

## SENSOR DE CLORETOS PARA MONITORIZAÇÃO *IN-SITU* DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

M. F. Montemor<sup>(1)(\*)</sup>, J. H. Alves<sup>(1)</sup>, A. M. Simões<sup>(1)</sup>, J. C. S. Fernandes<sup>(1)</sup>, Z. Lourenço<sup>(2)</sup>  
A. J. S. Costa<sup>(3)</sup>, A. J. Appleton<sup>(3)</sup>, M. G. S. Ferreira<sup>(1)(4)</sup>

Artigo submetido em Junho de 2006 e aceite em Setembro de 2006

### RESUMO

A monitorização *in-situ* do teor de cloretos poderá vir a constituir um procedimento extremamente importante na prevenção e no controlo do fenómeno de corrosão em estruturas de betão armado. Assim sendo, o desenvolvimento de sensores é fundamental para a monitorização contínua do teor de cloretos em estruturas de betão. Os sensores devem apresentar determinadas características, tais como durabilidade e fiabilidade, bem como operacionalidade numa gama alargada de concentrações de cloretos.

O presente trabalho tem como objectivos o desenvolvimento e teste de um sensor de cloretos baseado em eléctrodos de Ag/AgCl para monitorização *in-situ* de estruturas de betão armado. O sensor de cloretos foi testado em soluções que simulam o ambiente alcalino do betão e em provetes de argamassa. Os resultados obtidos demonstram boa estabilidade bem como boa operacionalidade numa vasta gama de concentrações.

**Palavras Chave:** Sensor de Cloretos, Betão Armado, Corrosão

## CHLORIDE SENSOR FOR *IN-SITU* MONITORING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

### ABSTRACT

*In-situ* monitoring of the chloride content could be one of the most important procedures in preventing and controlling chloride-induced corrosion in reinforced concrete structures. Thus, the development of chloride sensors is of paramount importance for the continuous monitoring of concrete structures. The chloride sensors must present long lifetime and reliability and they must operate in a wide range of chloride concentrations.

The present work aims at developing and testing a sensor based on Ag/AgCl electrodes for *in-situ* monitoring of chloride ions in reinforced concrete structures. The multiprobe sensor presented in this work was tested in mortar and concrete specimens, revealing good stability. The results reveal that the Ag/AgCl sensor presents good sensitivity in a wide range of chloride concentrations.

**Keywords:** Chloride Sensor, Concrete, Reinforcing Steel, Corrosion

### 1. INTRODUÇÃO

A corrosão do aço de reforço constitui uma das principais causas da degradação de estruturas de betão armado, especialmente quando a estrutura está exposta a ambientes agressivos. Os agentes corrosivos mais importantes na corrosão das armaduras são o dióxido de carbono e os iões cloreto. Em ambientes marítimos, os iões cloreto provocam corrosão localizada do aço, reduzindo a secção transversal dos varões. Por outro lado, a acumulação de produtos de corrosão na interface aço/betão gera tensões internas expansivas que criam fendas e conduzem à delaminação do recobrimento. Em casos extremos o recobrimento de betão pode ser completamente destruído.

Em estruturas de betão armado os danos causados por corrosão podem ser muito elevados e as soluções para prevenir e minimizar esses danos são em geral dispendiosas. Deste modo, a prevenção do fenómeno de corrosão surge como uma das melhores opções. A determinação do teor de cloretos é em geral feita recorrendo à recolha de amostras, obtidas por perfuração do betão a várias profundidades. As amostras recolhidas são depois submetidas a ataque químico e analisadas de modo a determinar o teor total de cloretos. No entanto, este método é destrutivo.

Os eléctrodos de Ag/AgCl são muito utilizados no ramo analítico devido à sua sensibilidade aos iões cloreto. Contudo, o seu comportamento em ambientes alcalinos, como o betão (pH 12 – 13), tem sido pouco estudado [1-4]. *Atkins et al.*

<sup>(1)</sup> Instituto Superior Técnico, DEQ/ICEMS, Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>(2)</sup> ZetaCorr, Lda. Urbanização J. M. Simões nº 8, 2560 Torres Vedras, Portugal

<sup>(3)</sup> Instituto Superior Técnico, DECivil, Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>(4)</sup> Universidade de Aveiro, Dep. Eng. Cerâmica e Vidro, 3810-193 Aveiro, Portugal

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

[3] refere que factores tais como a temperatura e a presença de iões brometo podem afectar as leituras de potencial dos eléctrodos de Ag/AgCl. Também é referido na literatura [4] que os sensores de Ag/AgCl quando utilizados em betão são estáveis apenas por curtos períodos de tempo ( $\approx$  três meses).

Apesar destas limitações os eléctrodos de Ag/AgCl continuam a ser a opção mais adequada para monitorização do teor de cloretos em estruturas de betão armado. Neste trabalho pretende-se combinar as potencialidades destes eléctrodos para desenvolver um sensor, resistente, fiável e simples de instalar em estruturas de betão armado. O sensor de cloretos de Ag/AgCl estudado neste trabalho foi obtido por anodização de fios de prata. O sensor permitiu determinar o teor de cloretos a várias profundidades em provetes de argamassa e a partir daí, construir um perfil de cloretos.

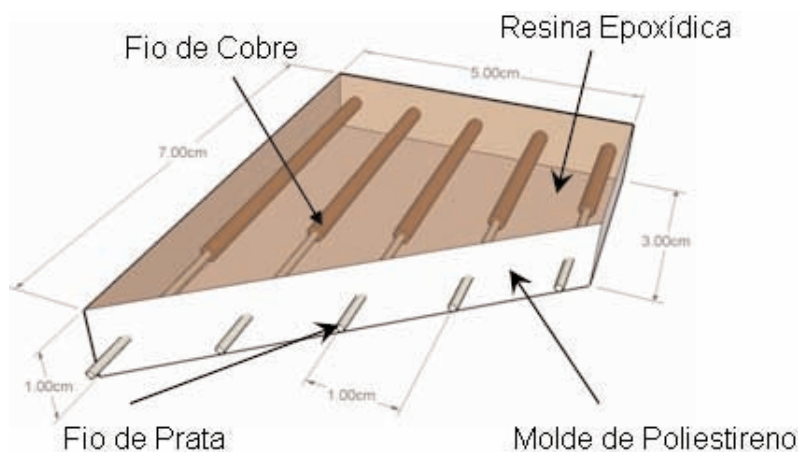


Fig. 1 – Esquema do sensor de cloretos.

## 2.2 Calibração em solução

Os sensores de Ag/AgCl foram calibrados em várias soluções de NaCl. Todas as medições foram comparadas com os valores determinados com um eléctrodo selectivo de cloretos (Consort®), demonstrando boa concordância.

A resposta dos sensores em meio alcalino foi testada em soluções saturadas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , contendo concentrações de iões cloreto numa gama compreendida entre 5 e  $5 \times 10^4$  ppm. Os ensaios foram efectuados a diferentes temperaturas: 5, 15 e 50 °C.

## 2.3 Ensaios em provetes de argamassa

Prepararam-se provetes de argamassa de razão água/cimento (a/c) igual a 0,6. Utilizou-se para o efeito cimento Portland comercial, areia e água destilada. Estas amostras foram sujeitas a um processo de cura durante uma semana em ambiente saturado. A sonda de cloretos, constituída por cinco sensores, foi introduzida no interior dos provetes de argamassa. O primeiro sensor da sonda encontrava-se a 1 cm de profundidade, o segundo a 2 cm e assim sucessivamente até 5 cm.

Foi montado um reservatório no topo dos provetes de argamassa. Os provetes foram expostos a: água destilada, solução de NaCl 3% (massa) e solução de NaCl 5% (massa) Figura 2.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Preparação do sensor de cloretos (SMC)

Foram utilizados fios de prata polidos que foram limpos numa solução de  $\text{NH}_4\text{OH}$  (10 vol.%) durante seis horas. Depois da imersão, os fios foram lavados com água destilada e anodizados durante 30 minutos numa solução de 0,1 M HCl à temperatura ambiente com uma densidade de corrente de 2,0 mA/cm<sup>2</sup>, de acordo com o procedimento descrito na literatura [5]. Os fios de prata foram soldados a uma fio de cobre e foi montado um conjunto de cinco sensores num molde preenchido com resina epoxídica. A disposição dos sensores foi feita de modo a minimizar os efeitos geométricos na difusão dos iões cloreto – Figura 1.

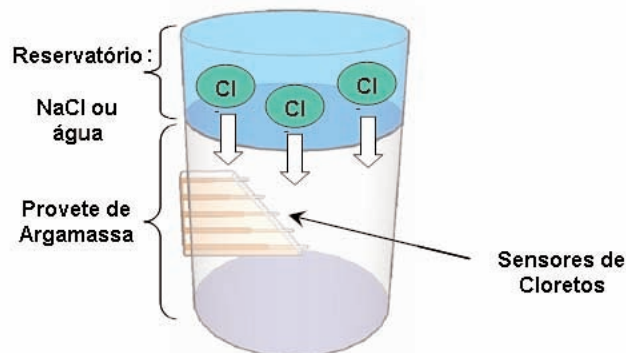


Fig. 2 – Esquema da sonda múltipla de cloretos embebida nos provetes de argamassa.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de calibração obtidas em solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  encontram-se representadas na Figura 3. A resposta do sensor é linear e os respectivos coeficientes de correlação encontram-se apresentados na Tabela 1. As leituras de potencial são idênticas às obtidas com o eléctrodo selectivo de cloretos comercial. O declive das rectas apresenta um ligeiro decréscimo com a temperatura – Tabela 1

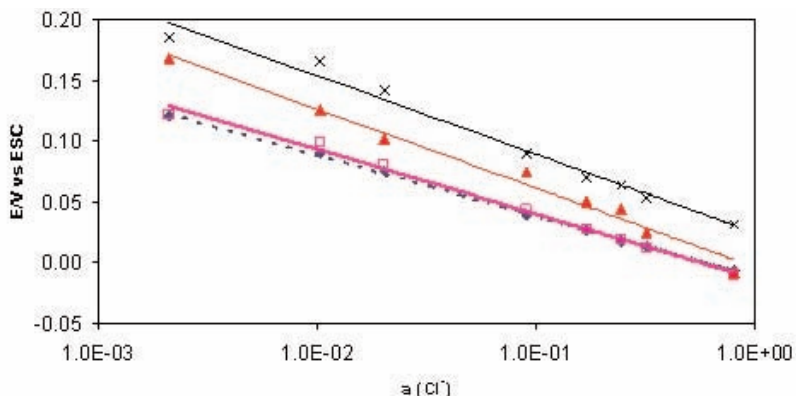


Fig. 3 – Curvas de calibração obtidas em soluções saturadas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  contaminadas com diferentes concentrações de íons cloreto a diferentes temperaturas ◆5°C, □15°C, ▲50°C, X Consort® 15°C.

**Tabela 1**  
Parâmetros relativos à Figura 3

Temperatura / °C	Declive / V	R <sup>2</sup>
5	-0,0218	0,9986
15	-0,0280	0,9923
50	-0,0282	0,9849

A Figura 4 apresenta a evolução do potencial dos sensores de cloretos embedidos em provetes de argamassa. Os resultados mostram que o potencial dos sensores permanece praticamente constante ao longo do tempo. O valor médio do potencial registado para este ensaio é de cerca de 0,25 V (correspondendo à ausência de NaCl). As leituras são independentes da profundidade a que o sensor se encontra.

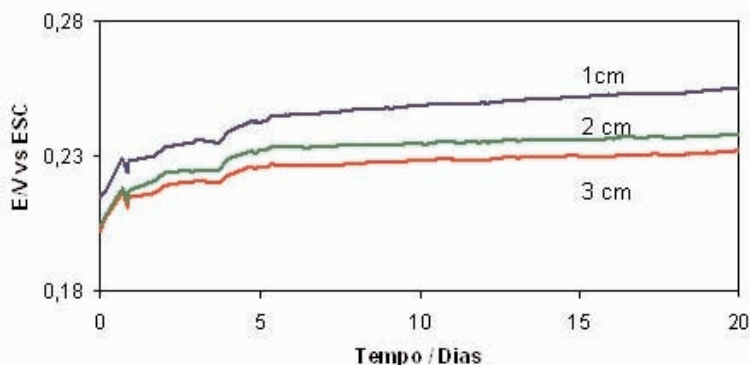


Fig. 4 – Potencial da sonda de cloretos em provetes de argamassa expostos a água destilada para os sensores com diferentes espessuras de recobrimento (indicado no gráfico).

A evolução do teor de cloretos no sensor embedido no provete de argamassa exposto à solução de NaCl 3% (massa) é apresentada na Figura 5. O potencial decresce com o tempo, até atingir um patamar cujo valor depende da espessura do recobrimento. Os valores de potencial mais baixos correspondem ao

sensor localizado a menor distância (1 cm) do reservatório de NaCl. Os valores médios no patamar de estabilidade foram utilizados para obter os perfis de cloretos apresentados na Figura 6. Como se pode observar os teores de cloretos, para cada profundidade aumentam ao longo do tempo até estabilizarem.

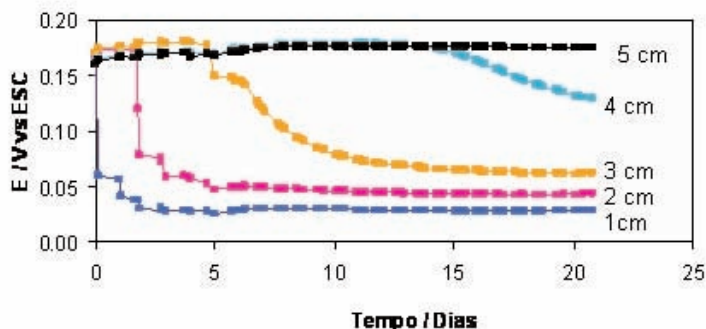


Fig. 5 – Potencial dos sensores introduzidos no provete exposto a NaCl 3% (massa) para diferentes espessuras de recobrimento.

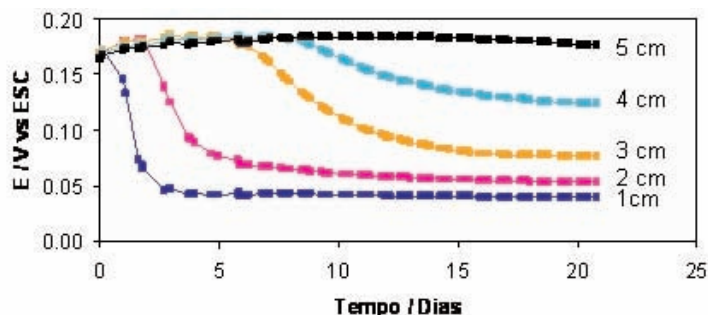


Fig. 6 – Potencial dos sensores introduzidos no provete exposto a NaCl 5% (massa) para diferentes espessuras de recobrimento.

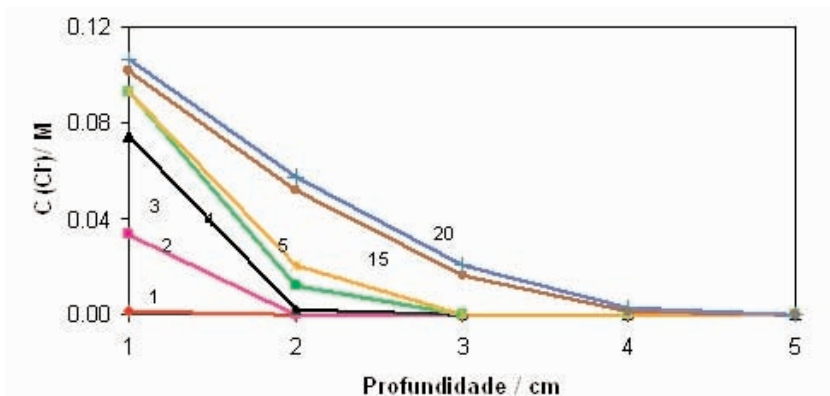


Fig. 7 – Perfis de concentrações de cloretos no provete de argamassa exposto a 3% (massa) NaCl para vários tempos de imersão (indicados no gráfico).

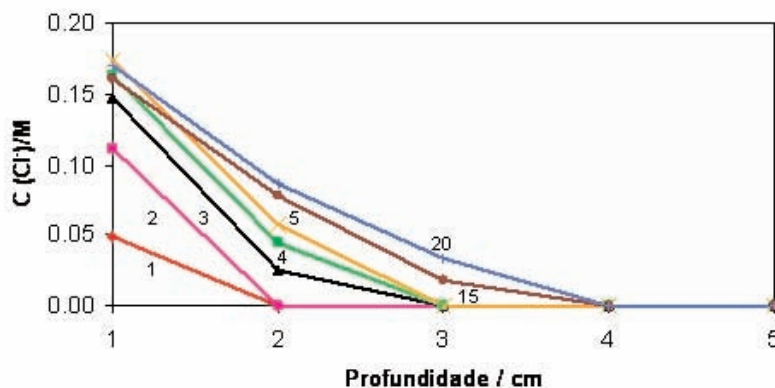


Fig. 8 – Perfis de concentrações de cloretos no provete de argamassa exposto a 5% (massa) NaCl para vários tempos de imersão (indicados no gráfico).

Os perfis de cloretos obtidos para o provete exposto à solução de NaCl indicam que o sensor é sensível à evolução da frente de cloretos. Os resultados mostram ainda que o sensor pode ser utilizado para monitorizar perfis de cloretos a diferentes profundidades.

Uma questão importante e não discutida no presente trabalho é a estabilidade do sensor a longo prazo e que será objectivo de estudos a desenvolver.

#### 4. CONCLUSÕES

O sensor desenvolvido neste trabalho permite a determinação do teor de cloretos em soluções que simulam a

solução electrolítica intersticial do betão. O sensor apresenta uma resposta linear, sendo o declive sensível ao aumento da temperatura no intervalo compreendido entre 5 e 50 °C.

O sensor permite ainda a monitorização da evolução da frente de cloretos em provetes de argamassa.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro no âmbito do projecto CATÓDICA POCTI/POSI (ADI). Os autores agradecem a J. P. Matos.

## REFERÊNCIAS

- [1] C. P. ATKINS, J. D. SCANTELBURY, P. J. NEDWELL, S. P. BLATCH, *Cement. Concrete. Res.*, 26, 319 (1996).
- [2] W. J. MCCARTER, O. VENNESLAND, *Constr. Build. Mater.*, 18, 351 (2004).
- [3] C. P. ATKINS, M. A. CARTER, J. D. SCANTELBURY, *Cement. Concrete. Res.*, 31, 1207 (2001).
- [4] M. A. CLIMENT – LLORCA, E. VIQUEIRA-PÉREZ, M. LÓPEZ-ATALAYA, *Cement. Concrete. Res.*, 26, 1157 (1996).
- [5] D. J. G., IVES, G. J., JANZ, Reference Electrodes, chapter 4, Academic Press, New York (1961).
- [6] D. IZQUIERDO, C. ALONSO, C. ANDRADE, M. CASTELLOTE, *Electrochim. Acta*, 49, 2731 (2004).

## “Corrosão e Protecção de Materiais” conta com o apoio da

### FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

através do seu programa **FACC/2006**

Apoio do programa operacional *Ciência, Tecnologia e Inovação*  
do quadro comunitário de apoio III



## SERVIÇOS

Assistência Técnica  
Laboratório  
Logística  
CPU - Know How

## PRODUTOS

Fosfatação  
Cataforese  
Primários  
Basecoat  
Verniz  
Floculação

Parque de Fornecedores da Auto Europa  
Quinta da Marquesa, Lote 11  
2950-557 Quinta do Anjo - Palmela - Portugal  
Tel. : 21 213 79 00 - Fax. : 21 213 79 13