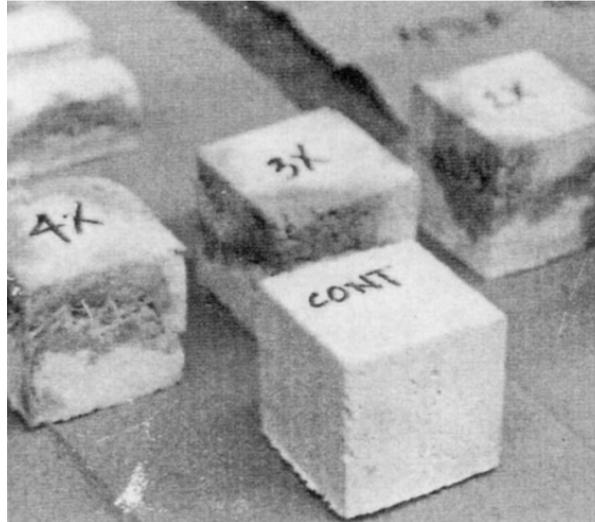


Figura 13 – Foto de amostras nas quais a libertação de produto químico vermelho tingido (áreas escuras) da fibra para dentro da matriz de cimento branco pode ser vista (Dry, 2000).

Um outro estudo efetuado por Dry (2000) pretendeu estudar a libertação de adesivo para junção de fendas a partir de pipetas de vidro ocas imersas no betão após o ensaio de flexão. A amostra carregada de adesivo demonstrou uma capacidade para transportar cerca de 20% mais carga num teste posterior de flexão, ou seja, a utilização destes agentes reparadores levaram ao aumento da resistência do betão.

Nishiwaki et al. (2006) desenvolveram uma abordagem denominada "sistema de auto-reparação ativa". Este sistema inicia automaticamente em resposta a sinais elétricos provocados por fissuras no betão. O sistema consiste num compósito condutor de autodiagnóstico que pode detetar o aparecimento de fissuras em tubos feitos com película termoplástica que contém uma resina epóxi de baixa viscosidade como agente de reparação. O compósito referido atua como um tipo de sensor de monitorização da fenda e, ao mesmo tempo, tem a função de um dispositivo de aquecimento para um local específico através de eletrificação. Este é fabricado com compósitos reforçados com fibra e partículas condutoras (Figura 14). Na ausência de qualquer dano, o sensor pode monitorizar a tensão devido ao percurso de condução elétrica com partículas condutoras dispersas (tais como RuO_2 e partículas negras de carbono). Quando o sensor deteta uma grande tensão localizada, devido à formação de uma fenda, este pode delicadamente aumentar a resistência, mesmo no caso de uma deformação muito pequena. Por meio de eletrificação neste sensor, um aumento parcial na resistência elétrica pode conseguir um aquecimento seletivo em torno da fenda. Com este

aquecimento seletivo, o tubo de plástico na zona da fenda é derretido libertando a resina epóxi para a reparação desta (Figura 15). A eficácia da função de aquecimento foi comprovada por meio de observação direta com uma técnica de termografia de radiação infravermelha, como se mostra na Figura 16.

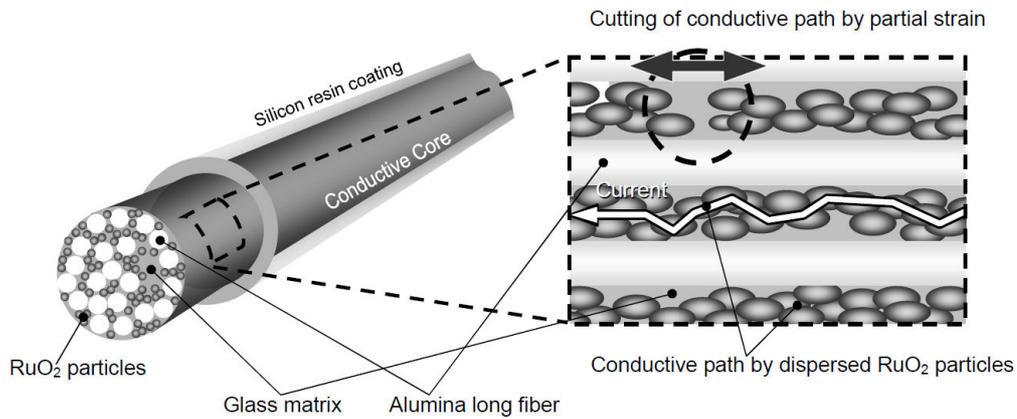


Figura 14 – Diagrama esquemático da estrutura compósita de autodiagnóstico (Mihashi et al, 2012).

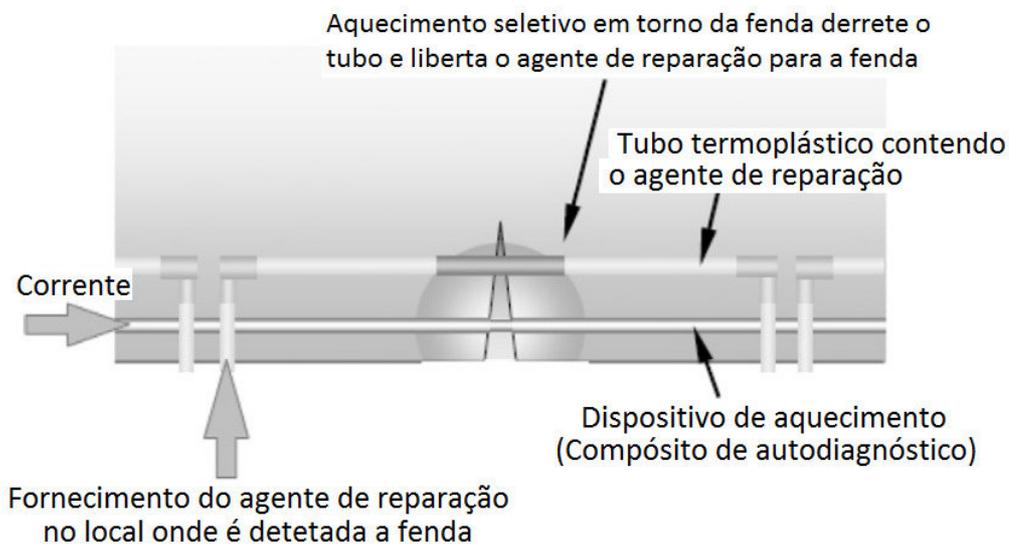


Figura 15 – Sistema de auto-reparação para o betão com aquecimento seletivo em torno das fendas (Nishiwaki et al., 2006).

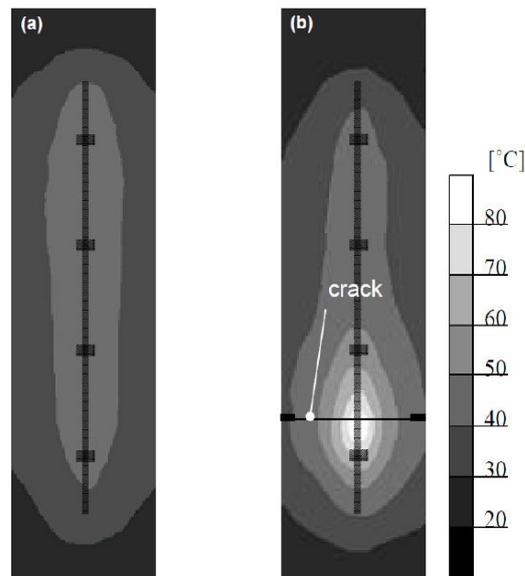


Figura 16 – Distribuição da temperatura medida pela termografia. a) Antes da fissuração; b) Depois da fissuração (Mihashi et al, 2012).

Alguns autores como Mishashi et al. (2000) apud Wu et al., 2012 e Joseph et al. (2007) efetuaram um trabalho semelhante ao descrito por Dry no que diz respeito à reparação de modo ativo. Na Figura 17 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. No ensaio efetuado por Mihashi, as pipetas de vidro com diâmetro externo de 2mm e um diâmetro interior de 0,8mm foram colocadas dentro de amostras de betão. Como agentes de reparação foram usados uma solução diluída (27%) e não-diluída álcali-sílica e resina epóxi de dois componentes de baixa viscosidade. O teste consistiu em aplicar um carregamento nas amostras até ocorrerem fendas de 0,03 a 2mm, seguido da remoção daquele. Depois, foram introduzidos os agentes de reparação nas amostras para análise do desenvolvimento da capacidade de auto-reparação. Em comparação com a amostra de referência em que não foi usado nenhum agente de reparação, as amostras com solução álcali-sílica diluída e não diluída resultaram numa taxa de recuperação da resistência entre 1.1 e 1.5 ou mais, respetivamente. Enquanto para as amostras com resina epóxi, a taxa de recuperação da resistência mostrou pouca melhoria. O autor atribuiu este último resultado à insuficiente mistura e agitação dos dois componentes da resina epóxi. Também é razoável pensar que alguma resina tenha permanecido nas tubulações visto que uma extremidade é selada. Nos testes realizados por Joseph, o cianoacrilato de etilo foi usado como agente de reparação e foi transportado em tubos curvos de plástico com diâmetro

exterior de 4mm e diâmetro interior de 3mm. Concluiu-se que um agente de reparação com base de cianoacrilato de etilo fornecido por meio de um sistema de alimentação externa era capaz de alcançar uma auto-reparação bem-sucedida. As observações feitas durante e depois do teste indicaram claramente que, o agente reparador foi capaz de penetrar uma área significativa das superfícies das fissuras sob a influência das forças de sucção de capilaridade e gravidade.

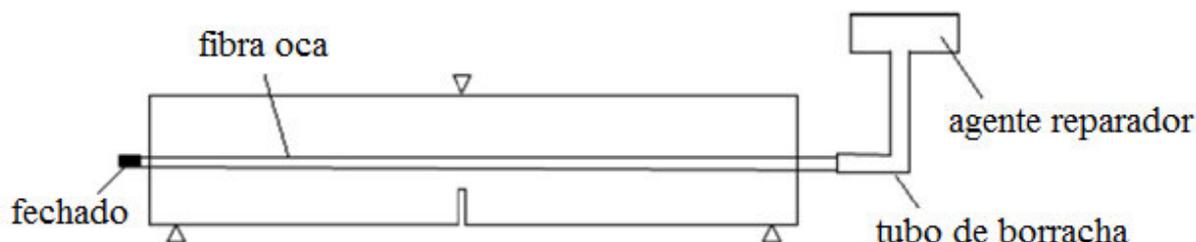


Figura 17 – Diagrama esquemático do sistema de abastecimento externo contendo o agente de reparação, baseado na descrição de Mishashi e Joseph (Wu et al., 2012).

Thao juntamente com outros investigadores (Thao et al., 2009) estudaram a seleção do agente de reparação, do portador deste e a implementação deste método de encapsulamento em betão. No seu estudo, uma parte de uma resina epóxi de baixa viscosidade foi escolhida como o agente de reparação. Primeiramente, para a escolha dos tubos de transporte foi realizado um estudo de comparação entre tubos ocios de polimetil-metacrilato (plástico resistente) e tubos de vidro. Concluiu-se que os tubos de vidro foram mais adequados, devido à inércia química da resina epóxi e à fragilidade destes por serem mais fáceis de quebrar quando surgem as fissuras, garantindo o vazamento do agente reparador. O estudo de dimensão dos tubos de vidro indicou que o diâmetro interno e externo ótimos eram de 4mm e 6mm, respetivamente. Foi então realizado o ensaio para provar que esta ideia poderia funcionar. A Figura 18 ilustra a instalação da amostra. As amostras de controlo foram carregadas até à rutura. A amostra com tubos de vidro foi testada para além do ponto onde é audível um sinal sonoro que indicava a fratura do tubo de vidro. A carga foi realizada até se observar a fuga da resina epóxi na superfície inferior da amostra. A amostra foi então descarregada e deixada neste estado durante 4 dias antes de ser carregada mais uma vez utilizando a mesma taxa de deslocamento. O ensaio foi terminado logo após a observação de mais fugas do agente de reparação. A carga foi então removida e deixou-se a amostra no processo de reparação durante 3 dias antes de ser carregada mais uma vez e testada até à rutura no terceiro ensaio de

carga. Os resultados mostraram que estes tubos de vidro foram capazes de romper quando interceptados por fendas no betão facilitando a libertação atempada da resina epóxi para a reparação. A investigação experimental conseguiu comprovar a fluidez desta resina em fissuras através da ação da gravidade e capilaridade e a consequente reparação das fendas no betão. A amostra recuperou parte da sua resistência após 4 dias em processo de reparação. Para minimizar a rutura dos tubos de vidro durante a mistura com o betão, é recomendado que estes sejam protegidos por uma camada polivalente de 6,5mm de argamassa curada durante um dia.

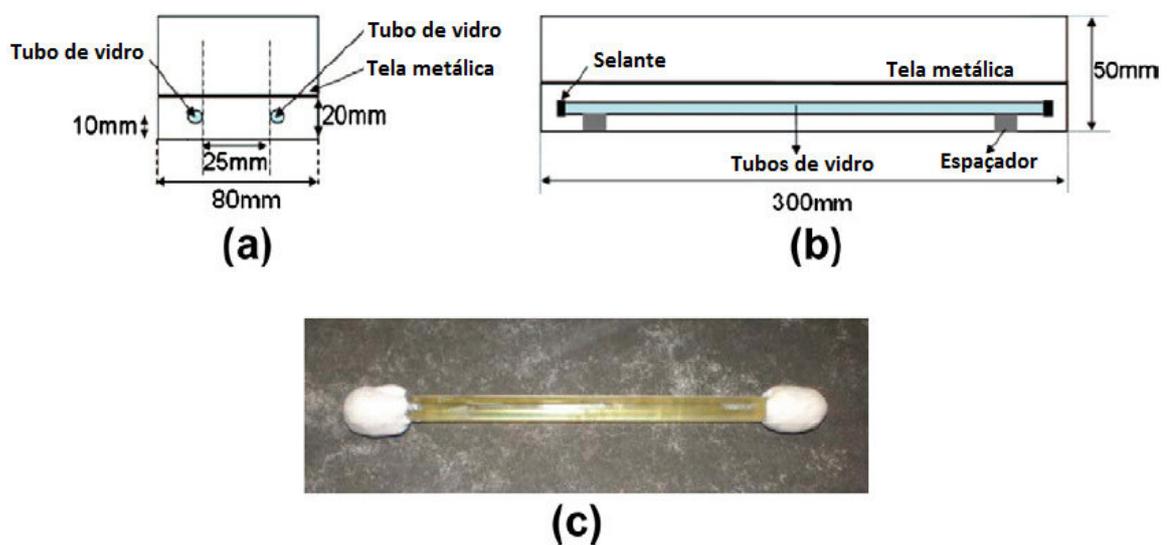


Figura 18 – Sistema de auto-reparação do método de encapsulamento interno com tubos de vidro ocios. (a) Vista a meia seção; (b) Vista lateral; (c) Tubo de vidro abastecido com resina epóxi e com aquastick como selante (Wu et al., 2012).

Joseph et al. (2010) realizaram uma experiência idêntica à de Thao et al (2009). Utilizaram um tipo de cianoacrilato, com baixíssima viscosidade de apenas 5cPa.s, como agente de reparação. Além disso o interior dos tubos continha tinta para uma observação mais fácil da libertação da cola. Concluiu-se que, apesar de alguma evidência de uma pequena quantidade de reparação nas vigas ensaiadas contendo uma dupla camada de tubos, a cola não chegou às fendas em quantidade suficiente para se conseguir a reparação. É possível que as forças de pressão negativa criadas pelo selante em ambas as extremidades dos tubos de vidro tenham sido responsáveis pela libertação insuficiente de cola e tinta na fenda.

Van Tittelboom et al. (2011) estudaram a utilização de fibras ocas em materiais de base cimentícia contendo, como agentes de reparação, poliuretano e um acelerador (agente químico bicomponente com uma elevada capacidade expansiva). Estes autores observaram que a capacidade expansiva do agente de reparação proporciona uma vantagem dupla. Em primeiro lugar, a reação de expansão atua como uma força motriz, empurrando o agente de reparação para fora das cápsulas tubulares até à zona da formação da fenda. Uma segunda vantagem desta reação de expansão é que o volume adicional criado pela fenda pode ser preenchido com este agente de reparação, sem deixar para trás muitas lacunas. Ambos os componentes deste agente reparador têm baixa viscosidade e a reação de polimerização não depende da proporção da mistura dos dois compostos. Para além da utilização de tubos de vidro foi também avaliada a eficiência do encapsulamento com um material cerâmico, visto também ser um material frágil. Além disso, a influência do diâmetro do tubo sobre a libertação do agente de reparação foi também investigada. Metade dos tubos foi preenchida com o poliuretano e a outra metade com uma mistura de água e acelerador. Antes de os incorporar no interior das amostras de argamassa, estes foram selados com polimetilmetacrilato em ambas as extremidades. Dentro das amostras, os dois tubos, cada um contendo um dos dois componentes do agente de reparação, foram posicionados adjacentes um ao outro. Quando a fenda ocorre em um determinado lugar, estes tubos quebram e ambos os componentes podem facilmente entrar em contacto e, posteriormente reparar a fenda. A Tomografia de Raios-X Computadorizada de Alta Resolução (HRXCT) foi usada como um método de ensaio não destrutivo para avaliar a eficiência de reparação da fenda. Além do uso de HRXCT, esta eficiência foi também avaliada por meio de ensaios mecânicos, testes de permeabilidade à água e à avaliação das secções transversais. Nestas experiências, os tubos foram posicionados no local exato de formação de fendas, enquanto na realidade, as localizações da formação de fissuras não são conhecidas. Os autores distribuíram aleatoriamente pares de tubos em todas as regiões suscetíveis a fissuração, logo os tubos devem ser misturados e sobreviver ao processo de mistura. Os resultados da investigação permitem concluir que:

- (a) O poliuretano é um agente de reparação bastante adequado para o processo de auto-reparação em materiais de base cimentícia. O fator-chave desse agente reparador é a sua capacidade para se expandir, permitindo a reparação de fendas maiores.
- (b) Verificou-se uma redução da permeabilidade à água, tanto com a utilização dos tubos de vidro como com os tubos de cerâmica. Em comparação com as amostras de referência (sem incorporação de agente reparador) verificou-se uma redução do

- coeficiente de permeabilidade com um fator de 10^2 a 10^3 quando foram incorporados tubos de vidro e com um fator de 10^3 a 10^4 quando utilizados os tubos de cerâmica.
- (c) Através da HRXCT notou-se que os tubos cerâmicos pareciam libertar mais agentes de reparação em comparação com os tubos de vidro, tal como pode ser visto pela Figura 19, onde as partes escuras no interior dos tubos correspondem a bolhas de ar que surgiram aquando da libertação do agente reparador para a fenda após a rutura do tubo. Isto pode ser causado pela diferença de tensão superficial entre o vidro e a cerâmica.
- (d) Na maioria das experiências, os tubos de vidro e de cerâmica mostraram um desempenho semelhante, no entanto a partir dos ensaios de permeabilidade à água e da HRXCT observou-se que os melhores resultados foram obtidos quando foram utilizados os tubos de cerâmica.
- (e) Não houve diferenças significativas entre a eficácia dos tubos de vidro com um diâmetro interno de 2mm e 3mm. Normalmente, a eficiência de esvaziamento dos tubos depende das forças de capilaridade no interior dos tubos, que são reduzidas quando o diâmetro do tubo aumenta. No entanto, uma alteração do diâmetro dos tubos de vidro de 2mm para 3mm não causou diferenças significativas no resultado.
- (f) No que diz respeito às propriedades mecânicas, verificou-se uma pequena melhoria da resistência na utilização dos tubos de cerâmica.

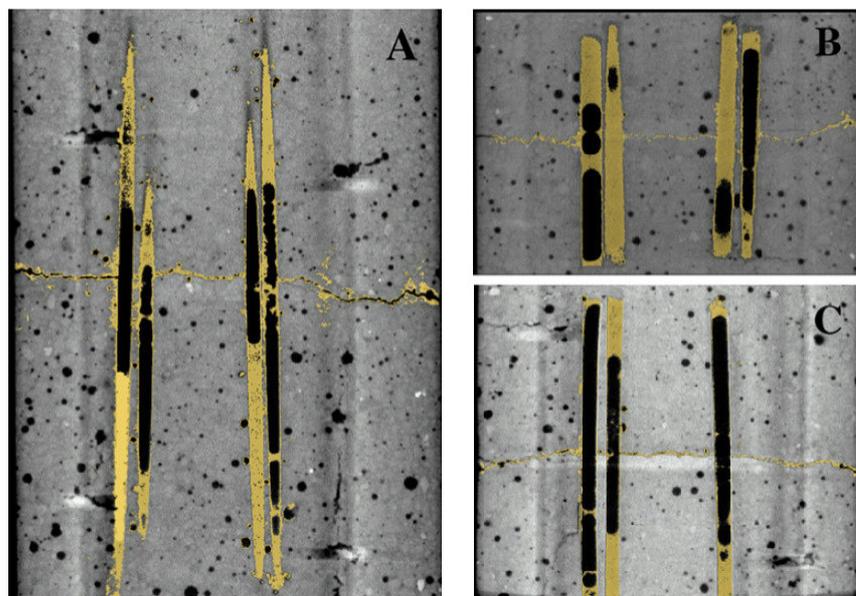


Figura 19 – Direção Y da seção transversal das amostras. (A) amostra com os tubos de vidro de 2mm de diâmetro, (B) amostra dos tubos de vidro com 3mm de diâmetro e (C) amostras com tubos cerâmicos (Van Tittelboom et al., 2011).

Também Joseph et al. (2007) descobriram que, após a formação de fendas apenas uma pequena quantidade do agente de reparação é derramado para o interior da fenda e que a maior parte dele permanece no interior dos tubos, devido às forças de capilaridade. Para contornar esta situação, Joseph et al. decidiram que tubos com extremidades abertas poderiam constituir uma alternativa mais efetiva, pois isso eliminaria os efeitos de sucção das extremidades fechadas. Também Mishashi e Joseph, como já foi mencionado antes, fizeram uso desta técnica na qual os tubos de vidro ocos foram incorporados no interior das amostras e foram conectados com um reservatório na parte externa. Uma outra vantagem desta técnica é que uma quantidade adicional de agente de reparação pode ser fornecida, quando necessário, de modo que as maiores fendas ou uma maior quantidade destas possam ser reparadas. No entanto, como o agente de reparação tem de ser fornecido para dentro do reservatório, esta técnica não pode ser totalmente considerada como auto-reparação. É preciso ainda proferir, que o uso de demasiadas fibras ocas nesta prática provoca um efeito negativo sobre as propriedades mecânicas da matriz cimentícia (Wu et al., 2012).

Após alguns ensaios com tubos de 0,8mm, 1,5mm e 3mm de diâmetro interno, Joseph et al. (2007) optaram pelos tubos de 3 mm de diâmetro porque os tubos mais pequenos revelaram-se mais frágeis e difíceis de incorporar na mistura, sem quebrá-los. Além disso, as forças capilares mais elevadas no agente reparador dos tubos de menor diâmetro significavam que uma maior percentagem de agente permanecia nos tubos depois da quebra.

Uma outra desvantagem ligada à utilização de cápsulas ou fibras ocas tem a ver com o facto das mesmas aumentarem a porosidade dos betões e contribuírem dessa forma para uma redução da resistência mecânica dos betões (Pacheco-Torgal, 2013). Também o facto de ser necessário que as cápsulas ou fibras ocas sejam bastante frágeis para quebrarem aquando dos esforços que originam as fissuras (que supostamente irão reparar) levanta problemas em termos da elevada probabilidade das mesmas poderem quebrar logo na fase da betonagem das estruturas.

Relativamente a este último aspeto, Joseph et al. (2007) experimentaram duas técnicas de incorporação dos tubos capilares durante a moldagem de vigas. O primeiro foi a utilização de uma armação de arame para segurar os tubos em posição enquanto a argamassa foi aplicada e o segundo passou pela moldagem das vigas em camadas, com os tubos a serem colocados na

parte superior das camadas intermédias. Esta última técnica provou ser mais fácil de realizar e evitou a quebra dos tubos que eram comum acontecer na aplicação do primeiro método. Estes autores observaram, ainda, que os processos mais eficazes para o enchimento e vedação dos tubos é a utilização de uma seringa e selar os tubos com cera.

Um dos principais requisitos de um agente de reparação adequado é o de ter uma viscosidade suficientemente baixa para permitir a migração deste para as fendas de vários tamanhos e resistência suficiente para resistir à reabertura da fenda.

Como é visível nos diferentes estudos efetuados por diversos autores, vários tipos de agentes de reparação foram já testados na pesquisa sobre a auto-reparação do betão. Agentes reparadores de um único componente, como cianoacrilatos, resina epóxi, silicones ou soluções álcali-sílica, são escolhidos com preferência quando comparados com agentes de reparação de múltiplos componentes, pois a mistura incompleta dos diferentes componentes é um aspeto que suscita preocupação. No entanto, Dry et al. (1996) apud Van Tittelboom et al. (2011) afirmam que o curto prazo de validade de agentes de reparação de um único componente pode ser desvantajoso. Referiram que os agentes de reparação de componentes múltiplos possuem uma maior estabilidade do que os agentes reparadores de componente único, porque eles são ativados mais tarde, isto é, *in situ*.

Atualmente, as resinas epoxídicas de baixa viscosidade formam o principal agente de reparação utilizado na reparação ativa de pisos de betão críticos e tabuleiros de pontes. As resinas epoxídicas, no entanto, são compostas por dois componentes ou do tipo monocomponente ativadas pelo calor, o que as torna impróprias para encapsulamento dentro do betão. Experimentações preliminares demonstraram que a mistura do composto epóxi endurece, mesmo na ausência de oxigénio, e que o encapsulamento de ambos os compostos separadamente nas vigas resulta numa mistura fraca e, portanto, ocorre uma perda da resistência durante a reparação (Joseph et al., 2007).

A solução álcali-sílica, na presença de oxigénio provoca a hidratação que leva à ligação das faces das fissuras originais. A resistência da ligação é menor do que a da cola, mas as soluções de álcali-sílica oferecem uma boa compatibilidade com materiais de base cimentícia. No entanto, a longevidade de soluções encapsuladas e o tempo de reparação após a libertação dos agentes reparadores requerem uma investigação mais aprofundada (Joseph et al., 2007).

Cianoacrilatos (supercolas) reagem à presença de humidade e são conhecidos pela sua capacidade de reparação rápida (em segundos) e proporcionam uma melhoria da resistência do substrato, certamente, no caso do betão. Eles também têm viscosidades muito baixas, <10cP e, portanto, possuem a capacidade de reparar as fissuras com larguras inferiores a 100µm. Uma propriedade importante dos cianoacrilatos em relação à sua utilização em betão é o facto de serem soluções ácidas. Em contacto com o betão, que é um ambiente alcalino, conduzem à neutralização da cola, potenciando tempos de presa mais rápidos. Este aumento mais rápido da resistência pode ser benéfico em condições de carregamentos cíclicos, porém, se o tempo de secagem é demasiado rápido, a dispersão do agente de reparação dentro da fenda pode ser insuficiente. Investigações preliminares têm mostrado, no entanto, que o tempo de presa no interior do betão é suficientemente longo para permitir o espalhamento do agente adesivo (Joseph et al., 2007).

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 cimentícia, 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 reparação;
- 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 cimentícia, 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 cimentícia, 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, a qual não exige qualquer estímulo externo adicional, o dano em si é o estímulo para a auto-reparação. Este conceito corresponde a uma estrutura de adaptação, porque a deteção da degradação, bem como a reparação ocorre autonomicamente dentro da estrutura do material (Hager et al, 2010). 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).

Comparando com o método de encapsulamento de produtos químicos, alguns autores (Zhu et al., 2012) defendem que a auto-reparação autónoma é mais vantajosa por ser mais económica, mais eficaz e conveniente devido à hidratação contínua de materiais de base cimentícia.

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) referem ser possível o preenchimento total de fissuras desde que a sua largura não ultrapasse $50\mu\text{m}$. Contudo investigações mais recentes (Sisomphon et al., 2012) utilizando um aditivo expansivo à base de sulfoaluminato de cálcio (CSA) e um aditivo cristalino (CA) comprovam ser possível preencher na totalidade fissuras com uma largura entre $250\mu\text{m}$ a $400\mu\text{m}$.

Li e Yang (Li et al., 2007) resumiram os três critérios gerais essenciais, identificados por diversos investigadores, para presenciarem 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: $5\text{-}10\mu\text{m}$, $53\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $205\mu\text{m}$ e $300\mu\text{m}$.

Em alguns casos estas conclusões podem ser contraditórias, pois são pesquisas efetuadas por vários autores e aqui foi apenas apresentado um resumo destes. Um exemplo de contradição é o caso da largura máxima aceitável da fenda, em que alguns autores especificam uma largura máxima de 10 μ m enquanto outros indicam um valor de 300 μ m para se observar a auto-reparação em diferentes condições ambientais. Este conjunto de propriedades físicas e químicas do material e das condições de exposição podem servir como uma base de referência para a conceção sistemática de uma auto-reparação robusta do betão (Li et al., 2007).

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). No capítulo 4 encontra-se uma pesquisa mais aprofundada dos betões de ductilidade ultraelevada reforçados com fibras usualmente designados na literatura científica pela abreviatura ECC correspondente a “engineered cementitious composites”.

Apesar da pouca pesquisa existente neste campo e de algumas aparentes contradições entre diferentes autores é possível indicar alguns benefícios e inconvenientes da auto-reparação de materiais de base cimentícia por hidratação posterior. 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 segundo alguns autores e depende do ambiente a que o material se encontra exposto.

4. BETÕES DE DUCTILIDADE ULTRAELEVADA (ECC)

O betão é um material com uma elevada resistência à compressão, mas com muito baixa resistência quando submetido a esforços de tração. É, essencialmente, um material frágil. Apesar de este material não ser projetado para suportar cargas de tração, estas podem ocorrer quando este sofre flexão, esforço transversal ou retração. Quando isso ocorre as fendas crescem a partir de defeitos ou falhas preexistentes no betão e param de se propagar apenas se o material encontrar outros meios para dissipar a energia. O betão não possui esses mecanismos, levando a que as fissuras resultem numa fratura instável e rápida perda de capacidade de carga.

O betão não é conhecido pela sua capacidade de dobrar, mas como mostra a Figura 20, formulações especiais do material podem torná-lo flexível e forte. A chave não é evitar completamente as fissuras, mas permitir a formação de microfissuras distribuídas que podem continuar a suportar uma carga crescente. Um betão dúctil é tão resistente como o betão normal em serviço normal, mas cede e deforma-se sem perda de capacidade de carga sob condições severas. Pequenas microfissuras no material são inevitáveis e, de facto, tais pequenas e distribuídas fissuras permitem que a estrutura resista a um colapso catastrófico (Li, 2012).



Figura 20 – Desempenho de material ECC quando submetido a ensaio de flexão (Li, 2012).

Todos os materiais têm um limite de elasticidade para além do qual podem ocorrer em danos irreversíveis. Tal como o autor Li (2012) menciona, quando a carga ultrapassa esse limite, os materiais dúcteis sofrem uma deformação plástica, o que significa que eles são permanentemente modificados embora não entrem em rotura. Um material que possua tal capacidade será também altamente tolerante a danos. Na presença de altas concentrações de tensão, tal como o induzido pela geometria aguda de um entalhe, um material dúctil tem a capacidade para redistribuir estas altas tensões e deformações para o volume de material adjacente através da sua capacidade de deformação plástica, evitando assim a falha catastrófica e propagação instável de uma fenda (Figura 21). O modo de rutura da falha é retardado num material resistente ao estender o limite de elasticidade, mas é reprimido num material verdadeiramente dúctil por deformação plástica.

Nas últimas duas décadas têm sido conduzidas investigações sobre os ECC reforçados com fibras ultra dúcteis, mais conhecidos como betões “flexíveis”. Estes materiais 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 60µm (Li, 2009 e Zhou et al., 2010).

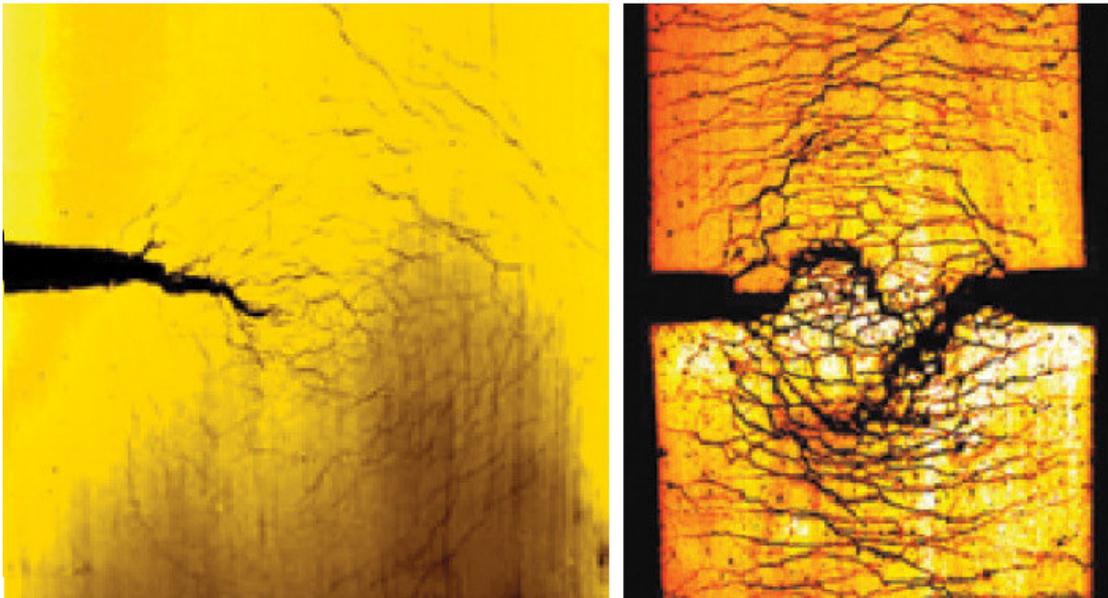


Figura 21 – Imagens de um ECC sob tensão com um (à esquerda) ou dois entalhes (à direita) mostram que as microfissuras espalham-se para longe dos entalhes, redistribuindo as altas concentrações de tensão nas pontas do entalhe (Li, 2012).

Segundo Wu et al. (2012), os ECC são uma das duas novas classes de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Alto Desempenho (HPFRCC) e são betões conhecidos pela sua ductilidade ultraelevada reforçados com fibras. A outra classe representa um material com uma melhoria drástica da tenacidade e com melhoria da ductilidade, o qual tem uma alta resistência à tração de 12MPa e uma ductilidade de 0,02-0,06%. Enquanto a maioria dos HPFRCCs dependem de um elevado volume de fibra para atingir um elevado desempenho, os ECC usam baixos volumes de pequenas e descontínuas fibras, tipicamente de 2%. HPFRCC é uma classe de material (Naaman et al., 2003) distinta da dos Compósitos Reforçados com Fibras (FRC), em que para HPFRCC é alcançada uma diferente magnitude de ductilidade de tração. Tal pode ser comprovado pela Figura 22, que compara a relação tensão-deformação de tração uniaxial do betão, entre FRC, HPFRCC/ECC e o betão normal. Através desta curva observa-se que no caso dos betões normais, a fenda abre e alarga com uma rápida queda da capacidade de carga. Para os ECC, após a primeira fissura há um aumento da tensão acompanhado por um aumento da deformação, enquanto, para o FRC tradicional, ocorre uma redução gradual da capacidade de carga com a dilatação de uma única fenda durante a diminuição da tensão (Lepech et al., 2010).

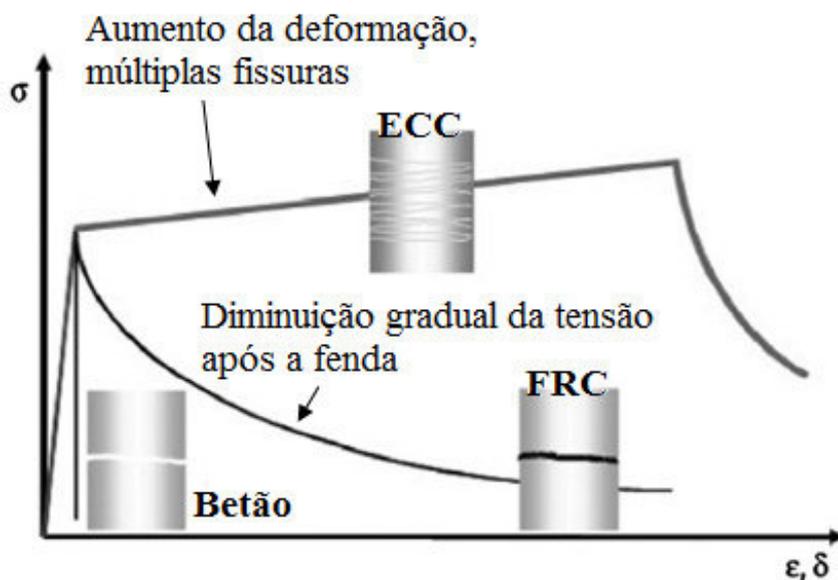


Figura 22 – Relação tensão-deformação de tração uniaxial do betão (Lepech et al., 2010).

A abordagem de desenvolvimento para as duas classes de HPFRCC mencionadas é muito diferente. Para os ECC a abordagem é para criar interações sinérgicas entre a fibra, a matriz

e a interface para maximizar a ductilidade à tração através do desenvolvimento de múltiplas microfissuras espaçadas que ajudam a aliviar as tensões geradas. Enquanto para a segunda classe, a abordagem é utilizar uma matriz densa cuidadosamente embalada para aumentar tanto a resistência à tração como a resistência à compressão do material. As fibras são adicionadas para neutralizar a alta fragilidade resultante da matriz densificada. A matriz densa permite uma forte ligação com a fibra que resulta numa elevada resistência pós-fissuração, desde que seja utilizada uma fibra de alta resistência (Wu et al., 2012).

A propriedade mecânica mais fundamental dos ECC é a sua capacidade de aguentar cargas mais elevadas após a primeira fissura enquanto submetidos a novas deformações. Baseado num modelo micromecânico, as fibras utilizadas nos ECC são adaptadas para funcionar com a matriz para a finalidade de limitar a rutura frágil localizada e garantir uma distribuição mais uniforme das microfissuras. Devido ao comportamento deslizamento-endurecimento das fibras, ECC pode suportar aumentos de carga que geram novas fissuras em outros locais (Wu et al., 2012).

A curva de tensão-deformação resultante quantifica o comportamento mecânico do material sob carga. Para materiais frágeis, essa curva é basicamente uma linha reta, denunciada por uma fratura na amostra que causa súbita descarga. Quando sujeitos a um esforço de tração, o betão normal, um material frágil, é caracterizado por uma extensão de 0,01%. Enquanto os betões de ductilidade ultraelevada, ECC, podem apresentar extensões entre 3 a 5%, o que representa um aumento de várias centenas de vezes relativamente aos betões correntes e faz com que os ECC sejam os betões mais dúcteis em aplicação em grande escala (Li, 2012). Relata-se que os ECC têm uma resistência à tração entre 4 e 6MPa (Li, 2009).

A curva típica de tensão-deformação para os ECC é apresentada na Figura 23. Observa-se que a primeira fissura nos ECC é seguida por um aumento da tensão acompanhado por um aumento da deformação. A curva é feita por três regimes característicos: o regime linear de "deformação elástica", tempo durante o qual o material pode recuperar a sua forma, se a tensão for removida (Figura 23 representado por "ED"); um regime de "transição" com uma redução gradual da rigidez efetiva (Figura 23 representado por "TR"); e o regime quase-linear "endurecimento por deformação plástica" com uma rigidez efetiva significativamente mais baixa (Figura 23 representado por "SH"). O regime de deformação elástica termina com um valor de tensão de cerca de 0,01%, semelhante à da amostra de um betão normal numa falha

catastrófica. O regime de endurecimento por deformação termina a cerca de 2 a 5% de deformação, dependendo da versão específica do ECC. Este último regime para ECC está associado com a ativação de um grande número de microfissuras quase paralelas que se desenvolvem numa direção perpendicular ao eixo de carga de tração e emanam de uma falha pré-existente no material. Ao contrário das fendas totalmente desenvolvidas em betão reforçado com fibra comum ou betão normal, estas microfissuras continuam a transportar uma quantidade crescente de carga até que a capacidade de deformação do composto é alcançada. A Figura 23 (à direita) também mostra o padrão de desenvolvimento da microfissura em diferentes fases de carga (Li, 2012).

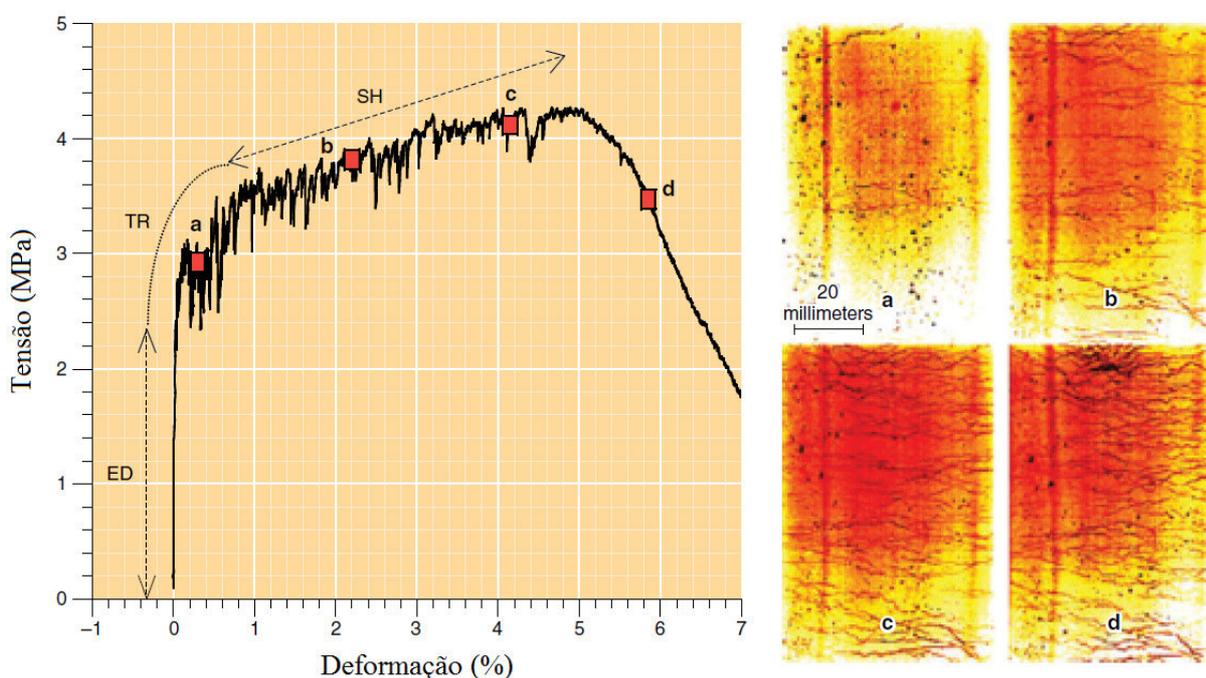


Figura 23 – Numa curva de tensão-deformação, o material é forçado até à rutura total para determinar a sua resistência. Esta curva para os ECC tem três regimes antes da rutura: deformação elástica (ED), o regime de transição (TR) e endurecimento por deformação (SH); o regime “d” com um declínio acentuado é depois da rutura (ou perda da capacidade de carga). Imagens a cores avançadas dos ECC (à direita, a-d) mostram a evolução de padrões de fissuras em pontos correspondentes na curva. A fissura inicial não é necessariamente a que levou à rutura total da amostra, mostrando a natureza distribuída de fissuras nos ECC. Os regimes de transição e de tensão de endurecimento não existem na curva de tensão-deformação de betão normal, mesmo que seja reforçado com fibra (Li, 2012).

A largura da fenda é um outro parâmetro importante, pois a abertura controlada destas microfissuras é a fonte da ductilidade ultraelevada à tração dos ECC. Este controlo de abertura das microfissuras permite que o material dissipe uma quantidade cada vez maior de energia, devido a um aumento da carga, antes que qualquer fissura possa evoluir para uma fenda maior (redistribuição de tensões a nível interno). A partir da Figura 24 é possível observar o controlo da largura estreita das fendas nos ECC. Como é perceptível, após o aumento da deformação elástica para cerca de 1% de deformação, as primeiras microfissuras param de alargar e permanecem mais ou menos constantes com uma largura de fenda de cerca de 60 μm , a qual é muito menor que a largura de fenda típica observada em betão armado e betão reforçado com fibra normal. Além disso, o autocontrolo da largura de fenda pode ser visto como uma propriedade intrínseca dos materiais ECC, em vez de depender da taxa de reforço de aço e das dimensões estruturais (Wu et al., 2012).

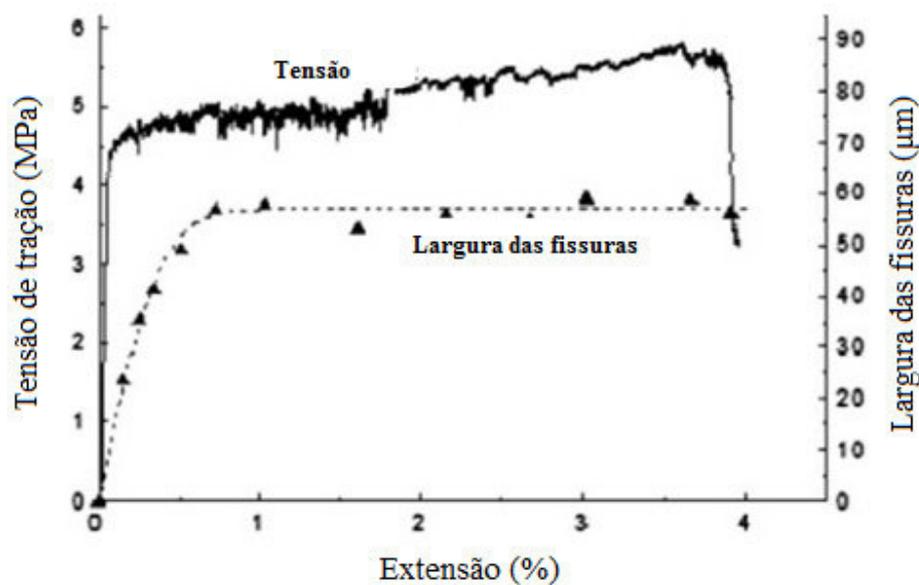


Figura 24 – Curva tensão de tração-extensão e evolução da largura de fendas para um ECC (Kan et al., 2010).

Assim, estes betões de ductilidade ultraelevada apresentam também uma elevada capacidade de auto-reparação pelo facto de conseguirem impedir que as fissuras não excedam os 60 μm , mesmo no caso de elevadas deformações, tal como foi confirmado através da Figura 24.

A interação entre as fibras e as microfissuras é complexa (Figura 25), especialmente quando as fibras atravessam a fenda num ângulo inclinado, como seria o caso para a maioria das

fibras quando são orientadas aleatoriamente dentro da matriz cimentícia. Se as fibras não deslizarem um pouco, elas iriam quebrar em vez de preencher a fenda. Se as fibras deslizarem excessivamente, a microfissura transforma-se numa fissura macroscópica (Li, 2012).

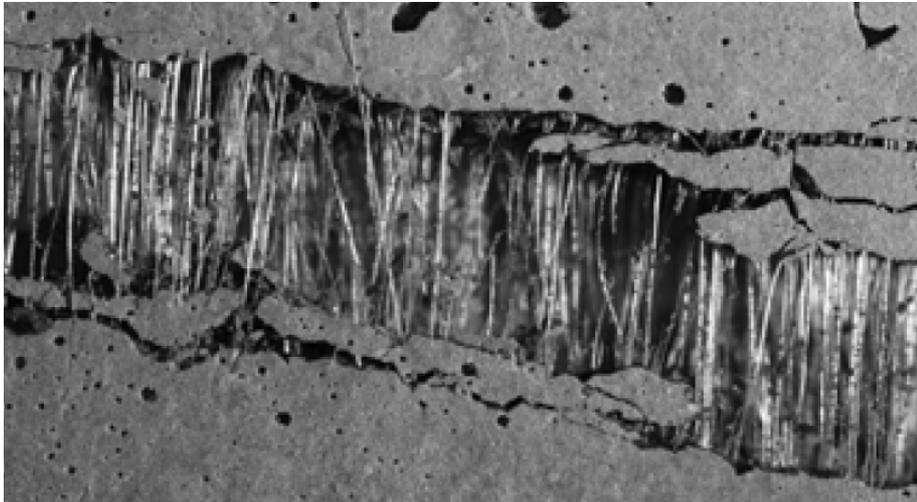


Figura 25 – Fibras formando uma ponte entre as faces da microfissura (a largura da imagem é de cerca de 5 milímetros), o que vai fornecer capacidade de carga (Li, 2012).

A partir da Figura 26 é possível comparar o desempenho de um pilar de betão corrente (Figura 26a) com um pilar de betão de ductilidade ultraelevada (Figura 26b) 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 sob as mesmas condições de carregamento apresenta microfissuras (linhas a marcador vermelho e verde), mas permanece intacto, mesmo sem armadura transversal.

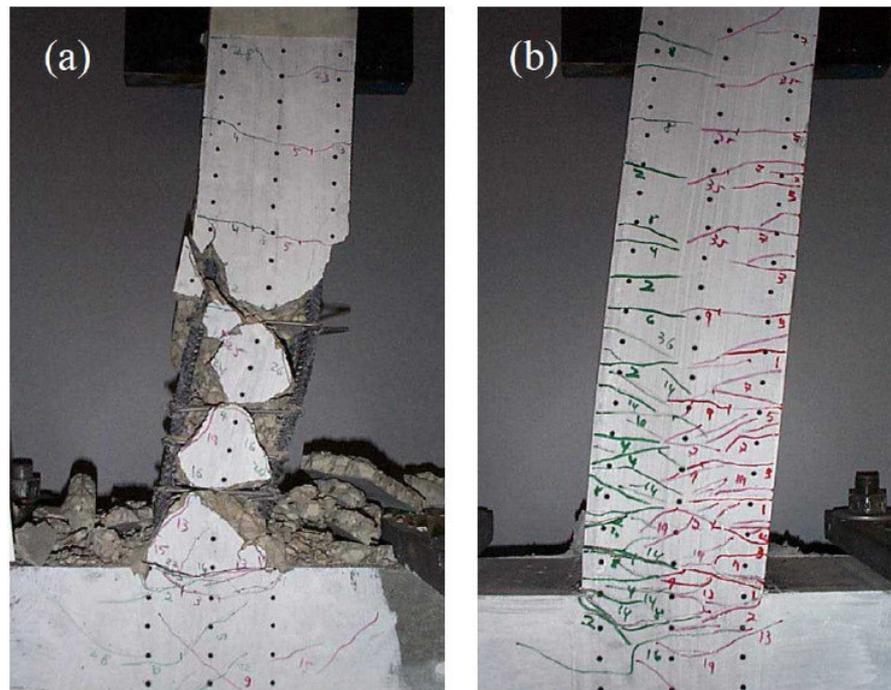


Figura 26 – Pilares de betão após ensaio mecânico semelhante ao que pode ocorrer durante um terremoto: a) betões correntes com armaduras principais e secundárias; b) betões de ductilidade ultraelevada sem estribos, ECC (Li, 2012).

A elevada ductilidade destes materiais torna-os, assim, especialmente indicados para a construção de infraestruturas em zonas de elevada sismicidade como também para a reparação de infraestruturas. Estes têm sido usados com sucesso em edifícios, pontes e reparos de estradas e outras infraestruturas, tais como canais de irrigação (Li, 2012).

A elevada ductilidade à tração dos ECC tem sido utilizada em vigas pré-moldadas utilizadas no núcleo de vários edifícios altos no Japão para aumentar a resiliência dos edifícios contra grandes terremotos. A Torre Residencial Nabeaure Yokohama no Japão, completa em 2007, foi construída com este material (Figura 27). Segundo Li (2012), foram posicionadas quatro vigas ECC, em cada andar, entre as paredes de canto no núcleo da estrutura. Durante um terremoto, estas vigas sentiram grande deformação de esforço transversal, passando por microfissuras e dissipando a energia, transmitida pela ação sísmica, para o edifício. As vigas de ECC mantiveram a capacidade de carga e preservaram a integridade e segurança dos ocupantes do edifício.

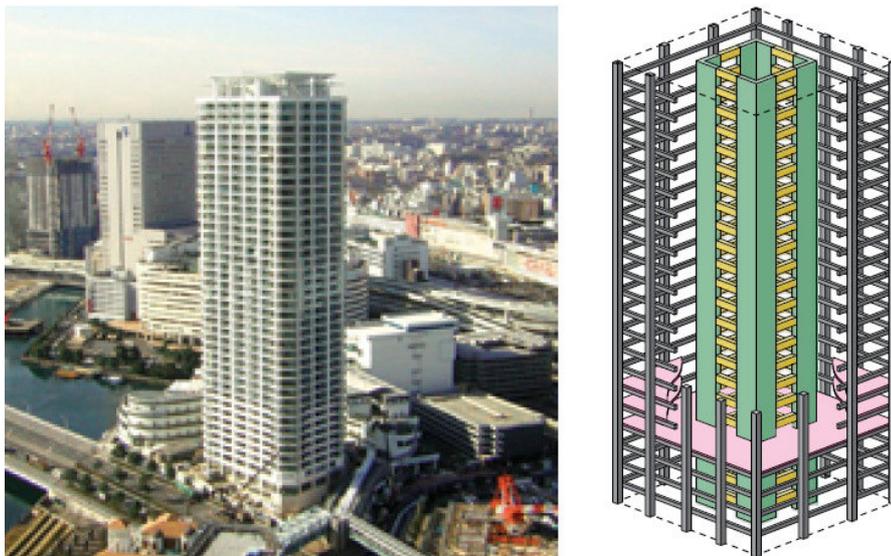


Figura 27 – A Torre Residencial Nabeaura Yokohama de 41 andares (à esquerda) foi concluída em 2007. Este contém quatro vigas de ECC por andar entre as paredes de canto (à direita, a amarelo) no núcleo do edifício, que irão reduzir os danos das paredes de canto (a verde) durante um terramoto e estabilizar o edifício (Li, 2012).

Uma ponte construída em 1976 com uma plataforma de betão armado, propriedade do Departamento de Transportes de Michigan, foi seleccionada em 2004 para demonstrar a reparação do pavimento de ECC (Lepech et al., 2010). Este trabalho consistia na reparação de uma seção de $7 \times 9 \text{m}^2$ de asfalto severamente deteriorado do pavimento de betão. Verificou-se que nos dois primeiros dias após o remendo, nenhuma fissura era visível no remendo de ECC, enquanto uma fenda, de aproximadamente $300 \mu\text{m}$ de largura, tinha aparecido no remendo do betão adjacente, provavelmente devido à deformação por retração. Após 4 meses de exposição ao inverno, uma série de pequenas microfissuras, cada uma de aproximadamente $50 \mu\text{m}$, formaram-se dentro do remendo de ECC, enquanto a fenda observada no betão tinha aumentado para 2mm e estava rodeada de betão deteriorado e fragmentado. Após 10 meses, observou-se uma largura máxima da fenda de $50 \mu\text{m}$ no remendo de ECC, enquanto o remendo de betão estava severamente deteriorado. No total, o tabuleiro da ponte passou por mais do que cinco ciclos completos de inverno de gelo-degelo, para além de sofrer carregamentos antes da reconstrução total do pavimento. Durante esses anos, o remendo de ECC sobreviveu a esta combinação de ambiente/carregamentos com microfissuras inferiores a $50 \mu\text{m}$. Ao contrário do remendo de betão que desenvolveu fissuras localizadas de $3,5 \text{mm}$ e em 2005 foi necessário voltar a reparar. Em suma, o ECC demonstrou um melhor

desempenho em comparação com o betão corrente. A Figura 28 apresenta o desenvolvimento das fissuras ao longo do tempo em ambos os remendos.

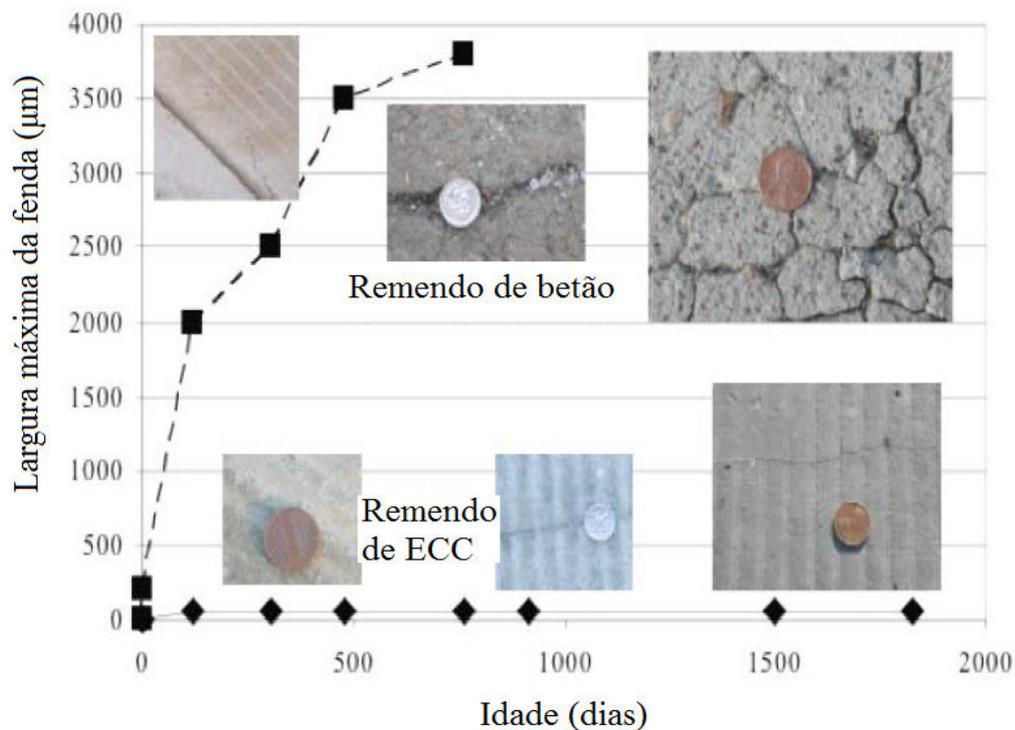


Figura 28 – Desenvolvimento da largura da fenda ao longo do tempo nos remendos de ECC e de betão normal (Lepech et al., 2010).

Como já foi comprovado anteriormente, os ECC com uma largura estreita de fenda contribuem para a durabilidade das infraestruturas, minimizando ou retardando os danos de gelo-degelo, da penetração de cloreto (sal de estrada) e da oxidação resultante das barras de aço de reforço. Uma laje de ligação de ECC substituiu uma junta de dilatação de betão convencional numa ponte no sudeste de Michigan (EUA). As juntas de dilatação padrão precisam de reparo frequente, às vezes por ano para algumas pontes movimentadas. Esta laje executa a função normal de uma junta de dilatação: esticando através da sua deformação plástica de tração quando as vigas da ponte expandem em comprimento em resposta a um aumento de temperatura e voltam ao seu tamanho original fechando as microfissuras quando as vigas da ponte contraem de comprimento em resposta a um clima mais fresco. Ao contrário de juntas de dilatação convencionais, a laje de ligação de ECC não acumula nem verte a água carregada de cloretos através da junta. Como se observa pela Figura 29, a laje de ligação de ECC não exigiu qualquer tipo de manutenção desde a sua instalação, ao contrário das

plataformas de junta de dilatação convencionais da ponte que necessitam de reparos frequentes (Li, 2012).



Figura 29 – Uma laje de ligação de ECC foi aplicada num tabuleiro de uma ponte em Michigan, em 2005 (à esquerda). A "joint jointless" é quase perfeita (à direita) (Li, 2012).

Antes de proceder à aplicação prática da laje de ligação de ECC na ponte anteriormente mencionada (Figura 29), 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 $600\mu\text{m}$ durante o teste cíclico, enquanto as larguras das fissuras na laje de ligação de ECC permaneceram pequenas, em todos os casos menores a $60\mu\text{m}$. Conclui-se que o material ECC foi uma escolha adequada para a construção de lajes de ligação para substituir juntas de dilatação convencionais.

A auto-reparação em ECC depende de diversas condições ambientais e são elas: a ação de secagem devido ao vento e ao sol; a água da chuva pois esta contém compostos sulfurosos provenientes da poluição industrial – chuva ácida; o escoamento das estradas e pontes é contaminado com cloretos devido à dissolução dos sais; a ação de gelo-degelo; o ataque dos sulfatos e carbonatação (Yang et al., 2009).

Li et al. (2004) analisaram o desempenho de misturas com uma elevada quantidade de cinzas volantes, com o objetivo de reduzir o consumo de cimento Portland e consequentemente o impacto ambiental dos betões de ductilidade ultraelevada. No Quadro 1 são apresentadas as composições de três misturas para ECC com cinzas volantes, juntamente com a mistura de

betão corrente e uma mistura de ECC (ECC R0) como referências. Neste quadro encontra-se, também, os valores da resistência à compressão e da extensão medidos aos 28 dias e a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) produzido. Apesar das pequenas alterações nos novos materiais de ECC, comprovou-se ser possível desenvolver betões de elevado desempenho com uma elevada quantidade de cinzas volantes e verifica-se, também, uma diminuição da libertação de CO₂ comparados com o ECC R0. Com a introdução das cinzas volantes, apesar de ocorrer uma diminuição da resistência (ECC G2 e ECC G3), estes continuam a possuir um valor suficientemente alto para a maioria das aplicações na engenharia de estruturas, como se pode comprovar com o valor do betão comum.

Quadro 1 – Composição de vários betões (kg/m³) de ductilidade ultraelevada e do betão de referência (Li et al., 2004).

	Betão	ECC R0	ECC G0	ECC G2	ECC G3
Cimento	390	838	583	318	318
Cinzas volantes	-	-	700 (classe F)	701 (classe F)	191 (classe C, 2 µm) 250 (classe F, 13 µm) 250 (cinzas de fundo, 50 µm)
Agregados	1717	838	467	701	701
Fibras PVA	-	26	26	26	26
Água	166	366	298	289	289
Super plastificante	-	17	19	19	19
Agentes de viscosidade	-	1,26	0,16	0,16	0,16
fcd (MPa)	35,0	42,0	68,0	38,6	36,5
Extensão (%)	0,02	4,9	4,5	4,0	4,3
CO₂ (g/L)	407,0	957,8	702,5	440,7	440,7

Nas experiências efetuadas por vários autores (Li et al., 2007; Yang et al., 2009 e Sahmaran et al., 2007), amostras de ECC pré-fissuradas foram expostas a vários ambientes que habitualmente as infraestruturas se encontram, tais como ciclos de molhagem e secagem, submersão em água e em solução de cloretos. Verificou-se que as propriedades mecânicas e de transporte poderiam ser amplamente recuperadas, especialmente para as amostras de ECC pré-carregadas para menos de 1% de deformação à tração. Além disso a largura estreita das fendas, a baixa relação água/cimento juntamente com a grande quantidade de cinzas volantes

na sua mistura também ajudaram a promover a auto-reparação através da hidratação continuada e atividades pozolânicas.

Num esforço para desenvolver materiais ECC com resíduos disponíveis localmente e/ou subprodutos, Zhou et al. (2008) apud Wu et al. (2012) desenvolveram uma série de misturas com grandes quantidades de escória de alto-forno em pó (BFS) e calcário em pó (LP), juntamente com uma elevada razão de água/ligante (0,45-0,60), todas caracterizadas com 2-3% de capacidade de deformação elástica e largura estreita de fendas (tipicamente abaixo de 60 μm). Qian et al. (2009) estudaram estas misturas e antecipadamente, sugeriram que a quantidade de materiais de cimento não hidratados após 28 dias de cura pode ser muito menor em comparação com amostras contendo grandes quantidades de cinzas volantes e uma baixa razão de água/ligante. Os resultados mostraram que os materiais ECC que foram feitos com grande quantidade de BFS e LP, juntamente com uma relação de água/ligante relativamente alta, permaneceram com o comportamento de auto-reparação semelhante em comparação com os materiais ECC utilizados noutros estudos caracterizados por uma elevada percentagem de cinzas e baixa razão de água/ligante. A razão foi também atribuída à largura estreita das fendas. Concluiu-se também, que o comportamento de auto-reparação em ECC depende fortemente da disponibilidade de cimento não hidratado e outros materiais suplementares de cimento, tais como o BFS.

A sequência de fotos em lapsos de tempo de uma amostra de ECC comprova como ela pode estar sujeita a auto-reparação (Figura 30). 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.

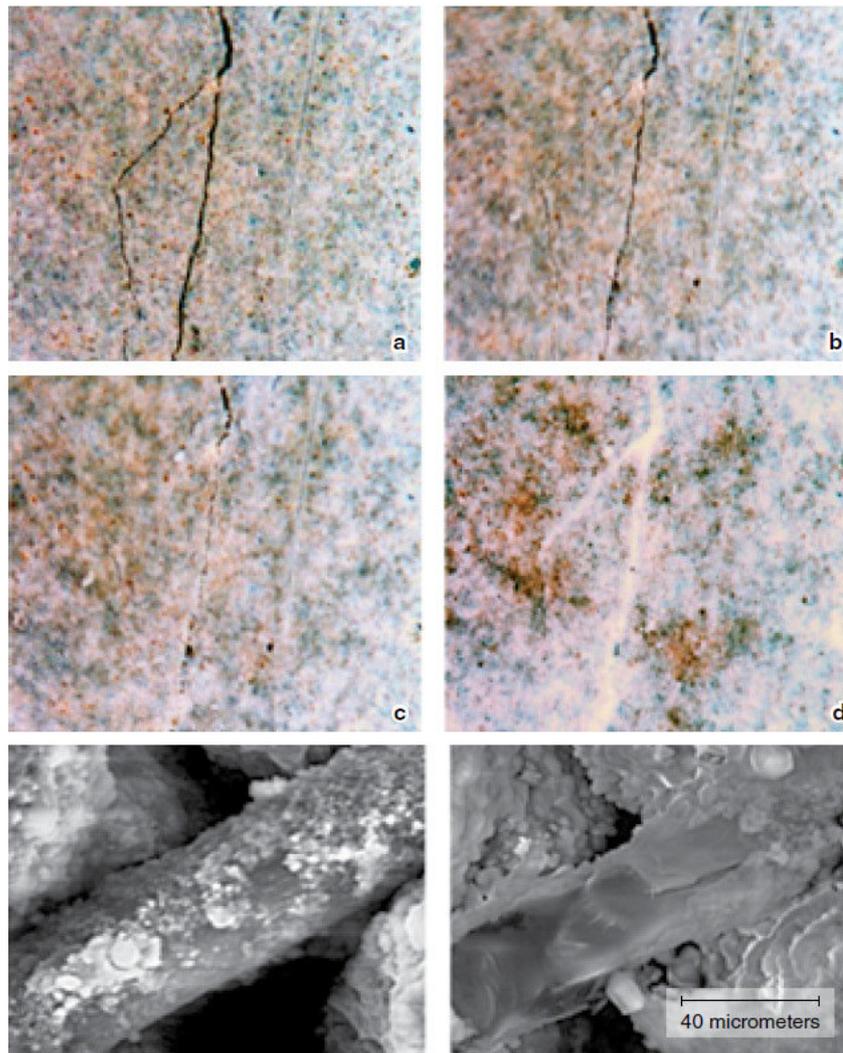


Figura 30 – Fotografias em lapsos de tempo (a-d) exibem uma amostra de ECC passando por auto-reparação. Micrografias mostram as faces da fenda e a superfície da fibra imediatamente após fissuração (canto inferior esquerdo) e com novos produtos de reparação formados após 36 horas de imersão em água (canto inferior direito) (Li, 2012).

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 μ m. Com o aumento da largura das fendas, a extensão da auto-reparação diminuiu. A Figura 31 mostra as microfissuras das amostras de ECC antes e depois da auto-reparação onde é visível o resíduo branco presente ao longo das linhas das fissuras. Além disso, a partir dos resultados da Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDX) apresentados na Figura 32, verificou-se que a maioria dos produtos produzidos na auto-reparação são característicos de cristais de carbonato de cálcio. A Figura 33a apresenta uma amostra de ECC

submetida a uma carga de tração depois de ser exposta a ciclos de molhagem e secagem. Novamente, o produto branco pode ser observado. Além disso, pode ser visto que a maioria das fissuras que se formam nesta amostra tendem a seguir as linhas das fissuras anteriores e a propagar-se através do material auto-reparado. Isto não é surpreendente, devido à natureza relativamente fraca dos cristais de carbonato de cálcio em comparação com a matriz de cimento hidratado. A reparação incompleta também pode ser responsável pela fraca resistência da primeira fenda. No entanto, este nem sempre é o caso. Como pode ser visto na Figura 33b, novas fissuras e caminhos de fissuras formaram-se adjacentes a uma fenda anteriormente reparada. A possibilidade deste evento depende fortemente das propriedades de fissuração da matriz adjacente à auto-reparação e à qualidade do próprio material auto-reparador. No entanto, este fenómeno serve como um testemunho para as reais possibilidades de recuperação completa das propriedades mecânicas através da auto-reparação no material ECC.

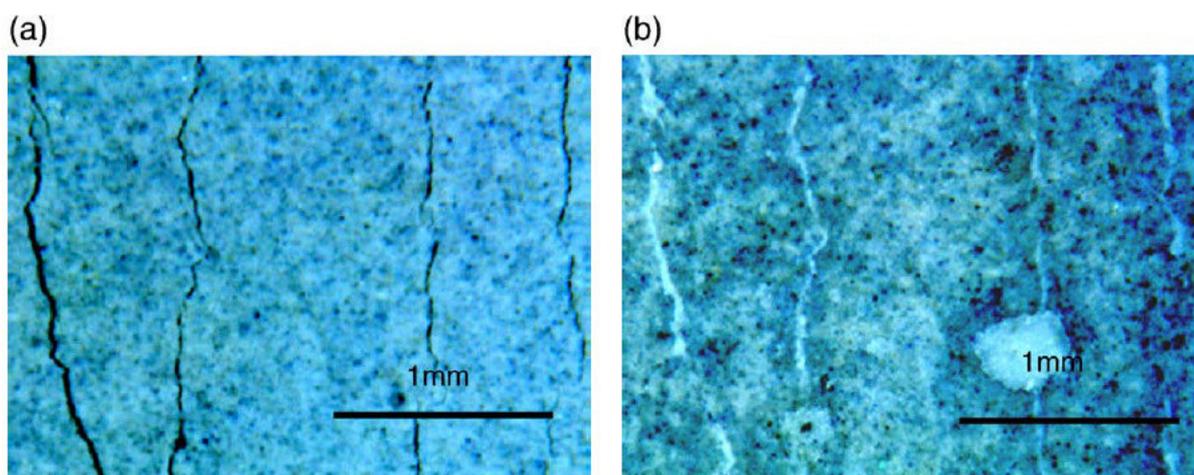


Figura 31 – Microfissuras no ECC, antes (a) e depois (b) da auto-reparação (Yang et al., 2009).

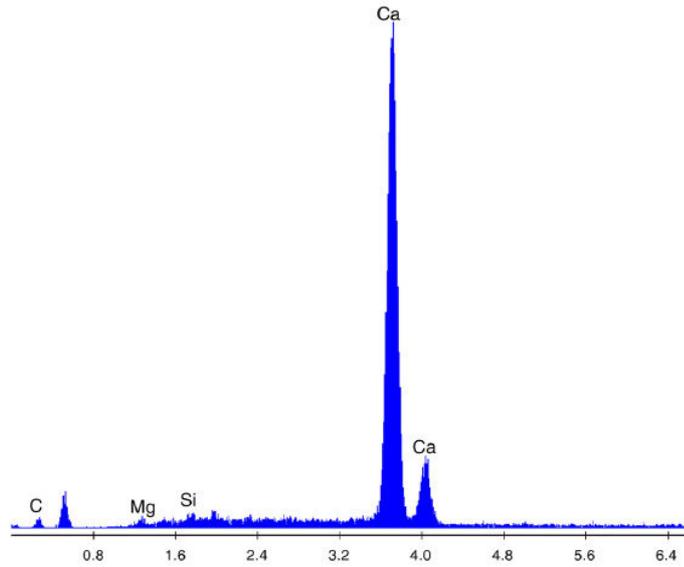


Figura 32 – Composição química dos produtos gerados na auto-reparação (Yang et al., 2009).

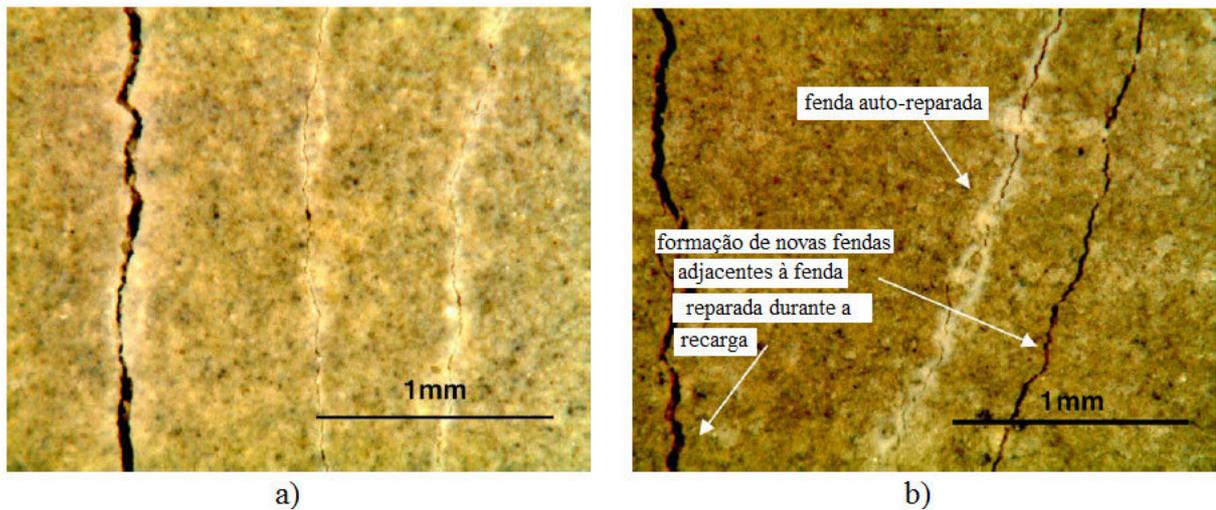


Figura 33 – (a) Fissuras através do material auto-reparado devido à recarga após os ciclos de molhagem e secagem; (b) Formação de novas fissuras adjacentes a uma fenda anteriormente reparada (Yang et al., 2009).

De seguida apresentam-se mais experiências, efetuadas por vários autores (Kan et al., 2010), que comprovam como os ECC estão sujeitos a auto-reparação autónoma. Aqui as amostras foram submetidas a 49 ciclos de molhagem e secagem. Na Figura 34 à Figura 37 é demonstrado os processos de crescimento de produtos da auto-reparação para fendas de 15 μ m, 30 μ m e 50 μ m sob um microscópio eletrónico em condições ambientais (ESEM), bem como na superfície das fibras. Observa-se que após o primeiro ciclo de molhagem e secagem,

alguns produtos de auto-reparação já estavam evidentes em todas as fendas. Para as fendas de 15 μ m, os produtos de auto-reparação semelhantes à fibra foram observados a crescer de ambos os lados da superfície da fenda até que, eventualmente, eles se encontram. Após alguns ciclos, os produtos tornaram-se muito mais densos e depois de 49 ciclos, a fenda foi quase completamente preenchida. Para as fendas de 30 μ m, observou-se o crescimento de partículas de aspeto pétreo sob os produtos de auto-reparação semelhantes à fibra após um ciclo. Estas partículas não foram observadas nas fendas mais pequenas. Depois de alguns ciclos, os produtos semelhantes à fibra tornaram-se mais densos e continuaram a crescer de ambos os lados da fenda, preenchendo-a quase na totalidade. Após os 49 ciclos, ainda foram observadas algumas partículas de aspeto pétreo na superfície da fenda. Quanto às fendas de 50 μ m, observou-se o crescimento de alguns produtos semelhantes à fibra em ambos os lados da fenda. No entanto, estes produtos foram incapazes de a preencher totalmente. Algumas partículas de aspeto pétreo também foram observadas na fenda. É evidente a incompleta reparação após 49 ciclos. Resumindo, produtos semelhantes à fibra foram os principais produtos encontrados nas fendas de 15 μ m, tanto produtos semelhantes à fibra como partículas de aspeto pétreo foram observadas nas fendas de 30 μ m e nas fendas de 50 μ m observou-se pouca quantidade de produto auto-reparador. Além das superfícies das fendas, as próprias fibras de PVA, que formam uma ponte entre as fissuras, fornecem locais de reação para os produtos reparadores que podem ajudar na auto-reparação dos ECC. Como é apresentado na Figura 37, muitos produtos reparadores semelhantes à fibra foram observados a formar-se na superfície das fibras de PVA. Após 10 ciclos de molhagem e secagem, estes produtos tornaram difícil distinguir as fibras de PVA da matriz. O crescimento destes produtos reparadores na superfície das fibras de PVA pode ser devido à natureza hidrófila da superfície de PVA e/ou à presença de iões de hidróxido ($-OH$), o que torna mais fácil para formar hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$).

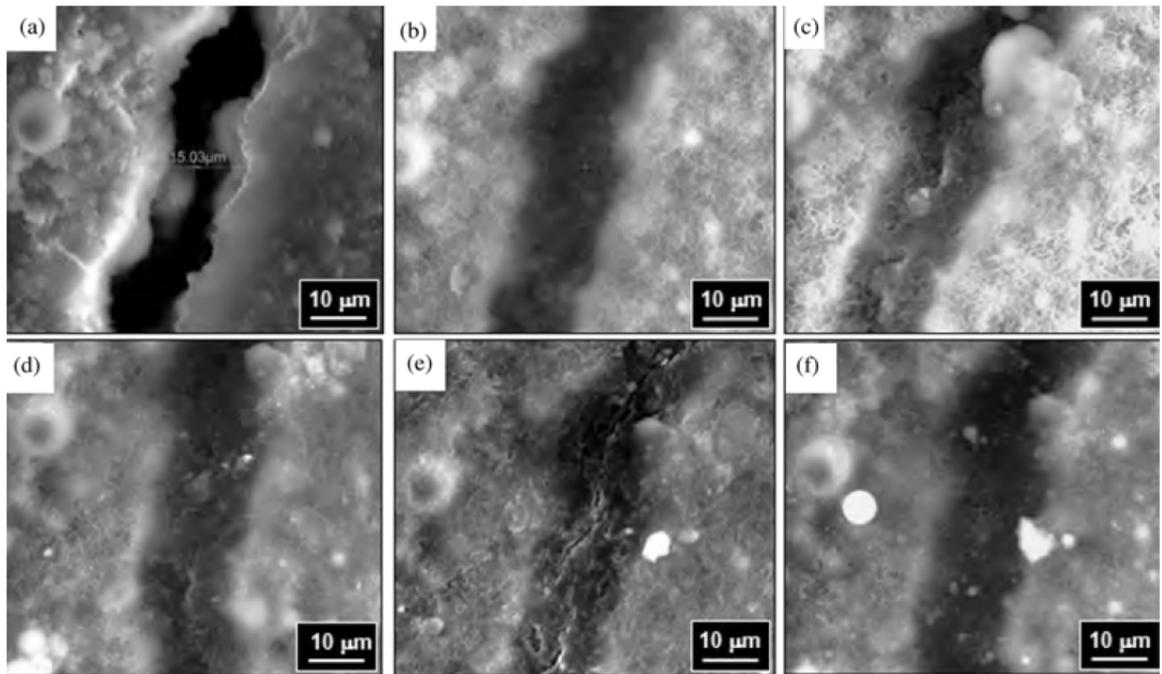


Figura 34 – Imagens ESEM do processo de auto-reparação em ECC (fendas de 15µm): (a) antes da auto-reparação (0 ciclos); (b) após 1 ciclo; (c) após 3 ciclos; (d) após 10 ciclos; (e) após 20 ciclos e (f) após 49 ciclos (Kan et al., 2010).

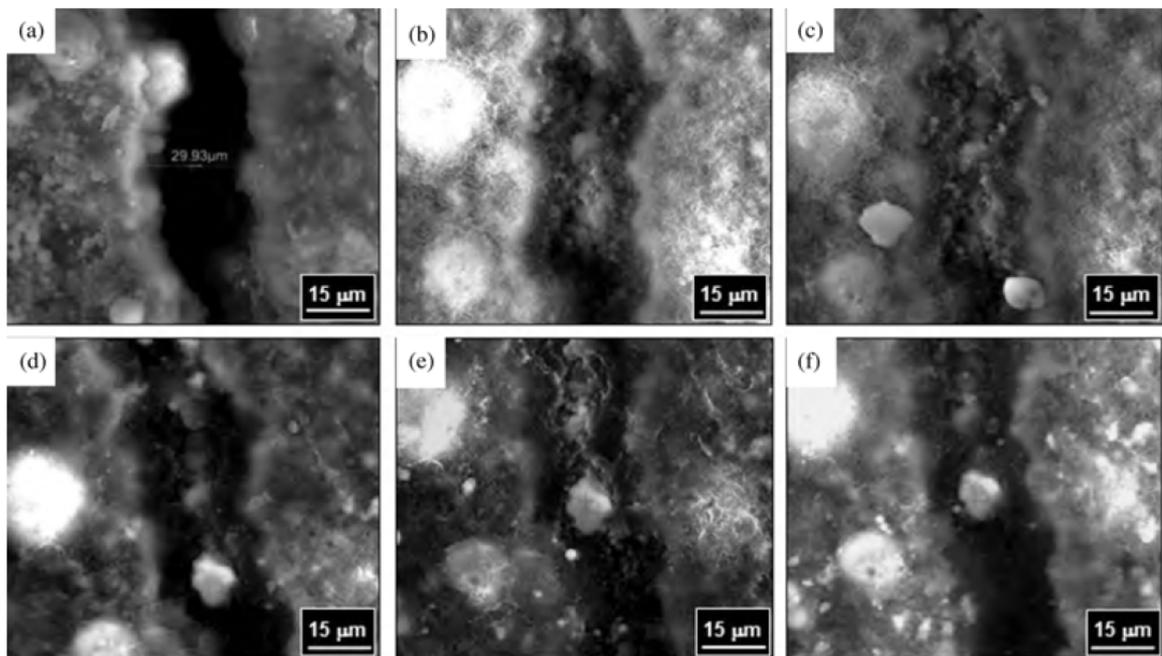


Figura 35 – Imagens ESEM do processo de auto-reparação em ECC (fendas de 30µm): (a) antes da auto-reparação (0 ciclos); (b) após 1 ciclo; (c) após 3 ciclos; (d) após 10 ciclos; (e) após 20 ciclos e (f) após 49 ciclos (Kan et al., 2010).

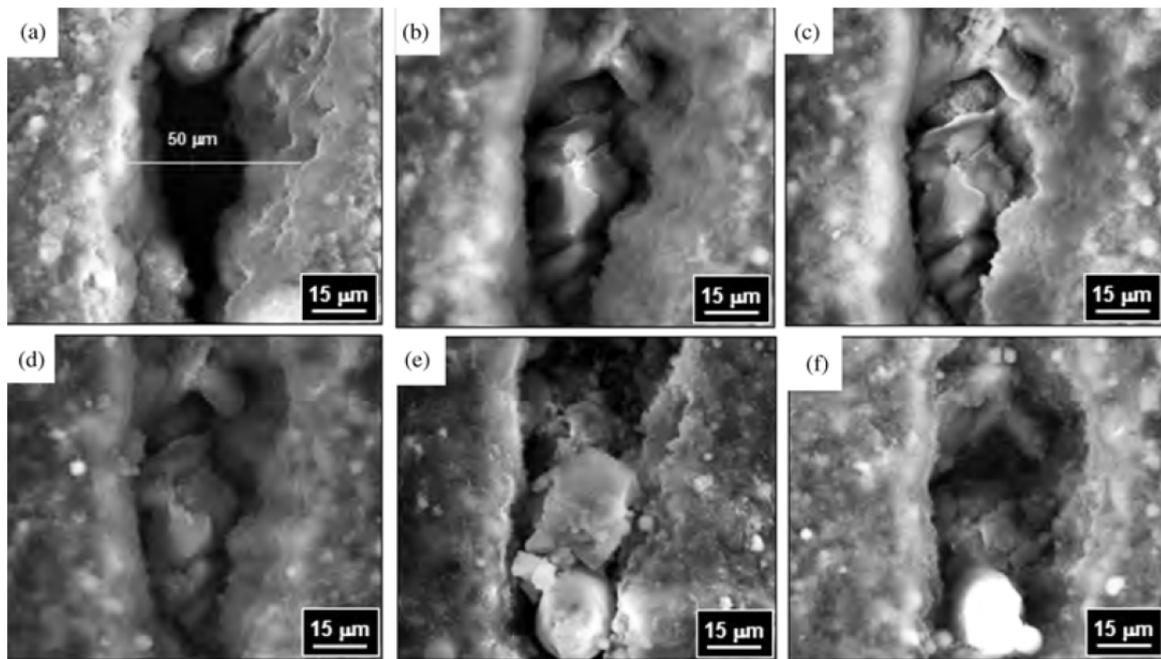


Figura 36 – Imagens ESEM do processo de auto-reparação em ECC (fendas de 50µm): (a) antes da auto-reparação (0 ciclos); (b) após 1 ciclo; (c) após 3 ciclos; (d) após 10 ciclos; (e) após 20 ciclos e (f) após 49 ciclos (Kan et al., 2010).

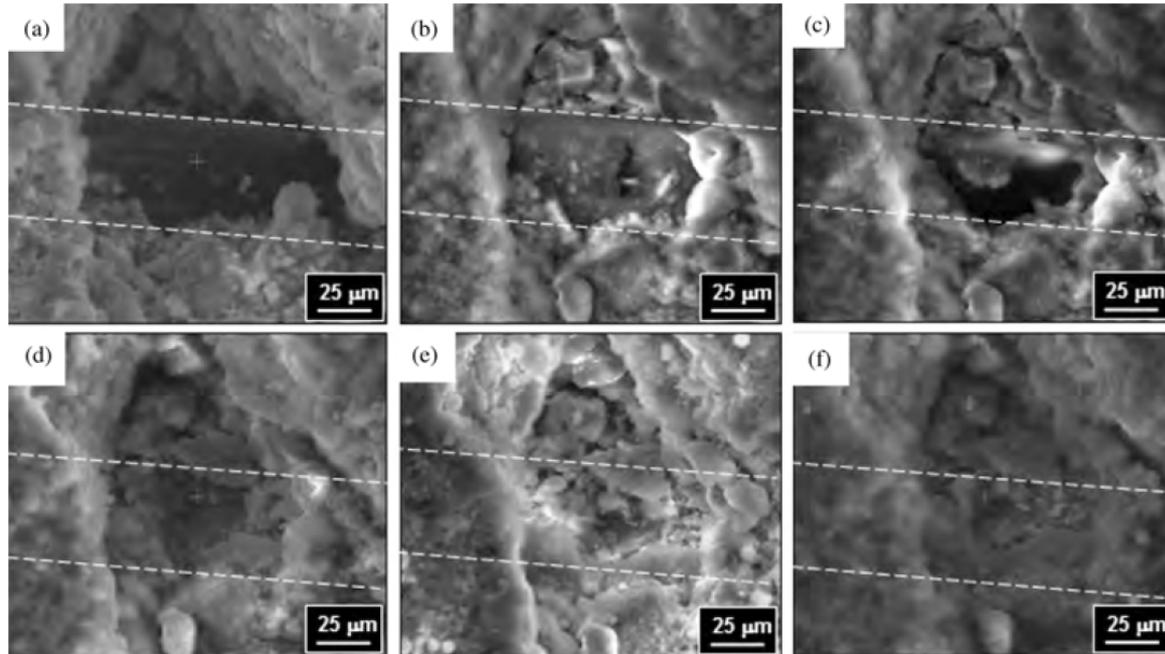
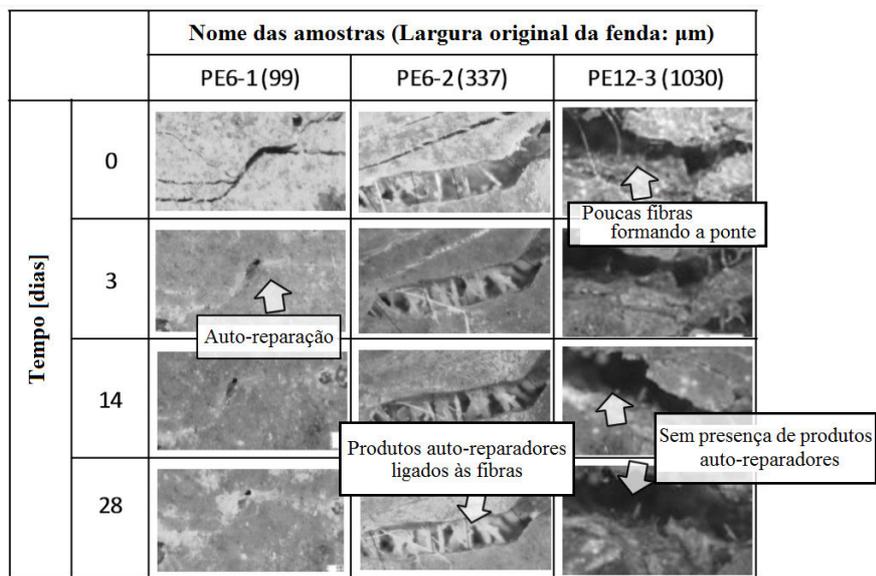


Figura 37 – Imagens ESEM do processo de auto-reparação em ECC na superfície da fibra: (a) antes da auto-reparação (0 ciclos); (b) após 1 ciclo; (c) após 3 ciclos; (d) após 10 ciclos; (e) após 20 ciclos e (f) após 49 ciclos (Kan et al., 2010).

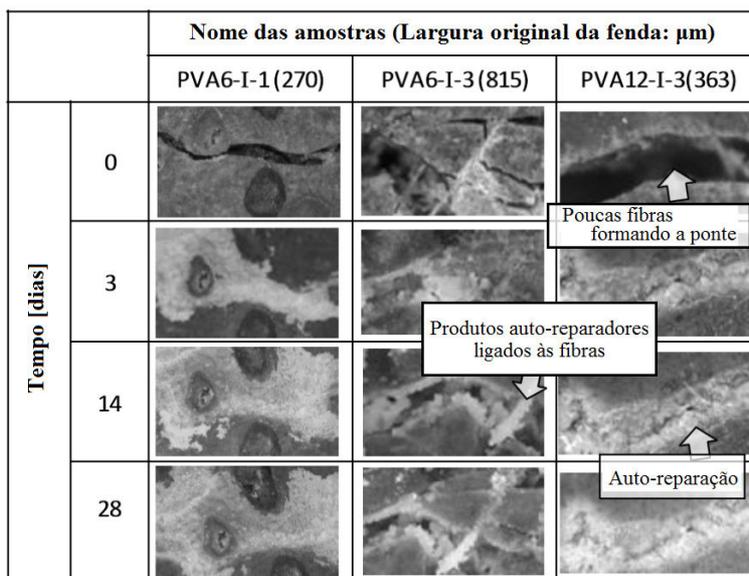
Investigações mais recentes sobre os ECC para aplicações de transporte (Lepech et al., 2010), consistiram na incorporação de resíduos industriais, em que mais de 70% dos constituintes dos ECC foram substituídos sem reduzir o seu desempenho mecânico. Estes resíduos incluem cinzas volantes, uma variedade de areia e resíduos de processos de fundição de metais, fibras de tapete pós-consumo, desperdícios de cimento em pó do forno da produção de cimento e esferas de poliestireno expandido (EPS) de operações de fundição de espuma perdida. Para além dos ECC possuírem muitas das características desejáveis para aplicações de pavimento de alto desempenho, incluindo uma excelente durabilidade, elevada ductilidade e resistência à fissuração, os autores confirmaram o elevado desempenho ambiental e económico destes materiais. Comparando com o betão comum, ensaios realizados com ECC mostraram que este possui um melhor desempenho no comportamento das fissuras por retração, nos testes de fadiga e na ligação ao betão do substrato, na exposição ao gelo-degelo, nos testes de abrasão e desgaste, no desempenho do material a longo prazo e nos testes ambientais acelerados. Além disso, a aplicação prática de materiais de ECC em pontes, como os exemplos já mencionados, a laje de ligação e o remendo de ECC, revelam que os ECC são uma escolha de alto desempenho viável para diversas aplicações rodoviárias. Comprovou-se que com um sistema de pavimentos de ECC devidamente projetado obtém-se impactos ambientais mais baixos para uma vida útil de 40 anos, em comparação com os sistemas de pavimentos de betão. Ao prolongar a vida útil e minimizando a frequência das operações de manutenção, a utilização do sistema de pavimentos de ECC reduz a energia total do ciclo de vida de 14%, as emissões de gases de estufa (dióxido de carbono, metano e óxido nítrico) em 32% e os custos em 40% em comparação com pavimentos convencionais. Como foi comprovado, o uso de materiais cimentícios ecológicos para a reabilitação de sistemas de pavimento rígido representa um grande potencial para a redução do consumo de materiais, de recursos energéticos e das emissões de poluentes. No entanto, a incorporação de tais resíduos industriais, devem ser cuidadosamente controladas para manter o desempenho geral do sistema ao longo de todo o ciclo de vida do projeto.

Herbert e Li (2011) apud Mihashi et al. (2012) efetuaram um estudo experimental sobre o comportamento de auto-reparação dos ECC em condições ambientais naturais. Eles concluíram que a auto-reparação não era tão robusta quanto a observada em alguns resultados experimentais realizados sob condições controladas de laboratório, contudo a auto-reparação no ambiente natural era promissora.

Koda et al. (2011) apud Mihashi et al. (2012) realizaram um ensaio de permeabilidade utilizando fibras de polietileno (PE) e fibras de PVA em que o volume do conteúdo de ambas as fibras era de 1,5%. As fibras de PVA que possuem polaridade química tinham uma capacidade significativamente maior de auto-reparação de fendas causadas por pré-carregamento (Figura 38). É de notar que a capacidade de auto-reparação do PE e PVA é quase a mesma para as fendas inferiores a 100 μm , mas a diferença torna-se significativa para fendas maiores que este valor. Esta diferença para as fibras de PVA pode se dever à natureza hidrófila da superfície de PVA.



(a) Séries PE



(b) Séries PVA

Figura 38 – Observação microscópica de produtos de cristalização na superfície da fenda (Mihashi et al.,2012).

Os estudos revelaram que devido às propriedades únicas dos ECC, nomeadamente, a capacidade de controlo da largura estreita de fendas (até 60µm) sob carregamento externo combinado com a sua maior percentagem de componentes de cimento e baixa relação água/ligante, em comparação com materiais cimentícios tradicionais, tornam estes materiais eficazes para a realização de auto-reparação. Este fenómeno ocorre, principalmente, devido à hidratação e à formação de cristais de cálcio (CaCO₃) na superfície das fendas. Além disso, a capacidade destes materiais de resistir a exposições de gelo-degelo e quente-frio, de suportar a carga de fadiga, de manter ou melhorar o desempenho mecânico a longo prazo e superar o betão corrente em aplicações de reparo conferem o potencial destes materiais para resolver problemas de fraca durabilidade do betão.

Após uma revisão dos estudos com aplicação de betões de ductilidade ultraelevada, pode concluir-se que estes são aplicados, em maioria e com sucesso, em infraestruturas viárias. No que diz respeito a custos, embora o custo inicial destes betões seja superior ao dos betões correntes é possível comprovar que uma análise de custos relativamente ao ciclo de vida de uma infraestrutura viária para os dois materiais é mais vantajosa quando se utilizam os primeiros por via de uma durabilidade superior e conseqüentemente uma menor necessidade de obras de conservação e manutenção. No entanto, potencialmente mais importante do que esses custos económicos são ambos os custos ambientais e sociais, os quais são reduzidos com a aplicação de pavimento de ECC. Devido a uma menor manutenção ao longo do ciclo de vida, menos material é utilizado juntamente com um menor congestionamento do tráfego, devido à menor construção. Em geral (Lepech et al., 2006), isto representa uma grande economia ao longo da vida de serviço em termos de redução de 40% no total de energia primária consumida, redução de 43% nas emissões de monóxido de carbono e redução de 45% nas emissões de dióxido de enxofre (um precursor para a chuva ácida).

Para além dos ECC reduzirem o impacto ambiental da sua produção e tornarem os pavimentos mais duráveis e sustentáveis, é possível melhorar ainda mais estes aspetos incorporando grandes volumes de resíduos industriais no ECC, tais como, cinzas volantes, uma variedade de areia e resíduos de processos de fundição de metais, fibras de tapete pós-consumo, desperdícios de cimento em pó do forno da produção de cimento e esferas de poliestireno expandido (EPS) de operações de fundição de espuma perdida. Ainda, é possível

obter betões de ductilidade ultraelevada com uma elevada quantidade de cinzas volantes, reduzindo o consumo de cimento, e com uma diminuição da libertação de CO₂.

De seguida são apresentadas as vantagens e desvantagens da utilização de betões de ductilidade ultraelevada (ECC).

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 CO₂;
- Excelente durabilidade;
- Elevada ductilidade;
- Resistência à fissuração.

Desvantagens:

- Auto-reparação limitada a fissuras com uma largura reduzida, cerca de 60µm.

5. AUTO-REPARAÇÃO POR RECURSO A BACTÉRIAS

Ao longo destes anos, a comunidade científica tem realizado diversos estudos através da observação da natureza e tem comparando soluções naturais com o seu equivalente produzido pelo homem. Desta forma a biotecnologia, que requer princípios biológicos e de engenharia, é uma nova área de investigação com potencialidade de contribuir para o aumento da durabilidade do betão através de biomineralização. Este é um fenómeno pelo qual os organismos, neste caso bactérias, levam à formação de minerais e foi utilizado pela primeira vez para a reparação de fendas (Gollapuddi et al., 1995; Pacheco-Torgal et al., 2013).

As bactérias são organismos unicelulares que em condições ótimas podem subdividir-se muito rapidamente, duplicando a cada 9,8 minutos. Num mililitro de água podem encontrar-se um milhão de bactérias, numa grama de solo existem à volta de 40 milhões e estima-se que no total existam no Planeta Terra aproximadamente 5×10^{30} bactérias, formando a grande parte da biomassa do mundo (Chahal et al., 2012).

A biomineralização é definida como uma precipitação biologicamente induzida em que um organismo cria um microambiente local, com as condições que permitem uma ótima precipitação química extracelular 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. O estudo realizado por Tittelboom e seus colegas de trabalho (Van Tittelboom et al., 2010) demonstra o processo de biomineralização. A bactéria utilizada destinou-se a produzir urease, a enzima que catalisa a ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) em amónio (NH_4^+), carbonato (CO_3^{2-}). Como a parede celular das bactérias é carregada negativamente, estas são capazes de atrair catiões provenientes do meio, incluindo iões de cálcio (Ca^{2+}) de carga positiva, que se depositam na superfície da parede celular. Em seguida, os iões Ca^{2+} reagem com os iões CO_3^{2-} conduzindo à precipitação do carbonato de cálcio na superfície da célula. Ainda, o amoníaco libertado no ambiente aumenta o pH levando a uma acumulação de CaCO_3 insolúvel num ambiente rico em cálcio. Com este método de induzir a precipitação do CaCO_3 bacterianamente localizada, as faces da fenda podem ser preenchidas. A Figura 39 apresenta uma representação simplificada do processo de biomineralização respeitante à produção de carbonato de cálcio por bactérias urolíticas e imagens ESEM do CaCO_3 precipitado com

diferentes formas na superfície das fissuras são exibidas na Figura 40 (Pacheco-Torgal et al., 2013).

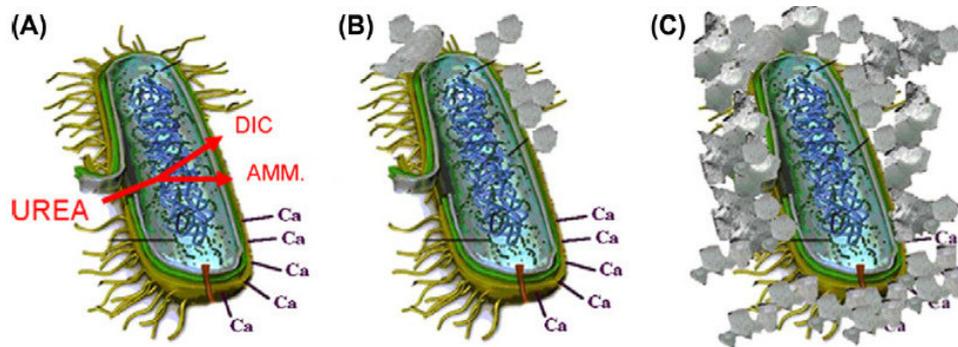
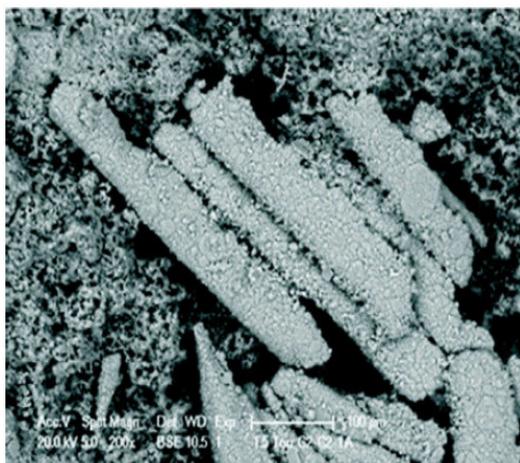
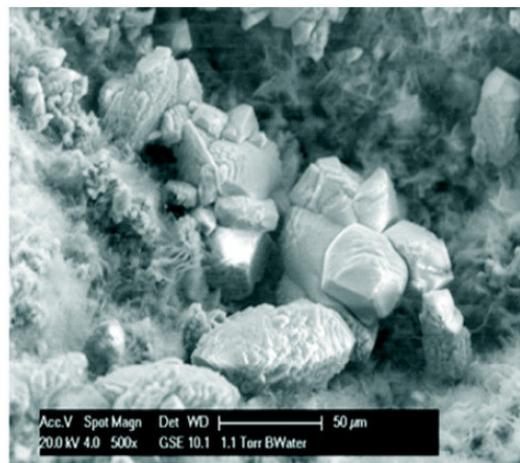


Figura 39 – Representação simplificada da produção de carbonato de cálcio por bactérias urolíticas: (A) Após adição de ureia à bactéria, libertam-se carbono inorgânico dissolvido (DIC) e amónia (AMM) para o microambiente da bactéria; (B) O fenómeno anterior conjugado com a presença de iões de cálcio leva à supersaturação e início da precipitação de carbonato de cálcio na parede celular bacteriana; (C) Depois de um tempo, ocorre o encapsulamento da bactéria (De Muynck et al., 2010).



(a) Precipitação tipo lâmina



(b) Precipitação esférica

Figura 40 – Imagens ESEM que mostram a auto-reparação em amostras de betão à base de bactérias. Carbonato de cálcio maior (50-500µm) produzido por bactérias incorporadas no betão na superfície das fissuras. (a) 100µm e (b) 50µm (Wu et al., 2012).

Ramachandran et al. (2001) relataram que um pH elevado dificulta o crescimento de bactérias e também mencionaram que o pH ótimo para o crescimento de *Bacillus pasteurii* é cerca de 9.

De acordo com Arunachalam e seus colegas investigadores (Arunachalam et al., 2010), a bactéria *Bacillus sphaericus* induziu a precipitação do carbonato de cálcio a pH igual a 8 produzindo melhores resultados. A hidrólise da ureia também é dependente da temperatura e a faixa ótima de temperatura é de 20°C a 37°C.

A utilização de diferentes bactérias conduz a diferentes resultados de precipitação de carbonato de cálcio. Ramachandran et al. (2001) verificaram que a contribuição de *Pseudomonas aeruginosa* relacionado com a precipitação de carbonato de cálcio foi insignificante, enquanto Ghosh et al. (2005) apud Pacheco-Torgal et al. (2013) referiram que o uso de *Escherichia coli* não mostrou nenhuma evidência de biomineralização.

Na maioria dos estudos, as bactérias urolíticas do género *Bacillus* foram usadas como agente para a produção biológica de minerais de carbonato de cálcio. O mecanismo de formação de carbonato de cálcio por estas bactérias é baseado na hidrólise enzimática da ureia. Um inconveniente potencial deste mecanismo de reação é que, para cada ião carbonato dois iões amónio são produzidos simultaneamente. Isto pode aumentar o risco de corrosão da armadura (Pacheco-Torgal et al., 2013). Além disso, amoníaco atmosférico é reconhecido como um poluente que contribui para vários problemas ambientais.

De Muynck et al. (2008a) analisaram a durabilidade de betões (aferida pela absorção de água por capilaridade e permeabilidade) para superfícies tratadas com culturas de bactérias e concluíram que o tipo de cultura (pura ou de mistura) influencia a morfologia dos cristais de carbonato de cálcio, sendo que a utilização de culturas puras resultou numa diminuição mais acentuada na absorção de água. Também concluíram que o nível de impermeabilização conseguido à custa de bactérias do tipo *Bacillus sphaericus* é comparável ao obtido com impermeabilizantes correntes de génese polimérica. Noutro estudo (De Muynck et al., 2008b) com recurso a outros parâmetros de durabilidade do betão (carbonatação, difusão de cloretos e gelo-degelo), os autores verificaram uma redução da permeabilidade e confirmaram a semelhança do desempenho entre o tratamento com bactérias e os materiais impermeabilizantes convencionais.

Okwada e Li (2011) utilizaram bactérias do tipo *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859) e presenciaram uma redução da permeabilidade do betão que pode ser quase 5 vezes menor do que a permeabilidade do betão de referência. Afirmam também que o betão reparado tinha

uma elevada resistência à carbonatação. Achal et al. (2011a) referem uma redução até 6 vezes da absorção de água do betão. Numa outra investigação realizada por estes últimos autores (Achal et al., 2011b), utilizou-se uma cultura de bactérias *Sporosarcina pasteurii* com atividade urolítica otimizada (por mutação genética), mostrando ser capaz de sobreviver a valores muito elevados de pH e observou-se reduções da absorção de água, da permeabilidade e da difusão de cloretos (Pacheco-Torgal, 2012a). Outros autores (Li et al., 2012) confirmam a redução da absorção de água por capilaridade de betões cuja superfície foi tratada com bactérias levando a uma redução da carbonatação dos mesmos entre 25% a 40%.

Segundo De Muynck et al. (2010) a aplicação deste tipo de tratamento superficial do betão está longe de ser eficiente em termos de custo, pois é dependente do preço dos micro-organismos e do preço dos nutrientes (5-10 €/m²).

Em alternativa à aplicação de bactérias como tratamento superficial, a utilização de bactérias como aditivo no betão constitui uma outra forma de contribuir para o aumento da sua durabilidade. Ramachandran et al. (2001) referiram que o uso da bactéria *Bacillus pasteurii* tem uma influência positiva sobre o desempenho das composições de cimento, nomeadamente para a reparação de fissuras.

Ghosh et al. (2009) mencionam que a utilização de bactérias na mistura do betão leva à formação de novas fases de silicatos que vão preencher os microporos e que a utilização de uma concentração de bactérias de 10⁵ células/ml permite otimizar o desempenho deste material.

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 conhi*). 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.

Reddy et al. (2010) observaram que o uso de bactérias *Bacillus subtilis* para uma concentração de células de 10⁵/ml de água da mistura, aumenta a resistência do betão ao

ataque de ácido sulfúrico. Já outros autores (Afifudin et al., 2011 apud Pacheco-Torgal et al., 2013) obtiveram um desempenho ótimo para uma concentração de 10^6 células por ml.

De acordo com Van Tittelboom et al. (2010), a utilização de bactérias ajuda a reduzir a permeabilidade dos betões, no entanto, estes mencionam que a elevada alcalinidade da matriz cimentícia impede o desenvolvimento destes micro-organismos. Como forma de ultrapassar este problema os autores sugerem a imobilização das bactérias num gel de sílica. Outros investigadores ultrapassaram este problema recorrendo à encapsulação em polímeros (Bang et al., 2001).

Achal et al. (2011c) estudaram betões contendo cinzas volantes e bactérias *Bacillus megaterium* e observaram uma redução da absorção de água 3.5 vezes inferior à do betão de referência. Também notaram uma redução da permeabilidade comparando com o betão de controlo. Para estes mesmos betões mas com uma concentração de bactérias *Sporosarcina pasteurii* de 10^5 /ml, outros autores (Chahal et al., 2012) constataram uma redução até 4 vezes da absorção de água e até 8 vezes na difusão de cloretos devido à deposição de calcite.

Wiktor e Jonkers (2011) sugerem a utilização de partículas porosas de argilas contendo bactérias e lactato de cálcio como uma forma eficaz de selar as fissuras interiores do betão com uma largura de até 0,46mm (Figura 41). Eles também mencionaram que, desde que as bactérias consumam oxigénio, tal pode proporcionar um benefício adicional associado com o potencial de inibir a corrosão das armaduras.

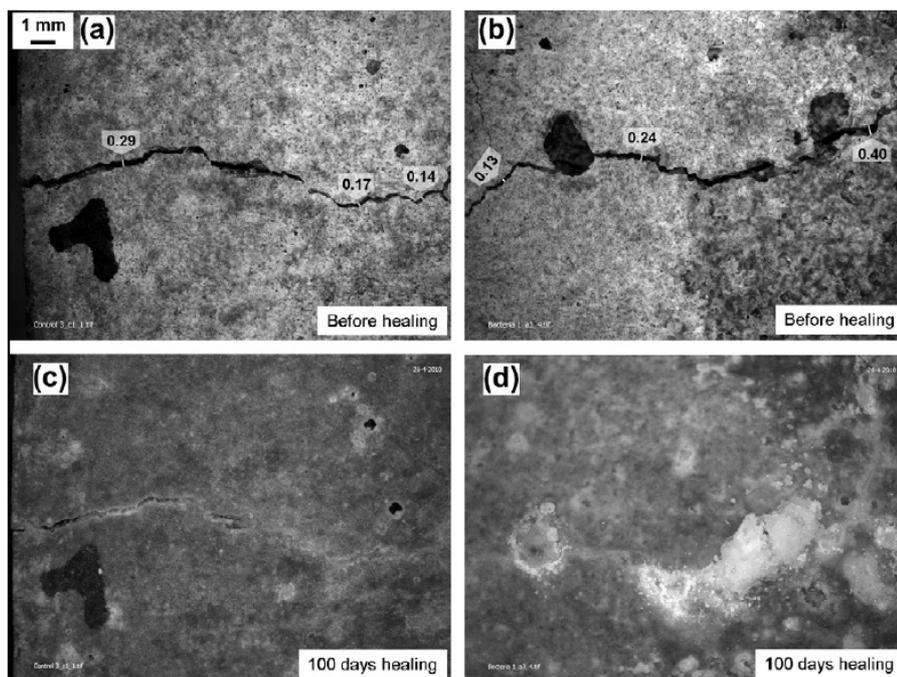


Figura 41 – Visualizações microscópicas comprovativas da selagem das fissuras numa amostra de controlo antes (a) e 100 dias depois (c); numa amostra com a utilização do agente bioquímico antes (b) e 100 dias depois (d) (Wiktor et al., 2011).

Wang et al. (2012a) sugeriram a utilização de terra diatomácea como forma de proteção da bactéria *Bacillus sphaericus* da elevada alcalinidade da matriz cimentícia. Comprovaram que esta técnica permitiu que as bactérias evidenciassem uma atividade urolítica superior, entre 12-17g/l de ureia ao fim de 3 dias contra 1g/l para bactérias da amostra de referência no mesmo período de tempo. Noutra investigação (Wang et al., 2012b), os mesmos autores compararam o desempenho de duas técnicas diferentes para proteção das bactérias, gel de sílica e poliuretano. Na primeira utilizaram Levasil®200/30% com uma superfície específica de 200m²/g e um teor de sólidos de 30%. Já na segunda as bactérias foram encapsuladas com poliuretano bi-componente do tipo MEYCO MP 355 1 K (BASF). Os resultados obtidos mostraram que as bactérias em gel de sílica apresentam uma atividade urolítica mais elevada, resultando numa quantidade superior de carbonato de cálcio precipitado (25%) contra apenas 11% para as bactérias encapsuladas com poliuretano. Estes autores referem ainda que estas técnicas se traduzem num agravamento do custo inicial do betão entre 5% a 21% no primeiro caso e entre 7% a 28% no segundo. Os quais serão no entanto compensados à posteriori por via da redução dos custos de futuros trabalhos de manutenção ou reparação.

Por último, são enunciadas as principais vantagens e desvantagens da auto-reparação por recurso a bactérias.

Vantagens:

- Atividades biológicas de uma maneira livre de poluição e natural;
- Redução da permeabilidade;
- Redução da absorção de água.

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.

6. CONCLUSÕES

A realização do presente trabalho revelou-se fundamental na medida em que permitiu conhecer algumas estratégias para obter a auto-reparação do betão e a possível aplicação em obra. Verificou-se, ainda, que com a utilização destes métodos é possível aumentar a vida útil das infraestruturas, reduzir os custos associados e conseguir uma redução de gases tóxicos na fabricação do betão. Contudo nem todos os métodos apresentados são viáveis para pronta utilização.

De todas as estratégias de auto-reparação propostas, algumas delas concentram-se no potencial dos próprios materiais cimentícios, tais como os componentes de cimento não hidratado no interior e a capacidade da matriz para fornecer iões de cálcio. Enquanto há também alguns estudos que tentam dotar matrizes cimentícias com capacidade de auto-reparação através da introdução de produtos químicos externos, como a incorporação do agente de reparação ou a utilização de bactérias.

Apesar de nos últimos anos a tecnologia de auto-reparação de betões com cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos tenha sido objeto de investigações muito promissoras, ainda não atingiu no entanto, uma fase de amadurecimento que permita a sua utilização efetiva e imediata pela indústria da construção. Muitas investigações foram levadas a cabo com a utilização de diferentes agentes de reparação e apesar de se terem obtido alguns resultados positivos segundo alguns estudos mas não totalmente viáveis, não existe muita concordância entre os investigadores. No que diz respeito ao sistema de abastecimento externo do agente de reparação, apesar de esta técnica não ser totalmente considerada como auto-reparação, ou seja, o agente reparador tem que ser fornecido para dentro do reservatório, seriam benéficos estudos mais aprofundados e no futuro, talvez, a sua utilização visto a sua principal vantagem ser o fornecimento do agente reparador quando necessário, de modo a reparar fendas maiores ou uma maior quantidade destas. E para além de este método permitir que a maior parte do agente reparador seja derramado para as fendas pois não ocorre efeitos de sucção como acontece com ambas as extremidades fechadas, pode-se esperar a recuperação das propriedades mecânicas após a reparação dos danos.

Como foi mencionado, o próprio betão tem a capacidade de se auto-reparar por hidratação posterior. Apesar da pouca pesquisa existente neste campo e de algumas aparentes contradições entre diferentes autores, seria uma mais-valia haver estudos mais aprofundados para possíveis melhoramentos da composição do betão e na busca de uma referência para a conceção de um betão com uma boa capacidade de auto-reparação. Um exemplo de betões com hidratação posterior e com sucesso em aplicações práticas são os ECC. Estes têm sido utilizados com êxito em edifícios, mas principalmente em infraestruturas viárias como pontes e reparos de estradas. Devido às suas características é possível reduzir o impacto ambiental da sua produção, tornar a infraestrutura mais durável e sustentável. Relativamente aos custos, apesar de estes materiais terem um custo inicial superior ao dos betões correntes é mais vantajoso a utilização dos ECC, pois devido ao aumento da durabilidade haverá no futuro uma menor necessidade de obras de conservação e manutenção.

Por último, a adoção de bactérias como estímulo para a precipitação de carbonato de cálcio com o intuito de preencher as fissuras foi prevista para ser uma das novas tecnologias de auto-reparação do betão. Este método bastante inovador e promissor que é resultado de atividades biológicas, é livre de poluição e é natural, pode levar a uma indústria de construção mais sustentável. No entanto ainda existem problemas, tais como o facto de o tempo de vida das bactérias no betão ser muito mais curta do que a vida útil de serviço dos edifícios e infraestruturas. Para além de que as pesquisas até agora efetuadas centrarem-se mais no lado da durabilidade enquanto há pouco sobre as propriedades mecânicas. Esta técnica ainda está longe de ser reconhecida e fiável capaz de substituir os tratamentos de superfície de betão comuns à base de selantes de polímeros orgânicos ou na utilização de bactérias como aditivo no betão.

Em suma, a engenharia de auto-reparação de betões promete obter estruturas de betão mais duradouras, a menores custos e espera-se um desenvolvimento significativo destes campos no futuro.

Com este trabalho de revisão, deve tornar-se claro que a auto-reparação do betão é um tema de pesquisa verdadeiramente interdisciplinar envolvendo microbiologia, química, ciência dos materiais, engenharia civil, etc.

7. PERSPETIVAS FUTURAS

A elaboração deste trabalho 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.

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Mais investigações devem ser efetuadas para melhorar as estratégias mencionadas;
- Estudo em laboratório das vertentes em estudo;
- Estudar para que larguras de fendas é possível ocorrer a auto-reparação com recurso à utilização de cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos;
- Mais estudos sobre a eficiência na utilização de fibras cerâmicas;
- Pesquisa de métodos para que não ocorra a quebra das cápsulas e dos tubos ocios 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;
- Mais estudos na produção dos ECC com resíduos industriais;
- 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 BIBLIOGRÁFICAS

Achal, V.; Mukherjee, A.; Reddy, M. (2011a) Microbial concrete: Way to enhance the durability of building structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, Nº 6, p. 730–734.

Achal, V.; Mukherjee, A.; Reddy, M. (2011b) Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, Vol. 38, p. 1229–1234.

Achal, V.; Pan, X.; Ozyurt, N. (2011c) Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation. *Ecological Engineering*, Vol. 37, p. 554–559.

Arunachalam, K.; Sathyanarayanan, K.; Darshan, B.; Raja, R. (2010) Studies on the characterisation of Biosealant properties of *Bacillus sphaericus*. *International Journal Engineering Science and Technology*, Vol. 2, Nº 3, p. 270–277.

Bang, S.; Galimat, J.; Ramakrishan, V. (2001) Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 28, p. 404–409.

Bai, J. Durability of sustainable concrete materials. In: Khatib J (ed) *Sustainability of construction materials*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 239–253.

Boh, B.; Šumiga, B. (2008) Microencapsulation technology and its applications in building construction materials. *Materials Geoenvironment*, Vol. 55, Nº 3, p. 329–344.

Chahal, N.; Siddique, R.; Rajor A. (2012) Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 28, p. 351–356.

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

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

De Muynck, W.; Debrouwer, D.; De Belie, N.; Verstraete, W. (2008b) Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, p. 1005–1014.

De Rooij, M.; Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Schlangen, E. (2011) Self-healing phenomena in cement-based materials. Draft of State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221–SHC.

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

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

Ghosh, S. *Functional coatings and microencapsulation: a general perspective*. Functional Coatings. Germany:Wiley-VCH; 2006, p. 1–27. ISBN-10 3-527-31296-X.

Ghosh, S.; Biswas, M.; Chattopadhyay, B.; Mandal, S. (2009) Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, p. 93–98.

Gollapudi, U.; Knutson, C.; Bang, S.; Islam, M. (1995) A new method for controlling leaching through permeable channels. *Chemosphere*, Vol. 30, p. 695–705.

Hager, M. D.; Greil, P.; Leyens, C.; van der Zwaag, S.; Schubert, U. S. (2010) Self-Healing Materials. *Advanced Materials*, Vol. 22, p. 5424–5430.

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

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

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

Kan, LL.; Shi, HS.; Sakulich, A.; Li, V. (2010) Self-healing characterization of engineered cementitious composite material. *ACI Materials Journal*, Vol. 107, N° 6, p. 617–624.

Lepech, M.; Li, V. (2006) Long term durability performance of engineered cementitious composites. *Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*, Vol. 12, N° 2, p. 119–132.

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

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

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

Li, V.; Lepech, M.; Wang, S.; Weimann, M.; Keoleian, G. (2004) Development of green engineered cementitious composites for sustainable infrastructure systems. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, p. 181–191.

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

Li, P.; Qu, W. (2012) Microbial carbonate mineralization as an improvement method for durability of concrete structures. *Advanced Materials Research*, Vol. 365, p. 280–286.

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

Naaman, A.; Reinhardt, H. Setting the stage: toward performance-based classification of FRC composites. In: *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4)*. Proceedings of the 4th int'l RILEM workshop. Published by RILEM S.A.R.L; 2003, p. 1–4.

Nishiwaki, T.; Mihashi, H.; Jang, B. K.; Miura, K. (2006) Development of self-healing system for concrete with selective heating around crack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, Nº 2, p. 267-275.

Okwadha, G.; Li, J. (2011) Biocontainment of polychlorinated biphenyls (PCBs) on flat concrete surfaces by microbial carbonate precipitation. *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, p. 2860–2864.

Pacheco-Torgal, F. (2012a) Materiais bio-inspirados: Utilizando a biotecnologia para aumentar a durabilidade do betão. *Revista Maquinaria*, Nº 226, p. 56–62.

Pacheco-Torgal, F. (2012b) Execução e reparação de infra-estruturas com recurso a betões correntes ou o barato sai caro (em termos económicos e ambientais). *Revista Maquinaria* Nº 227, p. 56–62.

Pacheco-Torgal, F. (2013) Betões com capacidade de auto-reparação: Um contributo para a redução de custos de infra-estruturas. *Revista Maquinaria*, Nº 231, p. 56–62.

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

Pang, J.; Bond, I. (2005a) ‘Bleeding composites’ – damage detection and self-repair using a biomimetic approach. *Composites: Part A* 36, p. 183–188.

Pang, J.; Bond, I. (2005) A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility. *Composites Science and Technology*, Vol. 65, p. 1791–1799.

Qian, S.; Zhou, J.; De Rooij, M.; Schlangen, E.; Ye, G.; Van Breugel, K. (2009) Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, p. 613–621.

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

Reddy, S.; Rao, M.; Aparna, P.; Sasikala, C. (2010) Performance of standard grade bacterial (*Bacillus subtilis*) concrete. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, Vol. 11, p. 43–55.

Sahmaran, M.; Li, M.; Li, V. (2007) Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Materials Journal*, Vol. 104, N° 6, p. 604–611.

Sauer, J.; Xalter, S.; Fischer, O.; Freudenstein, S. A holistic life-cycle approach for traffic infrastructure. *Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems*-Strauss, Frangopol and Bergmeister, Taylor & Francis, London; 2013, p. 216.

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

Sisomphon, K.; Copuroglu, O.; Koenders, E. (2012) Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, p. 566–574.

Thao, T.; Johnson, T.; Tong, Q.; Dai, P. (2009) Implementation of self-healing in concrete – proof of concept. *The IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*, Vol. 2, N° 2, p. 116–125.

Thoft-Christensen, P. (2012) Infrastructures and life-cycle cost-benefit analysis. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 8, N° 5, p. 507–516.

Van Der Zwaag, S. In *Self Healing Materials – an alternative approach to 20 centuries materials science*, (Eds: S. van der Zwaag), Springer, Dordrecht, The Netherlands; 2007, Chapter 1.

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

Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; De Muynck, W.; Verstraete, W. (2010) Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, p. 157–166.

Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Van Loo, D.; Jacobs, P. (2011) Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 33, p. 497–505.

Wang, J.; De Belie, N.; Verstraete, W. (2012a) Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, Vol. 39, p. 567–577.

Wang, J.; Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Verstraete, W. (2012b) Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 26, p. 532–540.

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

Wiktor, V.; Jonkers, H. (2011) Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 33, p. 763–770.

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

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

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

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

Zhu, Y.; Yang, Y.; Yao, Y. (2012) Autogenous self-healing of engineered cementitious composites under freeze–thaw cycles. *Construction and Building Materials*, Vol. 34, p. 522–530.