

Estudo da degradação de estruturas de betão armado expostas ao ataque por sulfatos¹

Study of the degradation of reinforced concrete structures exposed to attack by sulfates

Pedro Romano

Paulo S. D. Brito

Resumo

As estruturas de betão armado quando sujeitas a ambientes agressivos tendem a perder capacidade de proteção das armaduras nelas inseridas. É conhecido que, a proteção das armaduras está associada ao PH do betão que as envolve, e cujo valor tende a diminuir na presença de sulfatos que contribuem para a descalcificação do betão. Quando o PH desce para níveis inferiores a 9, ficam criadas as condições para a dissolução da película de proteção passiva das armaduras. O presente trabalho compara o comportamento de estruturas de betão armado com quatro tipos distintos de armaduras (aço macio, revestido, galvanizado e proteção catódica) exposta ao ataque por sulfatos. Recorreu-se a sondas eletroquímicas embebidas no betão para a monitorização da condutividade do betão envolvente, do potencial de corrosão do aço e da velocidade de corrosão do aço com recurso ao método da resistência à polarização linear.

Palavras chave: degradação, corrosão, betão armado

Abstract

The concrete structures when subjected to aggressive environments tend to lose the ability to protect reinforcement embedded therein. It is known that the protection reinforcement is associated with the pH of the concrete surrounding it and whose value tends to decrease in the presence of sulphates which contribute to the softening of the concrete. When the pH drops to below 9, the conditions are created for the dissolution of the passive film of protective reinforcement. This paper compares the behavior of reinforced concrete structures with four distinct types of reinforcement (steel, coated, galvanized and cathodic protection) exposed to attack by sulfates. Resorted to electrochemical sensors embedded in the concrete for monitoring the conductivity of the concrete surrounding the steel corrosion potential and corrosion rate of steel using the method of linear polarization resistance.

Keywords: degradation, corrosion, reinforced concrete

1. Introdução

Por durabilidade de uma estrutura de betão armado entende-se a sua capacidade para desempenhar as funções para as quais foi concebida durante o tempo de vida útil previsto em fase de projeto, sem recurso a trabalhos de manutenção e/ou reparação não previstos ou excessivos. A durabilidade depende, entre outros fatores, da qualidade de execução, das medidas de proteção utilizadas e do ambiente a que a estrutura está exposta. A qualidade de execução, que é fundamental para a garantia de um bom desempenho do betão, está intimamente relacionada com o projeto de estruturas, os

¹ Trabalho apresentado no III Seminário de I&DT, organizado pelo C3i – Centro Interdisciplinar de Investigação e Inovação do Instituto Politécnico de Portalegre, realizado nos dias 6 e 7 de Dezembro de 2012.

materiais utilizados na execução do betão, o modo como a estrutura é executada e o processo de cura a que o betão está sujeito. As medidas de proteção de uma estrutura podem ser de dois tipos, proteção do betão ou proteção das armaduras. A proteção do betão consiste na colocação de revestimentos superficiais, mais ou menos duráveis, mas sempre com uma durabilidade limitada, que formam uma barreira à penetração de agentes agressivos. A proteção das armaduras pode ser do tipo passivo, como por exemplo a pintura ou galvanização das armaduras, ou do tipo ativo, como é o caso da proteção catódica. A exposição ambiental da estrutura é um dos principais fatores que condiciona a escolha do tipo de betão e da camada de recobrimento a utilizar. A NP EN 206-1:2007 [1] e a NP EN 1992 [2] definem, respetivamente, os critérios que devem ser adotados na composição do betão e a espessura da camada de recobrimento em função das classes de exposição ambiental.

O betão é um material que possui uma estrutura porosa determinada pela difusidade da pasta de cimento, sendo a relação água/cimento (A/C) um dos principais fatores que condicionam a sua porosidade. A maior ou menor porosidade do betão determina a sua suscetibilidade ao ataque dos iões agressivos. Outra das propriedades do betão relevantes para a sua durabilidade é a sua alcalinidade (PH) que, em geral, se situa entre 12 e 14, permitindo a formação e manutenção de uma camada passiva (óxido de ferro) de proteção das armaduras que se encontram no seu interior.

A degradação de estruturas de betão armado está associada à alteração das propriedades mecânicas, físicas e químicas do betão. Esta degradação pode manifestar-se através do aparecimento de fendilhação, desagregação e destacamento do betão ou através da corrosão ou rotura das armaduras. A degradação resulta da interação entre o betão e o meio envolvente a que está exposto. É na interface entre o betão e a sua envolvente que se dão os principais fenómenos físicos (vento, água, poluição do ar,...), químicos (carbonatação, penetração de cloretos, ataque com sulfatos,...) ou biológicos (raízes, fungos, ação das águas residuais,...), que conduzem a um maior ou menor nível de degradação do betão. Entre estes fenómenos destacam-se, para o presente estudo, os processos de degradação química.

A caracterização do meio envolvente pode ser efetuada através da temperatura e da humidade relativa, fatores que têm pouca influência na durabilidade do betão, ou pelo

tipo de contaminantes (tais como dióxido de carbono, cloretos e sulfatos), fator este determinante no processo de degradação do betão. Serão estes contaminantes e a forma como se relacionam com o betão que vão determinar os processos de degradação química a que este estará sujeito e que condicionam a sua durabilidade.

A carbonatação é um fenómeno originado pela reação do carbono atmosférico (CO_2) com os produtos do cimento hidratado na presença de humidade, da qual resulta a formação de carbonato de cálcio. Este processo ocorre no betão, com maior ou menor velocidade em função da porosidade aberta, e tem como consequência a redução da alcalinidade do betão, conduzindo à destruição da camada de óxido de ferro que protege as armaduras da corrosão. Quando a frente de carbonatação atinge a zona das armaduras, reduzindo o PH do betão para valores inferiores a 9, é eliminada a camada de óxido de ferro que protege as armaduras, permitindo, na presença de água ou oxigénio, a corrosão das armaduras.

A penetração dos cloretos dissolvidos em água no betão (por permeabilidade, capilaridade ou difusão) tem como consequência a redução da alcalinidade do betão (redução de pH) e a remoção da película de proteção das armaduras (óxido de ferro) dando origem à corrosão destas. Este processo é cumulativo, ou seja, os iões de cloro são depositados no interior dos poros do betão quando a água que os transporta evapora, ocorrendo de modo mais acelerado quando a estrutura está sujeita a ciclos seco/molhado.

A degradação induzida pelo ataque de sulfatos é caracterizada pelas reações químicas dos iões de sulfato com os compostos de alumina, os iões de sulfatos, cálcio e hidróxidos do cimento Portland endurecido ou, cimento contendo clínquer Portland, formando etringite e de forma residual, gesso. Em geral, o ataque por sulfatos conduz a uma expansão e fendilhação da pasta de cimento endurecido pelo processo associado à formação de etringite. Este efeito é usualmente designado por etringite secundária, em oposição à etringite criada durante a fase de hidratação do cimento, cuja formação não tem consequências para o betão. O ataque por sulfatos tem como efeito a redução da rigidez e da resistência do betão. A figura 1 mostra o efeito da ação dos sulfatos sobre o betão.

Para as armaduras do inseridas no betão existem dois fatores que inibem a sua corrosão, o primeiro fator é o efeito de barreira física que o betão confere à exposição ambiental da armadura, o segundo está associado à elevada alcalinidade do betão que induz a formação de uma película de óxido de ferro (Fe_2O_3) na superfície da armadura, designada por camada ou película de passivação.

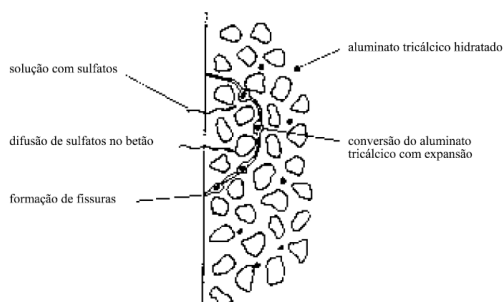


Figura 1 – Efeito do ataque por sulfatos [5].

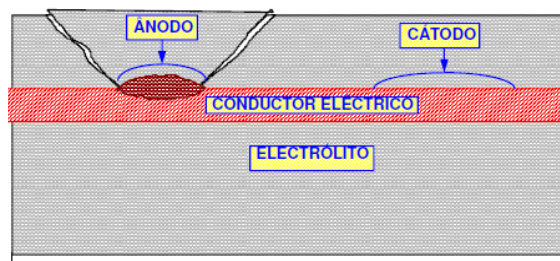


Figura 2 – Mecanismo de corrosão [7].

O fenómeno da corrosão das armaduras no betão consiste na oxidação destrutiva do aço das armaduras pelo meio que o envolve. Para a corrosão ocorrer é necessário que o PH baixe para valores inferiores a 9 e que se dissolva a película passiva, permitindo a formação de uma célula eletroquímica, constituída por um ânodo (zona despassivada onde ocorre a oxidação), um cátodo (zona de acesso a oxigénio onde ocorre a redução), um condutor metálico (armadura onde a corrente eléctrica passa na forma de fluxo de electrões) e um eletrólito (betão onde a corrente eléctrica é gerada pelo fluxo de iões). Na figura 2 está representado o mecanismo de corrosão das armadura.

Com o presente estudo pretende-se obter informação sobre o processo de degradação do betão sujeito ao ataque por sulfatos, correlacionando-o com os dados recolhidos por sondas eletroquímicas, de forma a estimar o estado de degradação do betão e o nível de proteção das armaduras ou, em fases mais avançadas, determinar o início do processo de corrosão das armaduras.

2. Ataque por sulfatos

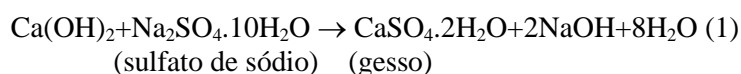
O ataque por sulfatos, que se enquadra nos fenómenos de degradação química do betão, resulta, em geral, da reação entre o ião sulfato com os aluminatos de cimento, formando-se sulfoaluminato tricálcico (etringite) e gesso, produzindo um significativo aumento de volume na presença da água. A presença de sílica e carbonato pode

conduzir à formação de um terceiro composto a taumasite. São, portanto, dois os fenómenos de degradação do betão associados ao ataque por sulfatos que interessa analisar, a formação da etringite e da taumasite.

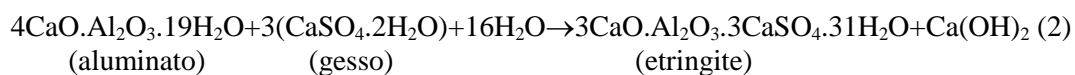
Formação da etringite

A etringite pode resultar de dois processos químicos diferentes, um dos processos está associado aos sulfatos de cálcio e de sódio, e o outro associado ao sulfato de magnésio. O primeiro processo resulta da reação do sulfato de sódio com o hidróxido de cálcio formando sulfato de cálcio (gesso), seguida da reação deste com o aluminato de cálcio hidratado formando sulfoaluminato de cálcio (etringite), conforme indicado nas expressões 1 e 2.

Reação do sulfato de sódio com formação de gesso:

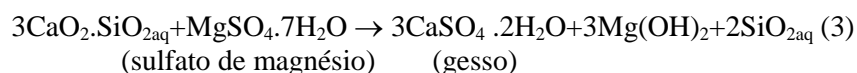


Reação do sulfato de cálcio com formação de etringite:

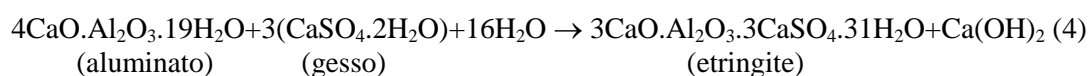


O segundo processo de formação da etringite, que tem uma ação mais devastadora que o processo anterior, resulta da ação do sulfato de magnésio sobre os silicatos de cálcio hidratados e respetiva reação com os aluminatos e hidróxidos de cálcio, conforme apresentado das expressões 3 e 4.

Reação do sulfato de magnésio com formação de gesso:



Reação do sulfato de cálcio com formação de etringite:

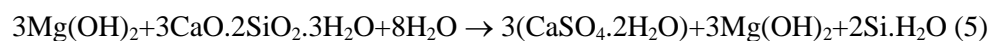


De referir que a formação de etringite é elevada para temperaturas baixas (0°C) e reduzida ou nula para temperaturas altas (80°C), pelo que é uma reação lenta em países quentes. O modo de garantir a proteção do betão contra o ataque de sulfatos são passa pela escolha do tipo de cimento (cimentos não reativos aos sulfatos) e pelo nível de porosidade do betão (razão a/c baixa).

Formação da taumasite

A taumasite resulta da reação dos sulfatos com os silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), que são o principal agente de ligação do cimento Portland. Esta reação é acompanhada por perda de resistência do betão, transformando o ligante numa pasta sem coesão. Para ocorrer esta reação é necessário a existência de iões sulfatos, iões carbonato (em geral calcário presente no betão), silicatos cálcicos hidratados ou não hidratados e humidade ou água.

A decomposição dos silicatos cálcicos hidratados assume a seguinte forma:



A principal consequência deste processo é a descalcificação do C-S-H, com alteração da estrutura cimentícia por perda do ligante, com a consequente perda de resistência.

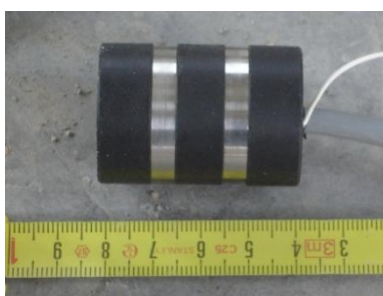
3. Parte experimental

Os ensaios foram desenvolvidos em laboratório com recurso a dois conjuntos de provetes. O primeiro conjunto constituído por 12 provetes em betão armado com forma paralelepípedica com 40x30x15 cm³, sendo o segundo conjunto de provetes constituído por 12 provetes cúbicos com 15x15x15 cm³. Todos os provetes foram executados com betão C20/25 XC1 de dosagem prescrita de acordo com a Norma NP EN 206-1. Os provetes cúbico, não monitorizados, foram utilizados para ensaios de resistência à compressão, tendo os provetes paralelepípedicos sido monitorizados com sondas eletroquímicas.

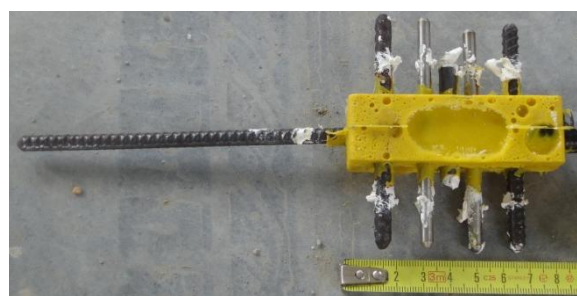
Os provetes paralelepípedicos foram armados com três varões de aço em cada direção formando uma malha ortogonal, tendo-se recorrido a quatro soluções para as armaduras:

armadura de aço macio (S), revestida (R), galvanizada (G) e com proteção catódica (P). Para cada tipo de armaduras foram executados três provetes, tendo sido adotado um recobrimento de 50mm.

Na monitorização dos provetes recorreu-se a duas técnicas eletroquímicas, uma com recurso a dois elétrodos afastados de 5cm (técnica dos dois sensores) e, outra, com sensores constituídos por dois pares de elétrodos (um par de elétrodos em aço macio e outro em aço inox) e um elétrodo de referência (grafite), sistema de monitorização da corrosão MonIcorr^{Pat.Pend.}. Os sensores foram instalados no interior do provete antes da betonagem. Para a recolha de informação utilizaram-se sistemas de aquisição de dados, que tem como função comandar e recolher os dados das leituras periódicas efetuadas pelos sensores instalados. As fotografias 1 e 2 mostram os sensores utilizados e as fotografias 3 e 4 mostram os sistemas de aquisição de dados.



Fotografia 1 – técnica dos dois sensores.



Fotografia 2 – Sistema MonIcorr^{Pat.Pend.}.



Fotografia 3 – Sistema de aquisição de dados.



Fotografia 4 – Sistema de comando.

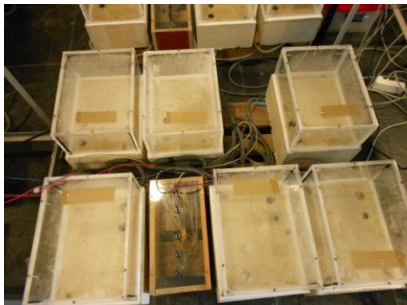
A técnica dos dois sensores permite medir a resistividade do betão duas profundidades (1,5 cm e 3,0 cm) através da criação de um campo elétrico alternado (172 Hz) entre os elétrodos de aço inox, à mesma profundidade, criando uma corrente e medindo a diferença de potencial.

A segunda técnica permite determinar a velocidade de corrosão das armaduras, através da técnica da Resistência de Polarização Linear (LPR) por ligação direta à armadura, a

corrente galvânica, entre os pares de elétrodos de aço macio e de aço inox, e a condutividade do betão na envolvente das armaduras.

Em paralelo foi implementado um processo de recolha de amostra de pó do betão, por perfuração, até 5cm de profundidade, de forma a determinar as alterações químicas que se desenvolvem ao longo do tempo. Estas amostras foram analisadas por espectroscopia de fluorescência de raios X (XRF). Para a determinação do pH recorreu-se à lixiviação do pó recolhido com água destilada, colocando 5 g de amostra em 50 ml de água destilada num balão de decantação com tampa. Após um período de agitação enérgica, seguido de 24 horas de repouso, a mistura foi filtrada e mediu-se finalmente valor de pH da solução.

Estes provetes foram sujeitos a um processo de contaminação por sulfatos com uma duração de cerca de 9000 horas. Para a contaminação dos provetes utilizou-se uma solução constituída por sulfatos de sódio e de magnésio com uma concentração de 2.5% de cada um dos componentes, conforme prescrito na norma ASTM C1012-04. Nas fotografias 5 e 6 mostra-se os provetes ensaiados.



Fotografia 5 – Provetes 1 a 6 - proteção catódica e armadura galvanizada.



Fotografia 6 – Provetes 7 a 12 - armadura pintada e armadura sem proteção.

4. Resultados e discussão

Os gráficos 1 a 3 são relativos à resistência de polarização (R_p) do aço, dos provetes de betão, armados com armaduras de aço macio (provetes 10, 11 e 12). Nestes gráficos pode-se observar que os provetes 10 e 12 apresentam um comportamento semelhante, enquanto o provete 11 apresenta um comportamento diferentes dos restantes.

A primeira observação que se pode fazer relativamente aos gráficos 1 e 3 é que a resistência de polarização numa fase inicial do ensaio apresenta valores baixos que,

após um período de cerca de 150 dias, sobe para valores elevados, indicando uma redução da velocidade de corrosão.

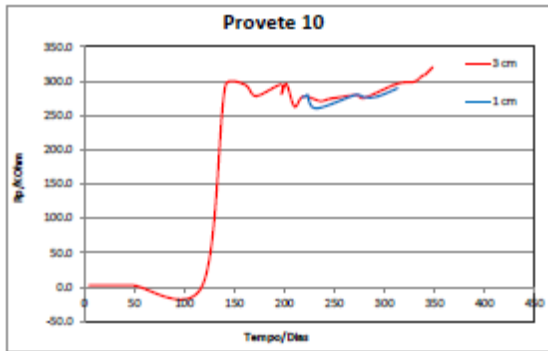


Gráfico 1 – Variação da resistência de polarização (R_p) função do tempo - provete 10.

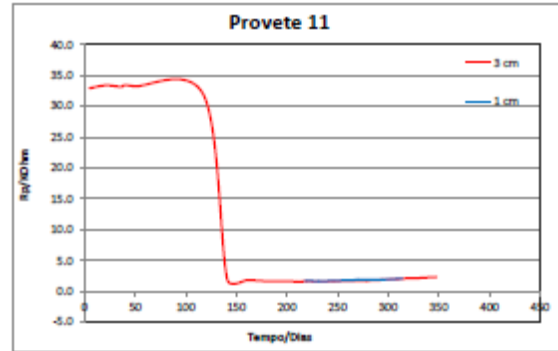


Gráfico 2 – Variação da resistência de polarização (R_p) função do tempo - provete 11.

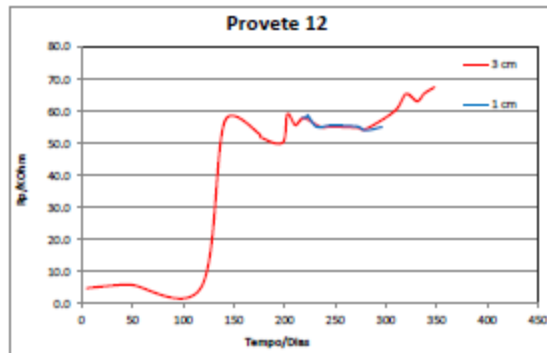


Gráfico 3 – Variação da resistência de polarização (R_p) função do tempo - provete 12.

O gráfico 4 apresenta a variação da resistência de polarização e do potencial de corrosão (E_{corr}) ao longo do ensaio. Neste gráfico pode-se verificar que o potencial de corrosão se mantém a um nível estável ao longo do tempo, indicando que a armadura se encontra passivada, ou seja, os produtos da corrosão servem de proteção às armaduras.

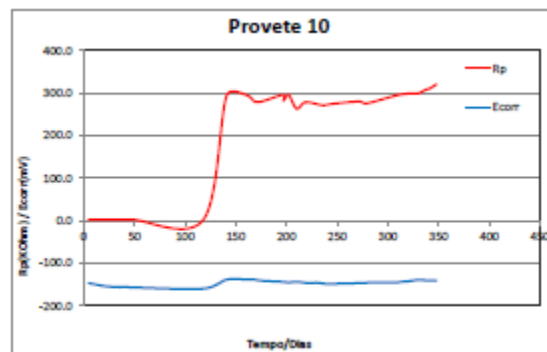


Gráfico 4 – Variação da resistência de polarização (R_p) "versus" potencial de corrosão (E_{corr}) função do tempo - provete 10.

No gráfico 5 está representada a variação da Rp do ferro da armadura com a variação da resistividade do betão ao longo do tempo de ensaio. A análise da figura permite verificar que as ambas apresentam um andamento semelhante.

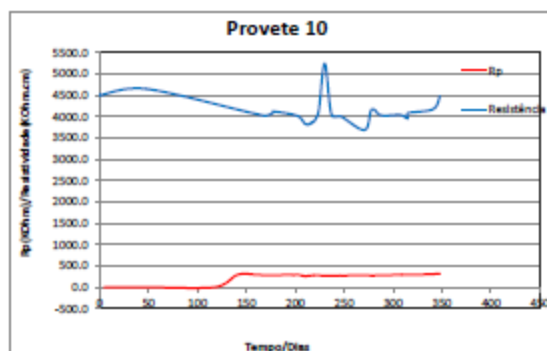


Gráfico 5 – Variação da resistência de polarização (Rp) "versus" resistividade função do tempo - provete 10.

O gráfico 6 mostra a percentagem de sulfatos no betão, para o provete 10, por camadas de 10mm, até uma profundidade de 50 mm. A análise da figura permite verificar que as ambas apresentam um andamento semelhante.

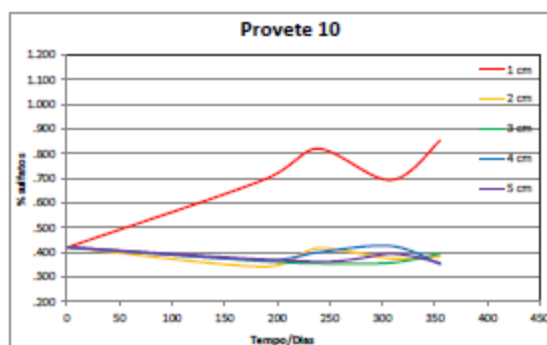


Gráfico 6 – Percentagem de sulfatos no betão por camadas - provete 10.

5. Conclusões

A primeira conclusão que se pode tirar é que o processo de contaminação por sulfatos de provetes de betão ainda não está concluído.

A segunda conclusão é de que a monitorização da variação, ao longo do tempo, do potencial de corrosão do aço da armadura e da sua resistência de polarização permitem perceber as várias fases do processo de degradação a que uma estrutura de betão armado esta sujeita.

Por fim, parece existir correspondência entre a resistividade e o estado do processo degradativo do betão.

Agradecimentos

O trabalho foi financiado pelo RITECA, “Red de Investigación Transfronteriza de Extremadura, Centro y Alentejo”, (POCTEC - 0318_RITECA_4_E, 2008).

Referências bibliográficas

- [1] NP EN 206-1 - "Betão. Especificação, desempenho, produção e conformidade", IPQ, 2007.

- [2] NP EN 1992 - "Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão”, IPQ, 2010

- [3] LNEC E-464 - "Betões. Metodologia prescritiva para a vida útil de projeto de 50 anos face às ações ambientais", LNEC, Lisboa, 2004.

- [4] LNEC E-465 - "Betão. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão armado ou pré-esforçado que permitem satisfazer a vida útil de projeto sob as exposições ambientais XC ou XS", LNEC, Lisboa, 2007.

- [5] Coutinho, Joana Sousa, “Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem”, dissertação para doutoramento, FEUP, Porto, 1998.

- [6] Costa, António; Appleton, Júlio, "Mecanismo de deterioração em estruturas de betão", Apontamentos da Cadeira de Reabilitação e Reforço Estrutural, IST, 1999.

- [7] Costa, António, "Durabilidade estruturas de betão", Apontamentos da Cadeira de Reabilitação e Reforço de Estruturas, IST, 2006.

- [8] Ferreira, Rui Miguel, "Avaliação de ensaios de durabilidade do betão", Universidade do Minho, Guimarães, 2000.

- [9] Alves, M.^a Teresa Pinheiro; Gomà, Ferrán; Jalali, Said, "Um cimento mais sustentável frente a um ataque severo por sulfatos", Congresso da Construção 2007, Coimbra, 2007.

- [10] Mehta, P. Kumar; Monteiro, Paulo J. M., "Concrete: Microstructure, properties and materials", 2001

- [11] Brito, Paulo; Rodrigues, Luiz; Cunha, M., "Apresentação de um Sistema de Monitorização da Degradação de Estruturas de Betão Armado - monicorr", Ingenium nº 98 (2007).

Notas sobre os autores

Pedro Romano

promano@estgp.pt

Assistente do 2º triénio na ESTG-IPP;

Licenciado em Engenharia Civil, IST-UTL;

Pós-graduado em Construção, IST-UTL;

Perito Qualificado RCCTE, ADENE;

Assessor do sistema LiderA - Construção Sustentável.

Experiência profissional anterior:

PrPc Engenheiros, Lda - Elaboração de projetos;

Câmara Municipal de Monforte (GTL) - Elaboração de projetos.

Paulo Brito

pbrito@estgp.pt

É Professor Coordenador com Nomeação Definitiva na Escola Superior de Tecnologia e Gestão, do Instituto Politécnico de Portalegre, onde exerce atualmente funções de Presidente do Departamento de Tecnologias e Design. É também, Coordenador Institucional do C3i-IPP.

É Licenciado em Engenharia Química, ramo de Processos e Indústria, pelo Instituto Superior Técnico; Mestre em “Corrosion Science and Engineering” pelo UMIST, Universidade de Manchester; Doutor em Engenharia Química, pelo Instituto Superior Técnico na área da electroquímica – sobre células galvânicas. Possui também um MBA – Master of Business and Administration.

As principais áreas de investigação estão relacionadas com bioenergia, tratamentos ambientais de resíduos, corrosão de materiais e produção galvânica de energia.

Tem cerca de 150 trabalhos publicados entre revistas científicas, capítulos de livros e apresentações em congressos.