

CORROSÃO DE ARMADURA DE CILINDROS DE BETÃO CONFINADOS POR DUAS CAMADAS DE GFRP AVALIADA POR IMPEDÂNCIA ELECTROQUÍMICA

Artigo submetido em Maio de 2013 e aceite em Setembro de 2013

B. Sena da Fonseca⁽¹⁾⁽²⁾, A. S. Castela⁽³⁾, M. G. S. Ferreira⁽¹⁾⁽⁴⁾, R. G. Duarte⁽³⁾ e M. F. Montemor^{(1)(*)}⁽¹⁾ ICEMS, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal⁽²⁾ Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica⁽³⁾ Instituto Politécnico de Setúbal, ESTBarreiro, 2839-001 Barreiro, Portugal⁽⁴⁾ CICECO, Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro

(*) A quem a correspondência deve ser dirigida, e-mail: mfmontemor@ist.utl.pt

Resumo

Este trabalho teve como objetivo o estudo de armaduras de cilindros de betão armado confinados com duas camadas de polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP). Provetes cilíndricos de betão armado com e sem GFRP foram imersos em solução de cloreto de sódio. O estado das armaduras foi avaliado por medições de potencial de circuito aberto e por impedância eletroquímica com sistemas a dois e três eletrodos. Os resultados demonstraram que o confinamento de duas camadas de GFRP apresenta baixa permeabilidade e atua como barreira física à penetração de solução. Verificou-se que imperfeições na fase de aplicação do GFRP e sua degradação são de grande importância na eficiência da prevenção de corrosão.

Palavras-chave: GFRP, Betão Armado, Corrosão, EIS**CORROSION EVALUATION BY ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE OF REINFORCED CONCRETE CYLINDERS CONFINED BY TWO LAYERS OF GFRP****Abstract**

This work aims to study the steel reinforcement corrosion in reinforced concrete confined with two layers of glass fiber reinforced polymers (GFRP). Reinforced concrete cylinders with and without GFRP were immersed in a sodium chloride solution. The corrosion process of the steel rebars was followed by open potential measurements and electrochemical impedance in two and three electrodes systems. Results have shown that two GFRP layers have low permeability and act as an efficient physical barrier. It has been found that imperfections during the GFRP application and its degradation are of great importance in the efficiency of corrosion prevention.

Keywords: GFRP, Reinforced Concrete, Corrosion, EIS**1. INTRODUÇÃO**

O desempenho e a durabilidade dos componentes constituintes das infraestruturas em betão armado constituem uma preocupação crescente na construção civil, tendo presente os critérios de sustentabilidade actualmente privilegiados. Por outro lado, a degradação introduzida nessas estruturas por fatores exógenos está na origem de dispendiosas intervenções de reparação e reforço de estruturas de betão armado.

A corrosão das armaduras de aço é reconhecida como o maior problema que afeta a integridade estrutural destas estruturas [1 - 4]. Em pilares de pontes, garagens subterrâneas e em construções costeiras a presença de elementos agressivos como os cloretos potencia esta situação [3].

Apesar das armaduras de aço estarem protegidas contra a corrosão devido ao ambiente alcalino proporcionado pelo betão ($\text{pH} \approx 13$), a penetração de iões cloreto pode provocar a destruição do filme passivo o que inicia a atividade corrosiva [1 - 3, 5 - 7].

Os produtos originados por esta reação possuem volume muito superior ao do seu estado original o que gera forças de tensão no interior do betão [7, 8]. Como consequência, poderá ocorrer fissuração e desagregação [1, 6 - 8] que se acentuam com o tempo pois as armaduras ficam diretamente expostas. A diminuição da secção das armaduras e a perda de aderência ao betão são duas consequências negativas para o desempenho de toda a estrutura.

Os métodos convencionais de reparação ou substituição de estruturas de betão armado acarretam elevados custos e são um dos maiores desafios da engenharia civil [9].

Para aumentar a vida útil e reduzir os custos de manutenção e reparação, é fundamental a utilização de novos materiais de elevada durabilidade e que permitam novas soluções construtivas e nos últimos 20 anos, um grande número de estudos têm sido realizados pela comunidade científica. Comprovou-se que a utilização de compósitos reforçados por fibra (FRP) no reforço de vigas, lajes e pilares conduz a vantagens como o aumento considerável da

resistência mecânica e melhoria das características sísmicas da estrutura [10 - 16]. É também um material de fácil aplicação e com um reduzido impacto arquitetónico [14].

Assim, a aplicação deste tipo de compósitos é reconhecida em todo o mundo como uma tecnologia viável de reforço e reparação de infraestruturas e tem sido frequentemente empregue na reabilitação de diversas estruturas nos EUA, Japão e Europa [13] sendo uma das principais aplicações no confinamento de pilares de viadutos e pontes [10].

Existem diversos casos de reabilitação de estruturas com problemas de corrosão de armaduras em que foi utilizado FRP por questões económicas [17, 18]. No entanto, o principal objetivo tem sido o reforço estrutural, já que a presença de humidade em conjunto com cloretos e oxigénio no interior do betão torna a aplicação do FRP inconsequente na paragem da corrosão, sendo aconselhável a extração eletroquímica de cloretos (ECE) numa etapa prévia da reparação [19].

Diversos ensaios laboratoriais têm sido efetuados para avaliar a aptidão dos FRP no abrandamento da corrosão das armaduras e as suas conclusões publicadas. Devido ao elevado tempo necessário para avaliar a corrosão em condições semelhantes às reais, o procedimento habitual recorre a técnicas de corrosão acelerada, nomeadamente através da aplicação de uma corrente elétrica no sistema para acelerar o transporte dos iões agressivos através do betão [1, 3, 5, 8, 9], embora se saiba que esta técnica provoca mudanças na composição química, nas propriedades elétricas e na microestrutura do betão, o que influencia a resposta global do sistema e o afasta de um caso real [20].

De qualquer das formas, parece unânime a conclusão de que ocorre uma diminuição da taxa de corrosão em armaduras expostas em betão armado onde foi aplicado FRP. Note-se que o processo também depende de vários parâmetros como o tipo de resina e fibras, sua orientação e o número de camadas utilizadas [18].

Em trabalho anterior [21] estudou-se por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) o comportamento de armaduras

expostas a betão revestido com uma camada de FRP de fibra de vidro (GFRP). Concluiu-se que o GFRP atua como uma barreira física à penetração de agentes corrosivos. Uma vez que é extremamente sensível a variações na fase de confinamento, não foi possível garantir este efeito em todos os provetes. Por outro lado, em contacto com agentes agressivos, o GFRP tende a degradar-se o que permite a lenta penetração destes agentes.

O presente artigo pretende contribuir para o conhecimento deste tipo de efeito, assim como para despistar eventuais erros atribuíveis em medições EIS a dois electrodos não inertes. O estudo foi efetuado em provetes cilíndricos de betão armado, quer não confinados, quer confinados por duas camadas de GFRP, a escala laboratorial. A aplicação do colete de FRP foi efetuada antes da contaminação, simulando a sua utilização no momento inicial da construção. Por medidas do potencial de circuito aberto (OCP) e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) pretendeu-se avaliar em tempo real, a influência da aplicação de duas camadas de GFRP na degradação da armadura.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Foram construídos provetes cilíndricos de betão com uma relação água/cimento (a/c) igual a 0,50. As proporções da mistura em percentagem de massa foram as seguintes: 46,06% de brita com dimensões inferiores a 9,5 mm, devido às reduzidas dimensões dos provetes; 35,53% de areia; 12,28% de cimento Portland CEM I classe 42,5R e 6,14% de água.

Para simular a armadura utilizou-se em cada provete um varão de aço comum com 12 mm de diâmetro. Uma vez que a contaminação não será acelerada por outros processos, optou-se por uma espessura de recobrimento dos varões de 15 mm, abaixo dos valores mínimos aconselhados e normalmente utilizados.

Para as medições a dois electrodos, utilizou-se um varão de aço similar no centro do provete. Para as medições a três electrodos utilizou-se um varão de material inerte (grafite) como electrodo de referência no centro do provete e como contra electrodo um varão de aço comum. As características geométricas dos provetes são apresentadas na figura 1.

Após 28 dias de cura o valor médio obtido para a resistência do betão à compressão em ensaios de cubos feitos de acordo com a norma NP EN 206-1 [22] foi de 37,1 MPa.

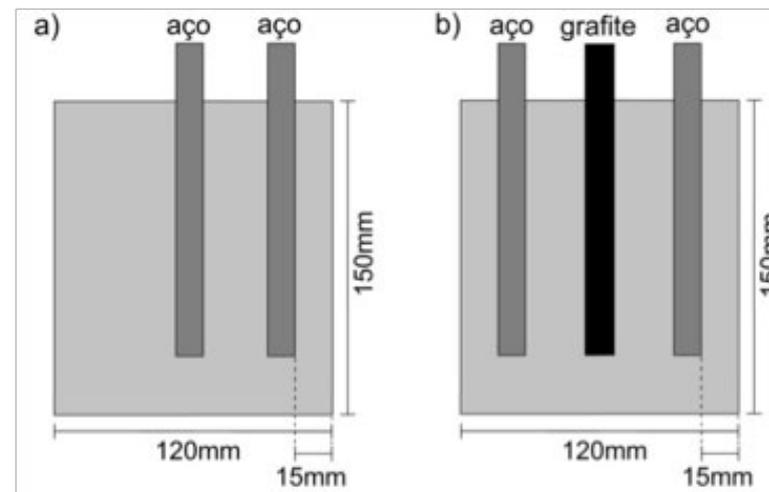


Fig. 1 – Esquema da geometria e dimensões dos provetes: com dois electrodos a); com três electrodos b).

Com 20 dias de cura, foram aplicadas pelo método *wet lay-up* duas camadas de GFRP num provete cilíndrico para medições a três electrodos. O compósito é composto por um tecido de fibra de vidro unidirecional com 1,27 mm de espessura nominal, denominado comercialmente por Tyfo® SEH-51. Como aconselhado pelo fornecedor, a resina utilizada foi epoxídica designada por Tyfo S. As bases dos provetes foram cobertas com duas camadas de resina epoxídica.

Após a cura do compósito, os provetes foram parcialmente imersos numa solução a 3 % de cloreto de sódio (NaCl), valor semelhante à concentração média da água do mar. Permaneceram neste estado no decorrer de toda a investigação (figura 2).

As medições de OCP foram obtidas com recurso a um multímetro portátil e um electrodo saturado de calomelanos. O seu contacto com o betão foi facilitado por uma esponja humedecida.

No que diz respeito aos estudos por EIS, as medições foram efetuadas a dois electrodos (dois varões de aço nos provetes) num potenciostato Gamry Ref 600. A gama de frequências variou entre os 100 kHz e os 5 mHz e a onda sinusoidal foi de 10 mV (rms). Os ensaios foram executados com uma diferença de potencial de 0 V.



Fig. 2 – Provetes em imersão parcial numa solução de 5% de NaCl.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 3 são representadas as evoluções dos potenciais registados ao longo do período de imersão dos provetes com e sem GFRP. Os valores medidos do potencial de circuito aberto nos provetes confinados com GFRP situam-se acima dos -200 mV, o que traduz uma situação típica de passividade.

Em contraste, durante todo o período de imersão, os provetes sem GFRP apresentam valores inferiores a -500 mV. Estes valores de potencial são característicos de um estado de corrosão ativa.

Estes resultados podem ser devidos a: i) despasse dos varões devido à rápida penetração de cloretos através do betão e consequente chegada à interface betão/aço ou ii) polarização catódica devido ao facto da maior parte dos provetes estarem imersos e saturados o que provoca um défice de difusão de oxigénio. A interpretação dos resultados obtidos por EIS permite estabelecer qual desses fenómenos terá ocorrido.

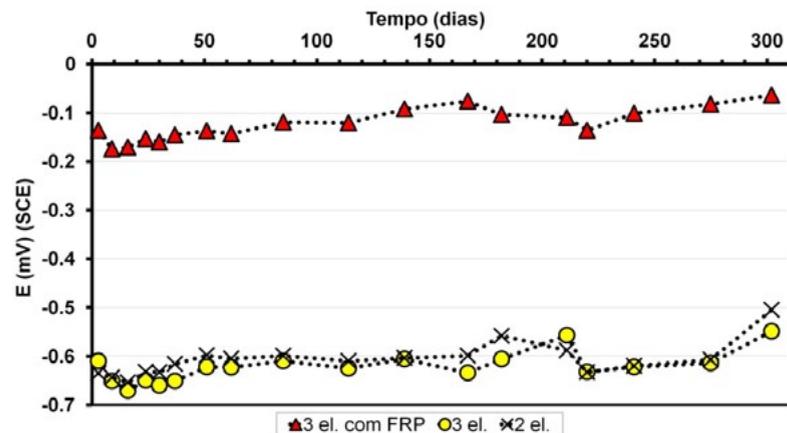


Fig. 3 – Evolução do OCP dos provetes ao longo do tempo de imersão.

A evolução dos espectros de EIS com o tempo de imersão é apresentada na figura 4.

Os diagramas de Bode evidenciam, para o caso dos provetes sem FRP, ligeiras diferenças nos sistemas. Embora com progressão semelhante, os resultados das medições a dois electrodos revelam, regra geral, resistências óhmicas superiores. Os valores para as altas frequências que estão associados às características do betão, mostram consideráveis diferenças entre provetes com e sem FRP.

Nas frequências intermédias e baixas ocorreu uma diminuição ligeira do ângulo de fase ao longo do tempo para os provetes sem FRP, sugerindo que o processo de corrosão se torna mais importante. Para os provetes com FRP, o ângulo de fase apresenta-se superior e constante ao longo do tempo, o que revela um estado passivo dos varões de aço. Nestes provetes é também possível identificar uma constante de tempo adicional que corresponderá à presença de um filme protetor na superfície do aço, que protege a armadura, adiando o início das reações de corrosão.

Nas frequências baixas, é possível identificar fenómenos de difusão caracterizados pela *distorção* do patamar correspondente à resistência de transferência de carga.

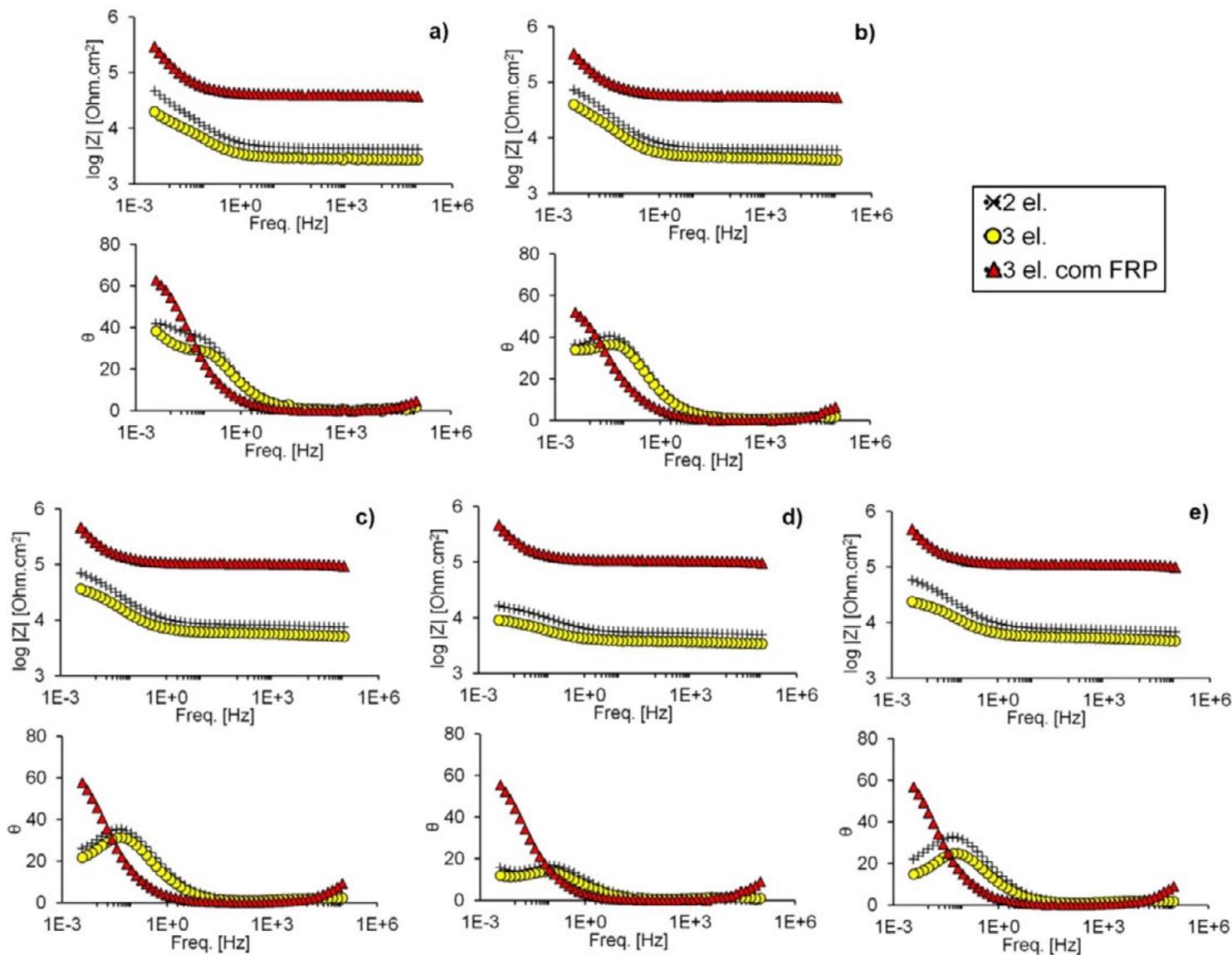


Fig. 4 – Diagramas de Bode ao longo do tempo de imersão: a) 9 dias; b) 85 dias; c) 182 dias; d) 241 dias e e) 302 dias.

Para caracterizar os dois tipos de provetes, com e sem GFRP, e acompanhar a evolução dos fenómenos ocorridos ao longo do tempo, recorreu-se à utilização de circuitos equivalentes.

O circuito equivalente adotado para descrever o sistema dos provetes com GFRP (figura 5 b) caracteriza-se por: resistência do betão (R_b); constante de tempo que resulta de filmes passivos na superfície do aço (C_1 e R_1) e uma capacidade de dupla camada (C_{dc}).

No que respeita à modelação dos espectros correspondentes aos provetes sem aplicação de GFRP (figura 5 a), uma vez que se detetou um estado de corrosão ativa, o circuito utilizado foi ligeiramente alterado. Foi adicionada uma resistência de transferência de carga (R_{tc}) e um elemento para caracterizar fenómenos de difusão através da camada de óxidos (CPE1).

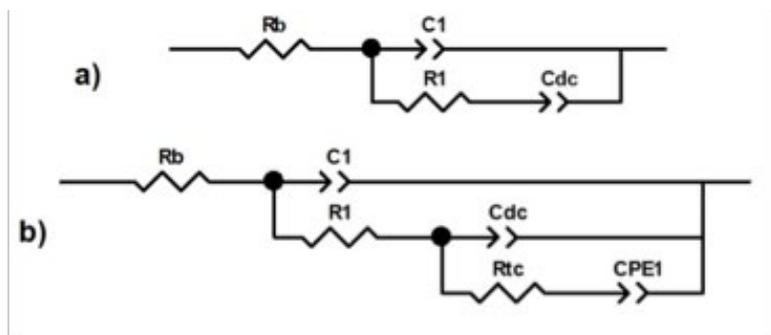


Fig. 5 – Circuitos equivalentes utilizados para simulação dos espectros obtidos para os provetes de betão: com GFRP a); sem GFRP b).

Através dos valores obtidos por ajuste é possível acompanhar a evolução da resistividade do betão (figura 6), assim como os valores da resistência de transferência de carga.

A evolução da resistividade do betão é importante para uma melhor compreensão da influência do confinamento por GFRP na penetração da solução. Os valores de resistividade do betão foram obtidos através das frequências elevadas, a partir dos valores R_b . Esta resistência foi convertida em resistividade, tendo em conta a área do electrodo e a espessura do betão entre electrodos.

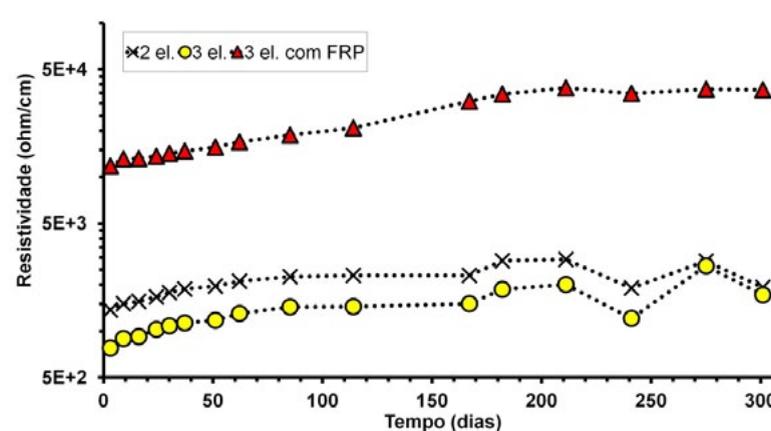


Fig. 6 – Evolução da resistividade do betão.

Uma vez que a resistividade é inversamente proporcional à condutividade e que a velocidade de corrosão do sistema é condicionada pela quantidade de eletrólito disponível para o transporte de cargas, através da resistividade pode-se obter alguma informação qualitativa acerca da corrosão. Genericamente considera-se que a corrosão é pouco provável para valores de resistividade superiores a 12000 Ω .cm, é provável entre 5000 e 12000 Ω .cm e para valores inferiores a 5000 Ω .cm a corrosão será muito provável [7].

Nos provetes sem GFRP, após três dias de imersão os valores variam entre os 800 e 1400 Ω .cm. Esta gama de valores permite afirmar que ocorreu uma rápida penetração de solução no betão e que os provetes estão saturados.

Com a evolução do tempo de imersão, a cura do betão prossegue através de processos de hidratação o que resulta num aumento progressivo da resistividade do betão. Existe, no entanto, uma tendência para valores mais estáveis de resistividade após 3 meses de imersão.

Para os provetes confinados com GFRP os valores obtidos durante os primeiros dias de imersão são várias vezes superiores. Apresentam uma resistividade de cerca de 12000 Ω .cm. A presença de GFRP tem o efeito de uma barreira física que retarda a absorção de solução e isto reflete-se numa maior resistência. Além disso, devido à maior taxa das reações de hidratação, o betão apresenta um aumento significativo de resistividade. Após 300 dias a resistividade sofreu um aumento

de 3 vezes face à inicial o que revela a conservação das propriedades durante este período de tempo.

Silva (2007) [23], para o caso de uma solução salina, estimou um coeficiente de difusão para o GFRP de $1,55 \times 10^{-6}$ mm²/s, valor várias vezes inferior ao de um betão comum. A proteção natural que o betão confere contra a corrosão e o reduzido coeficiente de difusão do GFRP formam uma ação conjunta e eficaz na prevenção da corrosão.

Por outro lado, são conhecidos os efeitos de soluções de NaCl na degradação das propriedades do GFRP. Os danos produzidos podem resultar de lixiviação das fibras e formação de micro-fissuras [24]. O enfraquecimento da matriz ocorre por plasticização e, embora este dano pareça ser reversível, a exposição constante provoca danos irreversíveis através de hidrólise [25, 26]. Além disso, a integridade estrutural e o desempenho do GFRP são fortemente dependentes da estabilidade da ligação fibra/matriz. A difusão de moléculas causa expansões volumétricas e provoca tensões diferenciais na interface fibra/matriz [27].

Devido à penetração de solução ocorrer apenas pelo exterior, seria previsível que a utilização de duas camadas quando comparadas com um confinamento com uma camada diminuisse a permeabilidade do confinamento e que este mantivesse as suas características barreira intactas durante um maior período de tempo. Contudo, Khoe *et al.* (2010) [28] afirma que laminados apenas com uma camada são menos permeáveis do que sistemas com duas camadas.

Alguns autores [21] referem que todos os provetes de betão confinados com uma camada de GFRP sofreram uma significativa diminuição de resistividade nos primeiros 300 dias de contaminação. Isto indica que o GFRP perdeu o seu efeito barreira durante este período de tempo. Este efeito revela-se mais sensível a pequenas variações e imperfeições inerentes à aplicação de GFRP por *wet-lay up*, do que à reduzida permeabilidade natural do material. Também a durabilidade do GFRP é um dos fatores principais na eficaz redução de penetração de cloretos e na redução da probabilidade de corrosão das armaduras.

Na tabela 1 apresentam-se alguns dos resultados experimentais obtidos através dos ajustes aos dados experimentais.

Após nove dias de imersão, os provetes com GFRP apresentam um comportamento tipicamente passivo com declives determinados no diagrama de log |Z| superiores a 0,8. Os provetes não confinados

apresentam declives inferiores e valores de R_{tc} característicos de um estado de corrosão ativo.

Com o evoluir do tempo de imersão, os dois tipos de provetes sem GFRP apresentam valores de R_{tc} semelhantes e com uma velocidade de corrosão ligeiramente variável ao longo do tempo.

Esta diferença poderá ser explicada pela variação de temperatura e humidade no ambiente ao longo das estações do ano, o que provocou diferentes comportamentos na absorção de água por capilaridade na parte emersa dos provetes.

Através dos declives é possível constatar que o confinamento provocou uma manutenção do estado passivo, com declives sempre superiores a 0,8 até ao final dos ensaios.

Tabela 1 – Evolução da resistência de polarização obtida para os diversos tipos de provetes.

| Tempo | Referência | R_{tc} | Declive |
|----------|------------|-------------------|---------|
| 9 dias | 2el | $1,9 \times 10^4$ | 0.72 |
| | 3el | $1,3 \times 10^4$ | 0.77 |
| | 3el GFRP | -- | 0.83 |
| 85 dias | 2el | $1,2 \times 10^5$ | 0.69 |
| | 3el | $4,2 \times 10^4$ | 0.69 |
| | 3el GFRP | -- | 0.82 |
| 182 dias | 2el | $1,0 \times 10^5$ | 0.66 |
| | 3el | $4,2 \times 10^4$ | 0.67 |
| | 3el GFRP | -- | 0.85 |
| 241 dias | 2el | $1,2 \times 10^4$ | 0.62 |
| | 3el | $5,4 \times 10^3$ | 0.64 |
| | 3el GFRP | -- | 0.97 |
| 302 dias | 2el | $7,9 \times 10^4$ | 0.65 |
| | 3el | $2,1 \times 10^4$ | 0.66 |
| | 3el GFRP | -- | 0.88 |

4. CONCLUSÕES

Os provetes sem GFRP sofreram uma rápida saturação e por este motivo os varões de aço revelaram-se ativos numa fase precoce da investigação. Com o desenvolvimento dos ensaios esta corrosão intensificou-se.

Pela evolução da resistividade concluiu-se que os provetes confinados se mantiveram num estado seco e que os processos de hidratação prosseguiram a uma taxa elevada. Os varões mantiveram-se num estado passivo durante os 300 dias de ensaio. O confinamento revelou reduzida permeabilidade à penetração de solução e atuou como uma barreira física. Quando comparados com a utilização de uma camada, verificou-se que a utilização de duas camadas é mais eficaz na prevenção de penetração de cloretos.

Imperfeições na fase de aplicação de GFRP e a sua degradação por ataque através de uma solução salina são dois aspetos de grande importância na eficiência de redução da probabilidade de corrosão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia por financiar o projeto DUST-PTDC/ECM/100538/2008 que suportou a presente investigação.

REFERÊNCIAS

- [1] T. E. Maaddawy, A. Chahroum and K. Soudki, *J. Compos. Constr.*, 10(2), 139 (2006).
- [2] M. F. Montemor, M. P. Cunha, M. G. Ferreira and A. M. Simões, *Cement Concrete Comp.*, 24(1), 45 (2002).
- [3] S. Masoud and K. Soudki, *Cement Concrete Comp.*, 28(10), 969 (2006).
- [4] J. Li, J. Gong and L. Wang, *Constr. Build. Mater.*, 23(7), 2653 (2009).
- [5] C. Lee, J. F. Bonacci, M. D. A. Thomas, M. Maalej, S. Khajehpour, N. Hearn, S. Pantazopoulou and S. Sheikh, *Can. J. Civil Eng.*, 27, 941 (2000).
- [6] L. K. Spainhour, I. A. Wootton and N. Yazdani (Effect of Composite Fiber Wraps on Corrosion of Reinforced Concrete Columns in a Simulated Splash Zone), in *Proceedings of the 3rd International Conference on Composites in the Infrastructure*, June, San Francisco, USA (2002).
- [7] M. F. Montemor (Estudo da deterioração por corrosão de estruturas de Betão Armado). Dissertação para a obtenção do grau de Doutor, IST, Lisboa (1995)
- [8] S. Gadve, A. Mukherjee and S. N. Malhotra, *Constr. Build. Mater.*, 23(1), 153 (2009).
- [9] I. A. Wootton, L. K. Spainhour and N. Yazdani, *J. Compos. Contr.*, 7(4), 339 (2003).
- [10] M. Yaqub, and C. G. Bailey, *Compos. Struct.*, 93(3), 1103 (2011).
- [11] K. W. Neale, *Progr. Struct. Eng. Mater.*, 2(2), 133 (2000).

- [12] H. Toutanji, L. S. Mathtys and K. Audenaert, (Behaviour of large-scale columns confined with FRP composites), in *Proceedings of the 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering- CICE*, Adelaide, Australia (2004).
- [13] H. V. S. GangaRao, N. Taly and P. V. Vijay (Reinforced Concrete Design with FRP Composites), CRC Press (2007).
- [14] Y. A. Al-Salloum (Experimental and Analytical Investigation of Compressive Strength of FRP-Confined Concrete), Final Report, King Saud University, Kingdom of Saudi Arabia (2007).
- [15] A. Parvin, W. Wang, *Compos. Struct.*, 58(4), 539 (2002).
- [16] R. Benzaid, N. E. Chikh and H. Mesbah, *J. Civ. Eng. Manag.*, 14(2), 115 (2008).
- [17] R. Sen, *Progr. Struct. Eng. Mater.*, 5(2), 99 (2003).
- [18] C. Khoe, R. Sen and V. R. Bhethanabotla, *J. Compos. Constr.*, 15(4), 513 (2011).
- [19] M. Chauvin, C. Shield, C. French and W. Smyrl (Evaluation of Electrochemical Chloride Extraction (ECE) and Fiber Reinforced Polymer (FRP) Wrap Technology), Final Report, University of Minnesota, Minnesota, USA (2000).
- [20] D. A. Koleva *et al.*, *Cement. Concrete Comp.*, 30(8), 731 (2000).
- [21] B. Sena da Fonseca, A. S. Castela, M. G. S. Ferreira, R. G. Duarte, M. A. G. Silva and M. F. Montemor (Assessment of the effect of GFRP on the corrosion of steel reinforcement in confined RC by EIS), in *Proceedings of 10th Symposium on Electrochemical Methods in Corrosion Research*, Nov., Maragogi, Brasil (2012).
- [22] NP EN 206-1:2005. (Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade), IPQ, Caparica (2005).
- [23] M. A. G. Silva, *Compos. Struct.*, 79(1), 97 (2007).
- [24] A. S. Maxwell, W. R. Broughton, G. Dean and G. D. Sims (Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials), NPL Report-DEPC MPR 016 (2005).
- [25] S. Popineau, C. Rondeau-Mouro *et al.*, *Polymer*, 46(24), 10733 (2005).
- [26] D. Dunn (Update on Engineering and Structural Adhesives), Smithers Rapra Technology (2010).
- [27] P. Vaddadi, T. Nakamura *et al.*, *Compos. Part A: Appl. S.*, 34(8), 719 (2003).
- [28] C. Khoe, R. Sen and V. Bhethanabotla, *J. Compos. Constr.*, 15(4), 513 (2011).