

# MAQUINARIA

30 ANOS • 30 YEARS

Edição nº 231 • Maio/Junho 2013 • € 3,50



## Angola

Programas de reconstrução e desenvolvimento fortalecem a atractividade do país

## Elevação

Autogrua Liebherr LTM 1750-9.1 (750 t)

Grua com rastros LTR 1220 (220 t)

### A REPORTS

Caterpillar renova gama de pás carregadoras

### B MUNDO EM CONSTRUÇÃO

Projectos, Iniciativas e Mercados

### C MÁQUINAS

Lançamentos, Tecnologia e Inovação

### D EMPRESAS E NEGÓCIOS

Mundimáquinas tem novas instalações em Luanda;

Coroas dentadas segmentadas da SEW;

Doka apresenta novos sistemas construtivos;

### E ENGENHARIA

Betões com capacidade de auto-reparação

por F. Pacheco Torgal

**bolina**  
GRUPO EDITORIAL  
PORTUGAL - BRASIL - ESPANHA



## SÉRIE K DE CARREGADORAS DE RODAS CAT®

Conheça as carregadoras de rodas Cat 966K, 972K e 980K  
Veja a produtividade em ação.

Conheça melhor este e outros equipamentos. Consulte-nos!



# Betões com capacidade de auto-reparação: Um contributo para a redução de custos de infra-estruturas

A degradação de infra-estruturas é actualmente um tema de importância primordial, quer pelos astronómicos custos envolvidos na sua futura reparação e reabilitação, quer também pelas gravosas consequências sociais e económicas associadas à eventual utilização condicionada dessas infra-estruturas aquando da execução das obras de reparação e reabilitação. As investigações sobre materiais que permitam minimizar os problemas referidos, como seja o caso de materiais com capacidade de auto-reparação, assumem no presente contexto um particular interesse a que importa dar o devido destaque. O presente artigo aborda o caso dos betões com capacidade auto-reparação nas suas diversas variantes.

Por F. Pacheco Torgal  
Investigador da Unidade C-TAC, Grupo de Construção  
Sustentável, Universidade do Minho

## Introdução

De acordo com a Academia de Engenharia dos EUA a degradação de infra-estruturas é um dos grandes desafios do século XXI. 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 infra-estruturas ascendam a 1.6 triliões de dólares. Na Europa o panorama não é mais animador pois 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 [1]. Por outro lado, quando tais obras incidem em infra-estruturas viárias isso pode traduzir-se em consequências de relevo no fluxo de tráfego os quais se resultam 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 [2]. Pelo que, como defendem vários autores [3,4], só uma avaliação ao longo do ciclo de vida da infra-estrutura que inclua todos os custos acima referidos pode permitir contabilizar devidamente os reais impactos da mesma e assim se poder no futuro vir a obter infra-estruturas sustentáveis. Os materiais utilizados em tais infra-estruturas, que tenham capacidade de auto-reparação, assumem neste contexto importância fulcral pois permitem ao longo da vida útil da infra-estrutura reduzir custos. A capacidade dos compósitos cimentícios conseguirem “reparar” as suas próprias fissuras é um fenómeno descoberto há várias décadas atrás, contudo só em 2005 a International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM) criou um comité com o objectivo

de estudar esse fenómeno. A designação “betões com capacidade auto-reparação” utiliza-se neste artigo apenas para facilitar a leitura do mesmo pois na realidade esta terminologia é passível de alguma discussão havendo por exemplo necessidade de distinguir o refecimento das fissuras (self-closing) da restauração das propriedades originais (self-healing) conforme estabelece a classificação do RILEM [5] a qual por sua vez é distinta da preconizada pelo Japan Concrete Institute-JCI ou da proposta por Mihashi e Nishiwaki [6].

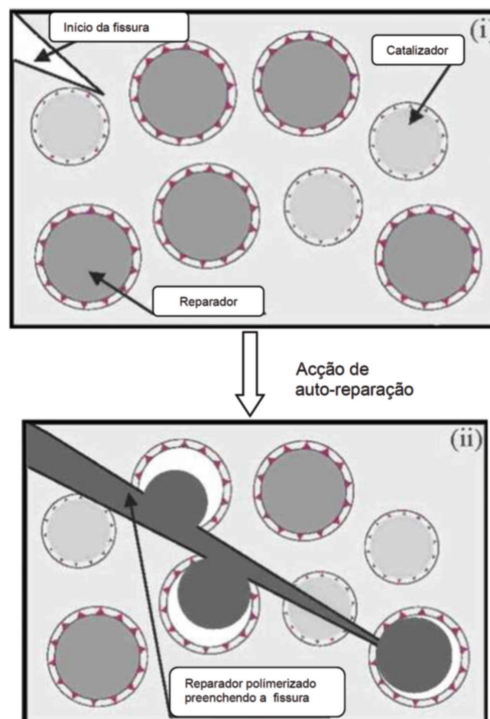
## Auto-reparação com recurso à utilização de cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos

Uma das variantes da auto-reparação faz uso de cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos, as quais libertam o seu conteúdo que preenche as fissuras originadas no betão por retracção ou

por acções externas. Yang et al. [7] estudaram o desempenho de compósitos cimentícios reforçados com micro-fibras de carbono contendo dois tipos de cápsulas, umas contendo um catalisador e outras contendo um reparador (Fig.1). Os resultados obtidos em compósitos cimentícios submetidos a um esforço de compressão inferior a 80% da resistência máxima apontam para uma redução de quase 70% da permeabilidade aos 30 dias. Os resultados mostraram ainda que a utilização das cápsulas se traduziu num aumento da tenacidade. Van Tittelboom et al. [8] comprovaram o aumento da resistência mecânica e uma redução da permeabilidade em betões fissurados devido à auto-reparação associada à utilização de fibras ocas contendo um agente químico bicomponente (poliuretano e um acelerador) com uma elevada capacidade expansiva. Estes autores referem ainda que no caso das fibras com um diâmetro de apenas 2mm as forças capilares impediram a libertação de uma quantidade significativa de agente químico. Este facto que já tinha sido confirmado anteriormente por outros autores Joseph [9] constitui-se como uma desvantagem da utilização de fibras ocas de diâmetros reduzidos. 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 contribuirão dessa forma para uma redução da resistência mecânica dos betões. 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. Significa isto que, muito embora nos últimos anos a tecnologia de auto-reparação de betões com cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos tenha sido objecto de investigações muito promissoras, ainda não atingiu no entanto uma fase de amadurecimento que permita a sua utilização efectiva e imediata pela indústria da construção.

### Auto-reparação por hidratação posterior

Uma outra variante diz respeito à auto-reparação autónoma (autogenous self-healing) dos próprios betões. Como estes contêm no seu interior partículas de cimento não hidratadas que regra geral estão distribuídas de forma quase uniforme (mais nos betões de baixa



**Figura 1:**

Esquema da 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 propagação da fissura quebra as cápsulas cujo conteúdo irá polimerizar levando ao preenchimento da mesma [7]

razão água/cimento) a sua hidratação posterior poderá servir para reduzir fissuras entretanto formadas. Alguns autores defendem que esta variante é mais vantajosa do que a anterior porquanto é mais económica e mais eficaz [10]. De acordo com Edvardsen [11] a cristalização do carbonato de cálcio no interior da fissura é o mecanismo principal de auto-reparação autónoma. Como desvantagem mais evidente a acção da auto-reparação autónoma está limitada a fissuras com uma largura reduzida. Li e Yang [12] referem ser possível o preenchimento total de fissuras desde que a sua largura não ultrapasse 50µm. Contudo investigações mais recentes utilizando um aditivo expansivo à base de sulfoaluminato de cálcio comprovam ser possível preencher na totalidade fissuras com uma largura entre 250 µm a 400µm. Sisomphon et al. [13]. Outras investigações mostram 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 [6]. Investigações recentes analisaram a influência da utilização de diferentes tipos de fibras sintéticas na capacidade de auto-reparação do betão tendo constatado que as fibras com uma elevada electronegatividade (capacidade de atrair electrões) como as de PVA são mais capazes de atrair iões  $Ca^{2+}$  e logo apresentam maior potencial para funcionar como núcleos de precipitação de carbonato de cálcio ao contrário por exemplo das fibras de polipropileno cuja capacidade de atracção iónica é nula [14].

### O caso dos betões de ductilidade ultra-elevada (ECC)

Os betões de ductilidade ultra-elevada 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%. Enquanto os betões correntes são caracterizados por uma extensão (em tracção) de 0.01% os betões de ductilidade ultra-elevada podem apresentar extensões entre 3 a 5%, o que representa um



**Figura 2:**

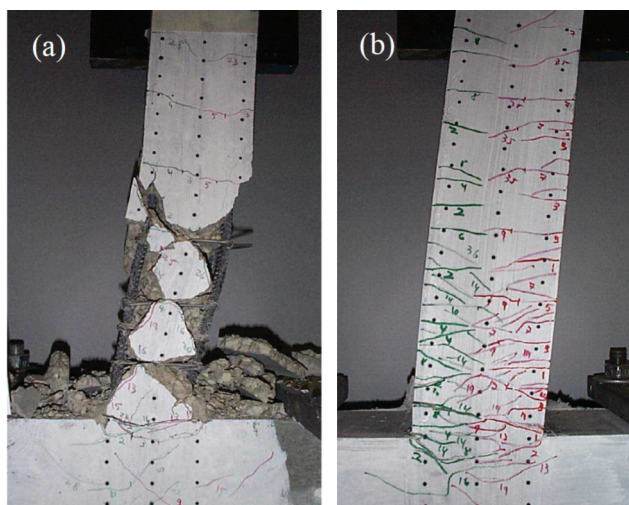
Desempenho de material ECC quando submetido a ensaio de flexão [15]

aumento de várias centenas de vezes em relação aos betões correntes. Tal permite explicar a sua ductilidade ultra-elevada devida a uma invulgar capacidade para uma elevada redistribuição de tensões a nível interno (Li, 2012). Esta característica está na origem do facto destes materiais serem também designados por betões dobráveis ou de elevada flexibilidade a qual é bem evidente na Fig 2.

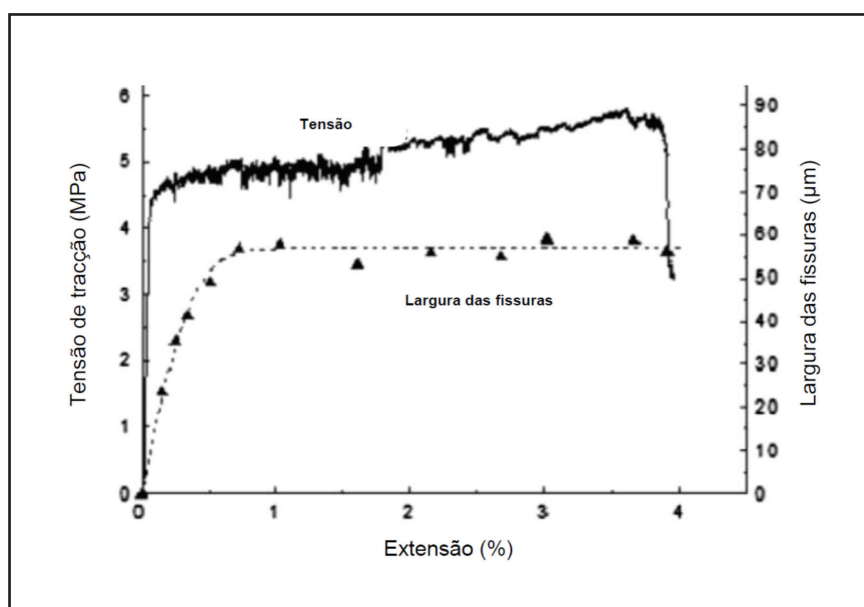
A Fig.3 compara o desempenho de um pilar de betão corrente (a) com um pilar de betão de ductilidade ultra- elevada (b) quando sujeitos a uma acção mecânica horizontal similar à acção sísmica. É evidente que o desempenho do pilar de betão de ductilidade ultra- elevada é claramente superior ao do betão corrente o qual não consegue sequer manter a sua capacidade resistente inicial devido à perda/saída de uma parte substancial do betão (spalling).

A elevada ductilidade destes materiais torna-os especialmente indicados para a construção de infra-estruturas em zonas de elevada sismicidade como também para a reparação de infra-estruturas. Estes materiais apresentam além disso uma elevada capacidade de auto-reparação pelo facto de conseguirem impedir que as fissuras não excedam 60µm mesmo no caso de elevadas deformações (Fig.4).

Afim de reduzir o consumo de cimento Portland e por essa via o impacto ambiental dos betões de ductilidade ultra-elevada com elevada Li et al. [17] analisaram o desempenho de misturas com elevada incorporação de cinzas volantes tendo comprovado ser possível desenvolver betões que compatibilizam preocupações ambientais e de elevado desempenho (Tabela 1).



**Figura 3:** Pilares de betão após ensaio mecânico correspondente a um deslocamento de 10%:  
a) betões correntes com armaduras principais e secundárias;  
b) betões de ductilidade ultra- elevada sem estribos [15]



**Figura 4:** Curva tensão de tracção-extensão e evolução da largura de fendas para um ECC [16]

**Tabela 1:** Composição de vários betões (kg/m<sup>3</sup>) de ductilidade ultra-elevada [17]

	ECC R0	ECC G0	ECC G2	ECC G3
Cimento	838	583	318	318
Cinzas volantes	-	700 (classe F)	700 (classe F)	191 (classe C, 2 µm) 250 (classe F, 13 µm) 250 (cinzas de fundo, 50µm)
Agregados	838	467	701	701
Fibras PVA	26	26	26	26
Água	366	298	289	289
Super plastificante	17	19	19	19
Agente de viscosidade	1.26	0.16	0.16	0.16
fcd	42.0 MPa	68.0 MPa	38,6 MPa	36,5 MPa
CO2 (g/L)	957.8	702.5	440.7	440.7

No que se refere à durabilidade destes materiais alguns investigadores [18] estudaram a capacidade de auto-reparação de ECC após terem sido submetidos a ciclos de molhagem e secagem referindo que os mesmos conseguem recuperar quase 100% da ductilidade inicial. Li [15] refere a utilização de betões de ductilidade ultra-elevada na reparação/substituição de uma junta de expansão de uma

ponte em 2005 que não teve até à data necessidade de obras posteriores o que é bastante significativo atendendo ao facto das juntas de expansão usualmente necessitarem de obras de reparação. Embora o custo inicial dos betão de ductilidade ultra-elevada seja superior ao dos betões correntes é possível comprovar que uma análise de custos relativamente ao ciclo de vida de uma infra-estrutura viária

para os dois materiais é mais vantajosa quando se utilizam os primeiros por via dum durabilidade superior e consequentemente uma menor necessidade de obras de conservação e manutenção [19]. Investigações mais recentes dos mesmos autores sobre ECC com a incorporação de resíduos industriais excedendo 70% em volume confirmam um elevado desempenho ambiental e económico destes materiais [20].

## AUTOR



### F. Pacheco Torgal

✉ [torgal@civil.uminho.pt](mailto:torgal@civil.uminho.pt)

Engenheiro Civil Sénior, investigador do Grupo de Construção Sustentável da Unidade C-TAC da Universidade do Minho. Autor e co-autor de 230 publicações em revistas e conferências, onde se incluem 65 publicações referenciadas na ISI Web of Knowledge, a principal base de dados científica a nível mundial. 38 artigos foram publicados em revistas ISI-A1. Revisor convidado em aproximadamente quatro dezenas de revistas internacionais.

<http://www.degois.pt/visualizador/curriculum.jsp?key=1300794898489491>

## REFERÊNCIAS

- [1] Yan, L.; Chouh, N. (2012) Behavior and analytical modeling of natural flax fibre reinforced polymer tube confined plain concrete and coir fibre reinforced concrete. *Journal of Composite Materials* (in press)
- [2] Report (2012) A new economic analysis of infrastructure investment. Prepared by the department of the Treasury with the council of economic advisers. <http://www.treasury.gov/resource-center/economic-policy/Documents/20120323InfrastructureReport.pdf>
- [3] Thoft-Christensen, P. (2012) Infrastructures and life-cycle cost-benefit analysis. *Structure and Infrastructure Engineering* 8 (5), pp. 507-516
- [4] Sauer, J.; Xalter, S.; Fischer, O.; Freudenstein, S. (2013) A holistic life-cycle approach for traffic infrastructure. P.216. *Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems*-Strauss, Frangopol and Bergmeister, Taylor & Francis, London.
- [5] De Rooij, M.; Schlangen, E. (eds) (2011) Self-healing phenomena in cement-based materials. Draft of State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC.
- [6] Mihashi, H.; Nishiwaki, T. (2012) Development of engineered self-healing and self-repairing concrete- State-of-the-Art Report. *Journal of Advanced Concrete Technology* 10, 170-184.
- [7] Yang, Z.; Hollar, J.; He, X.; Shi, X. (2011) A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. *Cement & Concrete Composites* 33, 506-512.
- [8] 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* 33, 497-505.
- [9] Joseph C, Jefferson AD, Canoni MB. (2007) Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials. In: *Proceedings of the first international conference on self-healing materials*; 2007. p. 1-8
- [10] Zhu, Y.; Yang, Y.; Yao, Y. (2012) Autogenous self-healing of engineered cementitious composites under freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials* 34, 522-530.
- [11] Edvardsen, C. (1999) Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Material Journal* 96, 448-454.
- [12] Li VC, Yang EH. (2007) Self-healing in concrete materials. In: *Self-healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science*; p. 161-93.
- [13] Sisomphon, K.; Copuroglu, O.; Koenders, E. (2012) Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *Cement & Concrete Composites* 34, 566-574.
- [14] Nishiwaki, T.; Koda, M.; Yamada, M.; Mihashi, H.; Kikuta, T. (2012) Experimental study on self-healing capability of FRCC using different types of synthetic fibers. *Journal of Advanced Concrete Technology* 10, 195-206.
- [15] Li, V. (2012) Can Concrete Be Bendable? *American Scientist* 10, 484-493.
- [16] Kan LL, Shi HS, Sakulich AR, Li VC. Self-healing characterization of engineered cementitious composite material. *ACI Mater J* 2010;6(107):617-24.
- [17] 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* 181-191.
- [18] Yang Y, Lepech MD, Yang E, Li VC. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cem Concr Res* 2009;39: 382-90.
- [19] Lepech, M.; Li, V. (2006) Long term durability performance of engineered cementitious composites. *Bauinstandsetzen und Bau denkmalpflege*. 12 (2) 119-132.
- [20] Lepech, M.; Li, V. (2010) Sustainable pavement overlays using Engineered Cementitious Composites. *International Journal of Pavement Research and Technology* 3 (5), pp. 241-250.