

Tema 1 – Tecnologia dos Materiais

**BETÕES ECO-EFICIENTES COM CAPACIDADE SENSORA:
ESTADO DA ARTE E NECESSIDADES DE INVESTIGAÇÃO***Eco-concretes with sensing ability: State-of-the-art and research needs***Fernando Torgal**

Doutor, Investigador

Un. Investigação C-TAC Univ. do Minho

torgal@civil.uminho.pt**Said Jalali**

Doutor, Prof. Catedrático

Dep. de Engenharia Civil Univ. do Minho

said@civil.uminho.pt**Resumo**

Os betões eco-eficientes com capacidade sensora, congregam simultaneamente as características de sustentabilidade dos betões com incorporação de resíduos e ao mesmo tempo possuem capacidade sensora apresentando um comportamento “inteligente”. As funções “inteligentes” destes materiais incluem, monitorização da deformação, (para controlo da vibração estrutural), monitorização de danos (para controlo da integridade estrutural), monitorização da temperatura, interferência electromagnética, auto-aquecimento (para evitar fenómenos de congelamento) e protecção catódica no sentido de impedir a corrosão de armaduras. O presente artigo sintetiza uma revisão da literatura sobre estes materiais, perspectivando questões que deverão ser objecto de investigações futuras.

Palavras-chave: Betões, eco-eficientes, capacidade sensora, comportamento inteligente

Abstract

Eco-friendly smart concrete combine the sustainable characteristics of waste based concrete and at the same time possess a sensing ability acting as “intelligent” materials. The smart functions of these new materials may include strain sensing (for structural vibration control or traffic monitoring), damage sensing (for structural health monitoring), temperature sensing, electromagnetic interference shielding, self-heating (by heating to prevent freezing) and cathodic protection in order to avoid reinforcement corrosion. The current manuscript presents a literature review about these materials. Topics for future investigations in this field are suggested.

Keywords: Concretes, eco-friendly, sensing ability, intelligent behaviour

1 Introdução

A deterioração precoce das estruturas de betão armado à base de cimento portland, é um fenómeno muito mais vulgar do que seria expectável aquando da sua execução. São aliás inúmeros os casos relatados na literatura da especialidade sobre ocorrências relacionadas com a degradação de estruturas de betão. É conhecido um caso de deterioração de estacas 12 anos após a sua construção e também um caso de um túnel no Dubai que concluído em 1975, teve de ser completamente reparado em 1986 [1]. Um estudo sobre pontes construídas na Noruega após 1970 em que 25% apresentavam deterioração por corrosão de armaduras. Outros estudos indicam que 40% das cerca de 600.000 pontes existentes nos Estados Unidos estariam afectadas pela corrosão, com um custo de reparação de aproximadamente 50.000 milhões de dólares [3]. Para além dos problemas de durabilidade do betão, relacionados com deficiências de betonagem e cura, na verdade a vulnerabilidade deste material fica a dever muito ao próprio material ligante (cimento portland), que apresenta uma elevada quantidade de cal, facilmente susceptível de ataque químico, situação agravada pela incapacidade do cimento portland em conseguir uma boa aderência aos agregados o que induz níveis de permeabilidade relativamente elevados, facilitando o ingresso de água, gases e substâncias agressivas, que provocam fenómenos de carbonatação e de corrosão das armaduras. O aumento da população mundial, (até ao ano 2030 espera-se que aumente mais de 2000 milhões de pessoas) e as necessidades implícitas em termos de construção de edifícios e outras infra-estruturas, agravará ainda mais o consumo deste material e tornará mais premente a questão da sua baixa durabilidade. A ausência de inspecções regulares ao estado de conservação das estruturas em betão, contribui para agravar o problema da sua degradação precoce, porquanto se constitui como um factor potenciador de desastres com as inevitáveis perdas de vidas humanas. Este problema é especialmente grave, nos países como Portugal onde por vários motivos, é notória uma cultura quase institucional de um certo desleixo em termos de inspecção e conservação de estruturas, a qual só excepcionalmente interrompida aquando da ocorrência de desastres que marcam a agenda mediática. A título de exemplo, note-se que já depois da tragédia da queda da ponte Entre-os-Rios, entre 2002 e 2006, as Estradas de Portugal (EP), realizaram um conjunto de inspecções com o objectivo de detectar a necessidade de trabalhos de reparação, reabilitação ou substituição, tendo essa necessidade sido observada em 147 obras de arte. Como parte deste problema, tem que ver com os elevados montantes necessários para as operações de inspecção das estruturas, adquirem por isso carácter quase fundamental as investigações acerca do desenvolvimento de materiais multi-funcionais que actuam como sensores e possam monitorizar em tempo real o comportamento das estruturas de betão, mais ainda que tenham capacidade para reagir de forma inteligente e autónoma impedindo o congelamento daquele material ou dando início a uma corrente eléctrica que através do fenómeno da protecção catódica impedirá a corrosão das armaduras.

2 Estado da Arte

As condicionantes associadas ao desenvolvimento sustentável, levaram já ao aparecimento de betões de cariz eco-eficiente, cuja composição passa pela utilização de elevadas percentagens de sub-produtos industriais como as escórias de alto forno, as cinzas volantes, as sílicas de fumo e o metacaulino [4-6]. Os betões eco-eficientes possuem ainda a dupla vantagem de apresentarem uma durabilidade superior à dos betões correntes [7], facto este que se repercute positivamente em termos ambientais, já que aumentarmos a vida útil de uma estrutura de betão de 50 para 100 anos, o seu impacto ambiental decresce 10 vezes. Apesar disso, o futuro exige novas e continuadas investigações que consigam aumentar a sustentabilidade deste material [8]. As investigações acerca dos compósitos de betão reforçados com fibras (FRC) mostram que estes materiais possuem relativamente aos betões correntes, maior resistência à tracção e à flexão, menor retracção e um melhor desempenho em termos de resistência a ciclos de gelo-degelo [9-12]. Como estes betões, podem ainda em determinadas situações dispensar a utilização de armaduras de aço, poderão dessa forma estar isentos de problemas relacionados com a corrosão daquelas. A incorporação de fibras no betão é no entanto acompanhada de um efeito negativo associado ao aumento do teor de ar, o qual se traduz numa ligeira redução da resistência à compressão daquele material [13]. A

introdução de fibras é também responsável por uma redução na trabalhabilidade do betão, contudo investigações recentes mostram que este problema pode ser ultrapassado com a adição de superplastificantes e latex. A análise do estado da arte destes materiais revela que muito embora as propriedades mecânicas de curto prazo destes materiais estejam bem estudadas, há ainda muitas questões em aberto sobre a durabilidade dos FRC. Relativamente aos betões reforçados com fibras metálicas (SFRC), existe abundante investigação sobre o seu desempenho mecânico, mas muito pouco foi levado a cabo sobre a sua capacidade multifuncional e inteligente. Um dos aspectos fundamentais das estruturas inteligentes é a sua capacidade sensora. Uma estrutura inteligente caracteriza-se por sentir determinados estímulos e ser capaz de responder a esses estímulos de forma apropriada. Os compósitos estruturais que tem a capacidade de agir como sensores são designados como materiais multi-funcionais [14]. Até ao presente momento as actividades de monitorização das estruturas de betão requerem o uso de vários equipamentos que estão embebidos dentro do betão ou colados à sua superfície exterior (Figura 1).

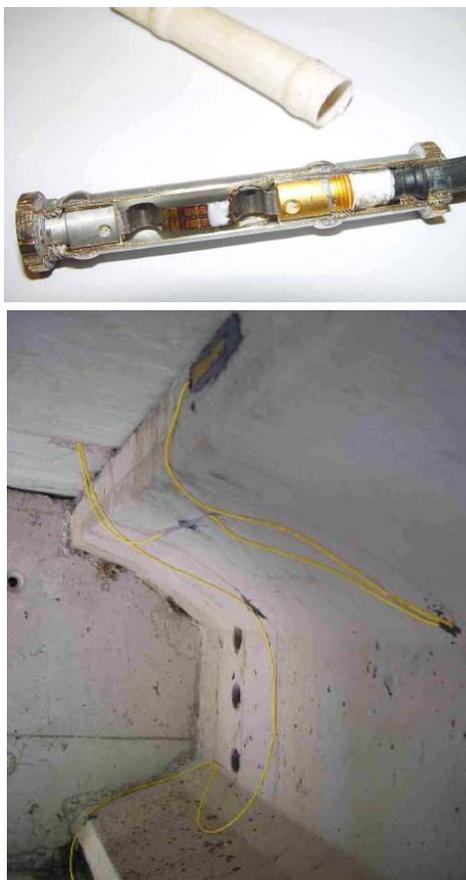


Fig.1 – a) Extensómetro para medir deformações no betão; b) colagem de extensómetros em viga de betão.

Estes procedimentos são relativamente dispendiosos e no caso dos dispositivos embebidos no interior do betão, podem ser responsáveis por uma redução nas propriedades e da degradação precoce daquele material. Os materiais compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras de carbono, tem vindo a

ganhar terreno por um lado devido à baixa do custo das fibras de carbono e por outro às capacidades sensoras das estruturas executadas com betões reforçados com fibras de carbono (CFRC). A capacidade sensora destes materiais está directamente relacionada com a condutividade eléctrica das fibras de carbono. As matrizes cimentícias com 28 dias de idade, possuem para uma temperatura ambiente de 20 °C, uma resistividade eléctrica de 5000 Ω .m para uma corrente continua DC. A adição de fibras curtas de carbono (5mm) numa percentagem de 0,5% da massa de cimento, provoca uma redução da resistividade para 200 Ω .m em betões reforçados com aquelas fibras e aditivados com sílicas de fumo, as quais conseguem promover a dispersão das fibras [15]. A resistividade eléctrica dos betões reforçados com fibras de carbono é influenciada quer pelo volume e dimensão das fibras mas também pelo grau de saturação da pasta de cimento. [16, 17]. Para os CFRC a resistividade eléctrica aumenta com as tensões de tracção e decresce com as de compressão (piezoresistividade). A explicação para este fenómeno tem que ver com o facto das tensões gerarem a abertura de microfissuras o que leva a um aumento da resistividade destes betões. Desta forma os CFRC possuem características para serem utilizados como sensores de deformação [18]. As aplicações para a piezoresistividade incluem pesagem, controlo de tráfego, gestão de cargas em edifícios, controlo de vibração estrutural e de segurança de edifícios. Permite ainda o controlo do grau de ocupação humana de áreas habitacionais e outras, interagindo em termos de respostas condicionadas ao nível da iluminação, aquecimento/arrefecimento e ventilação. Os betões reforçados com fibras de carbono podem ainda ser utilizados para aferir o grau de degradação destes materiais [19, 20]. Capacidades que permitem igualmente um controlo contínuo da evolução dessa mesma degradação [21]. Esta monitorização da integridade da estrutura em tempo real é aliás crucial para evitar o colapso estrutural, como aqueles que tiveram lugar num passado pouco longínquo em Portugal (Figura 2).



Figura 2 – Ponte Entre-os-Rios (Portugal-2001)

Como a resistividade eléctrica decresce com a subida da temperatura dos betões reforçados com fibras de carbono, estes materiais podem funcionar como sensores de temperatura, fornecendo informação em tempo real sobre esta variável, o que também poderá servir para a eventual detecção de incêndios [15]. Algumas investigações sobre a viabilidade da utilização de termopares de natureza cimentícia foram já levadas a cabo [22], contudo permanece ainda uma questão em aberto se o desempenho destas é similar aos termopares clássicos. Uma outra aplicação inteligente para estes materiais, passa pela utilização da informação relativa à temperatura, para desencadear respostas pré-condicionadas que iniciem o

aquecimento dos betões reforçados com fibras de carbono para evitar o congelamento destes materiais, dessa forma dispensando outras medidas para evitar o congelamento ou de remoção de gelo. Como os CFRC tem capacidade para actuar como condutores eléctricos, apresentam também a vantagem de poderem comportar-se como pára-raios, conduzindo as descargas eléctricas directamente à terra. A capacidade de reflexão de ondas destes materiais, permite-lhes um uso associado à interferência electromagnética, particularmente útil na construção de edifícios (centros de detenção) ou de salas de aula e de anfiteatros para conferências ou cinemas, onde não se torna impossível a recepção de chamadas de telemóvel. Investigações realizadas em compósitos de betão com 1,5% de fibras (por massa de cimento), revelam um efeito de interferência de 40 dB at 1 Ghz [23]. Alguns investigadores comprovam que devido ao seu baixo diâmetro e ao efeito de pele associado, as nanofibras de carbono são mais indicadas para este fins de interferência electromagnética do que as fibras clássicas [24]. Uma das aplicações fundamentais dos compósitos de betão inteligentes está relacionada com o controlo da corrosão das armaduras de aço através da protecção catódica. Trata-se de uma técnica de protecção electroquímica, que requer a aplicação de uma corrente eléctrica a qual força os electrões a aproximarem-se da armadura tornando-a um cátodo e assim impedindo as reacções anódicas responsáveis pela dissolução do aço. Embora o betão corrente seja um fraco condutor eléctrico, a inclusão das fibras de carbono facilita a aplicação da protecção catódica. A utilização de betões reforçados com fibras de carbono em conjunção com a adição de sílicas de fumo, permite reduzir a voltagem necessária para a protecção catódica em 28%, comparativamente aos betões sem aquelas fibras [25]. Na unidade de investigação C-TAC (Secção de construção sustentável) da Universidade do Minho, têm aliás sido levadas a cabo algumas investigações sobre o desempenho de materiais sensores. Silva [26] analisou a viabilidade do desenvolvimento de um sensor de baixo custo, desenvolvido a partir de um polímero reforçado com fibras de carbono. Tendo o mesmo demonstrado aptidão para a medição dos assentamentos dos solos ocorridos sob a fundação directa de estruturas. Mais recentemente, Gonzalez [27] estudou as propriedades mecânicas e físicas de betões reforçados com fibras de carbono, tendo confirmado resultados de outros autores sobre a influência da temperatura do betão na resistência eléctrica deste material, facto de relevo na avaliação da capacidade sensora do betão. Observou também que betões contendo 1% de fibras longas (6 mm) de carbono, apresentam potencial para serem utilizados como sensores do comportamento de estruturas.

2 Necessidades de investigação

Resulta evidente da síntese precedente, que se tornam prementes investigações acerca do desenvolvimento de compósitos de betão, inteligentes e eco-eficientes, os quais possuam elevada durabilidade, um baixo impacto ambiental e ao mesmo tempo tenham capacidade para actuarem como materiais sensores. Como a presença de agregados e de aditivos como o látex ou as sílicas de fumo, também influenciam as propriedades dos CFRC tornam-se necessárias novas investigações afim de melhor se perceber os efeitos combinados destas variáveis na resistividade eléctrica dos betões reforçados com fibras de carbono. Uma outra forma de usar os CFRC, para tentar solucionar o problema da corrosão das armaduras passa, pela avaliação da presença de cloretos no interior do betão através da monitorização da resistividade eléctrica, iniciando a aplicação de uma corrente eléctrica que evite a aproximação entre os cloretos e as armaduras, quando essa presença atinja um determinado nível crítico. Esta técnica, nunca foi testada antes, justificando investigações sobre a sua viabilidade. Os betões inteligentes de CFRC podem também ser usados na reabilitação de estruturas degradadas, sendo previsível que em face do seu baixo nível de retração apresentem uma boa aderência aos betões antigos, importa por isso clarificar não só este aspecto, mas também em que condições é que as operações de reparação podem conferir capacidades multi-funcionais à estrutura objecto de reparação.

Referências

- [1] Mehta, P.K. *Concrete in marine environment*. Elsevier Science Publishers, New York USA, 1991.
- [2] Gjorv, O.E. *Steel corrosion in concrete structures exposed to Norwegian marine environment*. ACI Concrete International, 1994, pp.35-39.

- [3] Ferreira, Rui M. *Ensaio de caracterização da durabilidade do betão*. Tese de Mestrado. Universidade do Minho, 2000.
- [4] Aitcin, P.C. *Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow*. Cement and Concrete Research 30, 2000, pp.1349-1359.
- [5] Swamy, R.N. *Sustainable concrete for infrastructure regeneration and reconstruction. Sustainable construction into the Next Millennium environmentally friendly and innovative cement based materials*. In Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction into the next Millennium, Friendly and Innovative Cement Based Materials. N.P. Barbosa and R.N. Swamy Editors Brazil, 2000.
- [6] Mehta, K. *High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development*. International workshop on sustainable development and concrete technology, 2001, pp.4-14.
- [7] Metha, P.K. *Reducing the environment impact of concrete. Concrete can be durable and environmentally friendly*. Concrete International, Vol.10, 2001.
- [8] Damtoft, J.; Lukasik, J.; Herfort, D.; Sorrentino, D.; Gartner, E. *Sustainable development and climate change initiatives*. Cement and Concrete Research, Vol. 38, 2008, pp.115-127.
- [9] Pigeon, M.; Azzabi, M.; Pleau, R. *Can microfibers prevent frost damage?* Cement and Concrete Research, Vol. 26, 1996, pp.1163-1170.
- [10] Pigeon, M.; Pleau, R. Azzabi, M.; Banthia, N. *Durability of microfiber-reinforced mortars*. Cement and Concrete Research, Vol. 26, 1996, pp.1163-1170.
- [11] Banthia, N.; Sheng, J. *Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites*. Cement and Concrete Composites, Vol. 18, 1996, pp.215-269.
- [12] Seung Bum Park, Bertrand I. Lee *Mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polymer-impregnated cement composites*. Cement and Concrete Composites, Vol. 15, 1993, pp.153-163.
- [13] Balaguru, P.; Khajuria, A. *Properties of Polymeric Fiber-Reinforced Concrete*. Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1532, 1996, pp. 27-35.
- [14] Chung, D. *Cement-matrix composites for smart structures*. Smart Mater. Struct., 2000, pp.389-401.
- [15] Chung, D. *Electric conduction behavior of cement-matrix composites*. Journal of Materials Engineering and Performance Vol. 11, 2002, pp.194-204.
- [16] Wen, S.; Chung, D. *Effect of carbon fiber grade on electrical behavior of carbon-fiber reinforced cement*. Carbon Vol. 39, 2001, pp.369-373.
- [17] Chen, B.; Wu, K.; Yao, W. *Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites*. Cement and Concrete Composites Vol. 26, pp.291-297, 2004.
- [18] Wen, S.; Chung, D. *Strain-sensing characteristics of carbon-fiber reinforced cement*. ACI Materials Journal Vol. 39, 2005, pp.244-248.
- [19] Reza, F.; Batson, J.; Yamamuro, J.; Lee, J. *Resistant changes during compression of carbon fiber cement composites*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, pp.476-483.
- [20] Wen, S.; Chung, D. *Self sensing of flexural damage and strain in carbon fiber reinforced cement and effect of embedded steel reinforcing bars*. Carbon Vol. 44, 2006, pp.369-373.
- [21] Cao, J.; Chung, D. *Damage evolution during freeze-thaw cycling of cement mortar studied by electric resistivity measurement*. Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp.1657-1661.
- [22] Wen, S.; Chung, D. *Cement based thermocouples*. Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2001, pp.507 – 510.
- [23] Gnecco, L. *Building a shield room is not construction*. Evaluation Engineering, Vol. 38, 1999, pp.3.
- [24] Chung, D. *Electromagnetic shielding effectiveness of carbon materials*. Carbon, Vol.39, 2001, pp.279-285.
- [25] Chung, D. *Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material*. Composites: Part B engineering, Vol. 31, pp.511-526, 2000.
- [26] Silva, B. *Estruturas Inteligentes utilizando Betão e Polímero Reforçado com Fibras de Carbono*. Tese de Mestrado. Universidade do Minho, 2005.
- [27] Gonzalez, J.M.M. *Betões reforçados com fibras de carbono. Estudo das propriedades mecânicas e físicas*. Dissertação de Doutoramento. Universidade do Minho, 2007.