

Aplicação da técnica de polarização linear para detectar corrosão em concreto armado atacados por SO_4^- e Cl^-

Helton G. Alves¹, Kátya D. Neri², Pablo R. R. Ferreira³, Eudésio O. Vilar⁴, Gibson R. Meira⁵

^{1,2,4} Depto. Engenharia Química, UFCG

^{3, 5} Depto. Tecnologia em Construção de Edifícios, IFPB

e-mail: helton.02@hotmail.com

RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto armado está relacionada a vários fatores, dentre eles o meio ambiente o qual está inserido que desempenha um papel fundamental na corrosão da armadura. No presente trabalho, estudamos o comportamento de estruturas de concreto com fatores água/cimento (0,3; 0,4; 0,6), submetidos a características do meio ambiente que compõe uma unidade de produção de cloro-soda. Para a realização dos ensaios eletroquímicos utilizamos a técnica de polarização linear (PL). Certificamos que a relação água/cimento e o tipo de solução agressiva foram fatores determinantes para a corrosão.

Palavras-Chave: corrosão em concreto armado; técnica de polarização Linear (PL); despassivação; concreto.

ABSTRACT

The durability of concrete structures is associated to several factors, including the environment where it is inserted that plays a key role in the corrosion of the reinforcement. This paper aims at studying the behavior of concrete structures, compounded of water and cement (0.3, 0.4, 0.6), subjected to environmental features of a chlorine-alkali production unit. The linear polarization technique (LPT) was used to promote the electrochemical experiments. We certify that the water-cement relation and the type of aggressive solution were determining factors for corrosion.

Keywords: Corrosion in reinforced concrete; linear polarization technique (LPT); depassivation; concrete.

INTRODUÇÃO

A tradicional concepção do concreto armado como um material de grande durabilidade e resistência é invariavelmente questionado devido ao surgimento de um número cada vez maior de situações de deterioração prematura. Logo, a durabilidade passou a ser uma propriedade tão ou mais desejada do que a resistência. Segundo Helene (1993) os problemas mais comuns nas estruturas de concreto com relação à durabilidade são devido à corrosão de armadura, responsável por aproximadamente 52% das manifestações patológicas registradas em estruturas.

A corrosão da armadura é um dos problemas mais críticos, podendo comprometer severamente a segurança e a capacidade de serviço das estruturas.

Um dos principais fatores que provocam a corrosão é o meio ambiente o qual a estrutura está inserida. Dentre os principais agentes iniciadores do processo corrosivo estão o CO_2 e os íons cloretos. Embora esses íons sejam os principais agentes agressivos, são diversos os casos registrados de ataque ao concreto com ácidos.

A atmosfera industrial segundo Helene (1986) pode acelerar em 60 a 80 vezes mais o processo de corrosão, quando comparados às situações equivalentes em atmosfera rural, isto ocorre devido à ação de gases ácidos que reduzem a alcalinidade do concreto ou mesmo diminuem fisicamente a camada de revestimento facilitando a penetração e a ação dos agentes agressivos.

A escolha adequada do tipo de cimento e a

relação água/cimento são fatores importantes na durabilidade da construção. Segundo Gentil (1996) para estruturas sujeita a ação de sulfatos, ou do ácido sulfúrico, deve-se usar cimento com teor de aluminato tricálcio inferior a 8%, preferencialmente o tipo Portland V e recomenda a adição de pozolanas para diminuir a porosidade e aumentar resistência a ataques químicos. Mehta e Monteiro (1994) afirmam que a porosidade é um agente físico do controle da taxa de deterioração representada pela relação água/cimento. Quanto maior a relação a/c maior a facilidade da entrada de agentes agressivos.

De acordo com Kropp et al. (1995), citado por Tavares, M, L. (2006), os principais mecanismos de transporte dos agentes agressores do concreto são:

Difusão (transporte de massa por movimento aleatório dos íons na solução presente nos poros);

Permeabilidade (penetração de gases ou líquidos nos poros, devido a uma pressão representada pela lei de Darcy);

Absorção capilar (transporte de líquidos em sólidos porosos, devido à tensão superficial nos vasos capilares), e;

Migração iônica como uma movimentação de íons que se dá pela corrente gerada pela ação de um campo elétrico aplicado ao processo.

A corrosão da armadura pode ser definida como deterioração ocasionada por fenômenos químicos ou eletroquímicos com influência do meio ambiente. A corrosão de armaduras induzidas por íons de cloretos é caracterizada por um ataque localizado (corrosão puntiforme de elevada periculosidade para o metal) com desenvolvimento de regiões ativas e passivas. A coexistência dessas áreas na mesma armadura pode formar um curto-circuito galvânico com uma alta corrente de corrosão (I_{corr}) na área ativa. No caso do ácido sulfúrico, a deterioração é acelerada, porque além da ação ácida, há a formação de íons sulfatos (SO_4^{2-}). O que podem causar a expansão do material, facilitando mais a entrada de agentes agressivos.

Das várias técnicas utilizadas para estudo de corrosão a polarização linear (LPR) é mais aplicada,

devido à rapidez e comodidade com que se podem determinar as velocidades de corrosão, a elevada reprodutibilidade, à facilidade de interpretação dos dados adquiridos e a possibilidade de aplicação in situ.

De acordo com Wolynech (2003) a resistência à polarização (R_p) de um sistema corrosivo é definida como o declive da curva de polarização do potencial elétrico da armadura ou metal (E) em função da intensidade da corrente de polarização (IE) ao potencial de corrosão da armadura (E_{corr}), ou seja:

$$R_p = \frac{a \times c}{2,3 A I_{corr} (a \times c)} \quad (01)$$

Onde:
A = área da armadura
a e c = parâmetros de Tafel
 $\frac{a \times c}{2,3(a+c)} = B = 26mV$

De acordo com Stern-Geary $\frac{a \times c}{2,3(a+c)}$ é uma constante denominada B. Que através de ensaios experimentais foi estabelecido no valor de 26mV. Através da constante B e o valor de R_p calculamos a corrente de corrosão.

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (02)$$

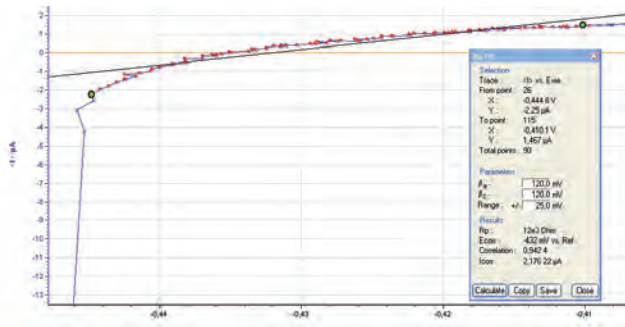
A equação (01) é conhecida como equação de Stern-Geary e R_p é designada como resistência de polarização. R_p é o declive, no potencial de corrosão, da tangente à curva experimental traçada no gráfico E versus i . A equação (01) pode ser simplificada a equação (03), onde a resistência à polarização está relacionada com a velocidade de corrosão, I_{corr} e densidade da corrente de corrosão que flui entre as zonas anódicas e catódica durante a corrosão.

$$R_p = \lim_{i \rightarrow 0} \frac{E}{I} \quad (03)$$

Viedma; Castellote; Andrade; (2006) afirmam a despassivação da armadura quando os potenciais de corrosão assumem valores mais negativos que -350mV e a faixa limite da densidade de corrente de (0,1-0,2mA/cm³) e o R_p diminui conforme o avanço da despassivação.

As determinações do E_{corr} (potencial de corrosão), I_{corr} (densidade de corrente de corrosão), R_p (resistência de polarização) e IR (queda ôhmica) foram obtidos pelo software V9.55. Ver gráfico 01.

Gráfico 01
Curva de Polarização do Eletrodo de trabalho 17



Este trabalho tem como objetivo validar o potencial de corrosão (E_{corr}), corrente de corrosão (I_{corr}) e R_p das armaduras submetidas ao ataque do cloreto e ácido sulfúrico além de comparar a despassivação do aço nas diversas matrizes do concreto em relação ao percentual água/cimento.

METODOLOGIA UTILIZADA

Os ensaios eletroquímicos foram realizados no laboratório de Engenharia Eletroquímica (Leeq/UAEQ/UFCG) e as moldagens dos corpos de prova foram realizadas no Instituto Federal da Paraíba - IFPB.

Nesta pesquisa foram dois tipos de variáveis envolvidas: As variáveis independentes que estão relacionadas às características do concreto e as variáveis dependentes relacionadas ao monitoramento eletroquímico (densidade de corrente de corrosão – I_{corr} e potencial de corrosão – E_{corr}). Que permitem o monitoramento do processo de corrosão e a identificação do comportamento passivo ou ativo do aço em função dos cloretos que chegam à armadura.

Os corpos-de-prova foram moldados de forma geométrica prismática de 8x8x8cm. Utilizamos o cimento CPV – (cimento Portland de alta resistência inicial) e agregados miúdos (areia e brita). Três tipos de concreto foram estudados em relação água/cimento (a/c) 0,3; 0,4 e 0,6. Para cada relação a/c foram moldados seis corpos de prova, nos quais duas barras de aço tipo CA-50 de 6,3mm de diâmetro foram adicionadas ao corpo de prova, para aplicação da técnica de resistência de polarização e obtenção de I_{corr} e E_{corr} .

Para simular o meio agressivo industrial e acelerar a despassivação foram utilizados três tipos de soluções: a primeira NaCl 1M (imersos os dois primeiros

CP'S de cada tipo de concreto); a segunda NaCl 1M + H_2SO_4 0,4% (imersos o terceiro e o quarto CP'S de cada tipo de concreto) e a terceira $MNaCl$ + H_2SO_4 2%(imersos o quinto e o sexto CP'S de cada tipo de cimento). A ação do ciclo de molhagem e secagem que acelerar o processo de corrosão. De acordo com Mehta (1994) os íons SO_4 e Cl^- são considerados nocivos ao concreto de cimento Portland.

Os ensaios de corrosão foram realizados no potenciostato modelo VMP3 da PAR (Princeton Applied Research – USA). Através do programa gráfico EC-Lab software V9.55 as curvas de polarização foram plotadas em relação ao potencial do eletrodo aplicado e a correspondente corrente média do potenciostato. O valor do potencial permite avaliar se o aço da armadura se encontra num estado de corrosão ativa. De acordo com Andrade e González (1981) os potenciais de corrosão assumem valores mais negativos que -350mV e faixa de limite da densidade da corrente de corrosão (0,1 – 0,2 $\mu A/cm^2$).

Na prática as determinações de I_{corr} , E_{corr} e R_p fazem-se variando o potencial da armadura entre (-10mV a +10mV). Utilizamos cobre/sulfato de cobre (Sat.) como eletrodo de referência, uma chapa de aço inox como contra eletrodo e o aço de cada armadura como eletrodo de trabalho. Todos os eletrodos são conectados diretamente aos terminais do potenciostato tornando possível medir o potencial de corrosão. (Figura 01).

Figura 01 – Montagem experimental para determinação do potencial de despassivação da armadura através da técnica de polarização linear. Temperatura = 26±1°C.



RESULTADOS

O monitoramento da despassivação do aço foi realizado através de ensaios eletroquímicos feitos duas vezes por semana com imersão e sem imersão para acelerar a corrosão. Ao atingirem potenciais com valores menores que -350mV e a densidade de corrente de

corrosão ultrapassar a faixa limite de $0,1 - 0,2\mu\text{A}/2\text{cm}$ mostra que o aço atingiu a despassivação.

No Gráfico 02 indica os resultados obtidos no monitoramento eletroquímico da armadura até atingir sua despassivação, para as diferentes relação a/c submetidas ao ataque de 1M NaCl e $2\% \text{H}_2\text{SO}_4$.

Certificamos que o concreto com maior relação água/cimento $a/c=0,6$, despassivou em menor tempo de exposição (100 dias) atingindo potenciais menores que (-350mV), e o concreto com menor relação $a/c=0,3$ oxidou com 275 dias, ou seja, quanto maior a relação água/cimento mais rápido será a despassivação do aço, devido a sua porosidade. No Gráfico 03 indica os valores das densidades das correntes de corrosão dessas armaduras despassivadas na faixa de ($0,1 - 0,2\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Nos Gráficos 04 e 06 indicam as despassivações das armaduras submetidas ao ataque das soluções agressoras de $\text{NaCl} + 0,4\%$ de H_2SO_4 e NaCl . Nestes gráficos não tem o monitoramento eletroquímico do concreto 0,3 porque não despassivaram, o mesmo continua em ensaios com 763 dias de tempo de exposição. Os gráficos 05 e 07 indicam as densidades das correntes de corrosão dessas armaduras despassivadas, observa-se que os valores das correntes de corrosão permaneceram na faixa de ($0,1 - 0,2\mu\text{A}/\text{cm}^2$) indicando sua despassivação.

Ao ser detectado a corrosão da armadura através dos ensaios eletroquímicos os corpos de prova foram imediatamente retirados dos ensaios corrosivos para em seguida serem rompidos para constatação

Gráfico 02-Variação entre potencial de corrosão com o tempo de exposição das armaduras para cada tipo de concreto (a/c)

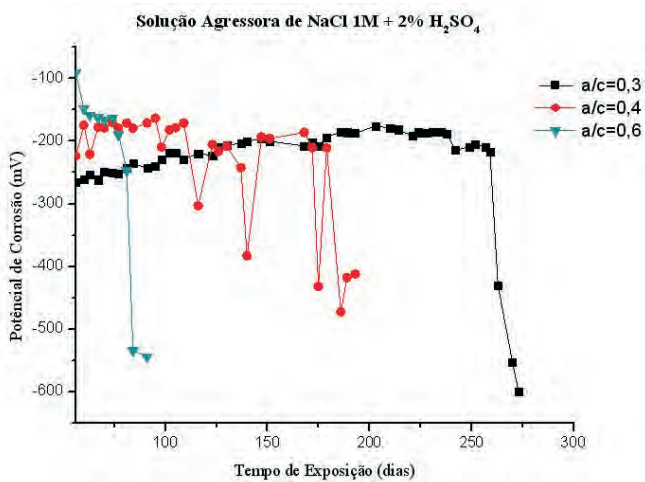


Gráfico 03 – Variação da corrente de corrosão com o tempo de exposição das armaduras para cada tipo de concreto (a/c)

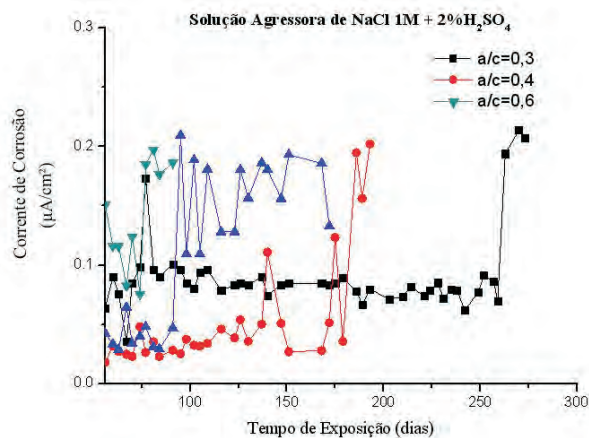


Gráfico 04-Variação entre potencial de corrosão com o tempo de Exposição das armaduras para cada tipo de concreto (a/c)

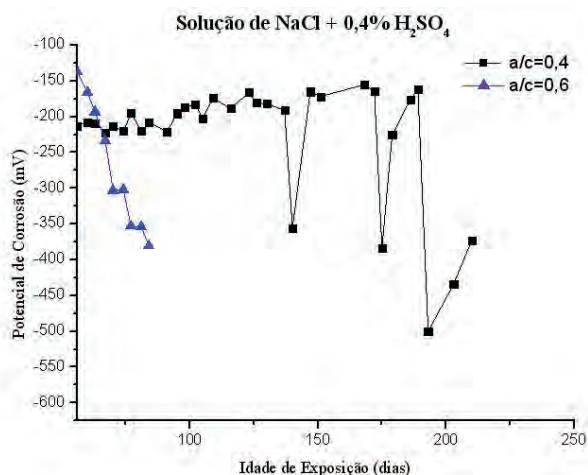


Gráfico 05 – Variação da corrente de corrosão com o tempo de exposição das armaduras para cada tipo de concreto (a/c)

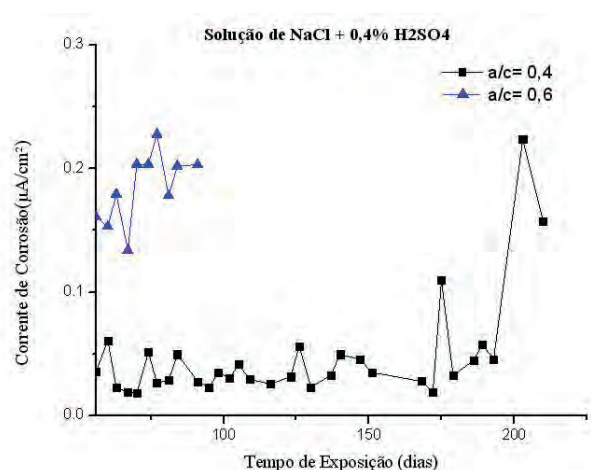


Gráfico 06-Variação entre potencial de corrosão com o tempo de exposição das armaduras para cada tipo de concreto (a/c)

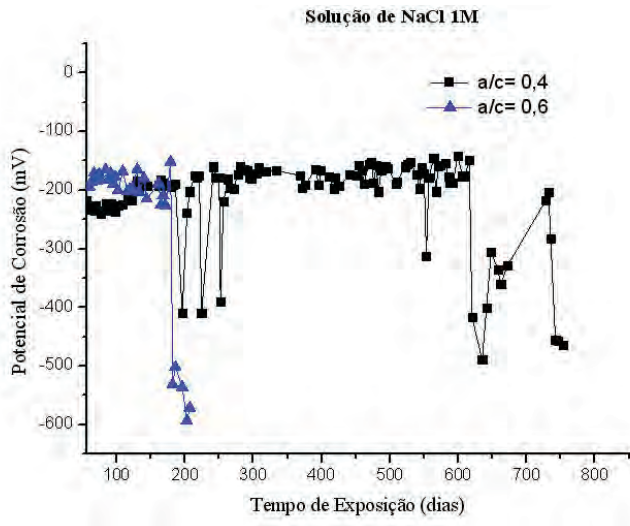
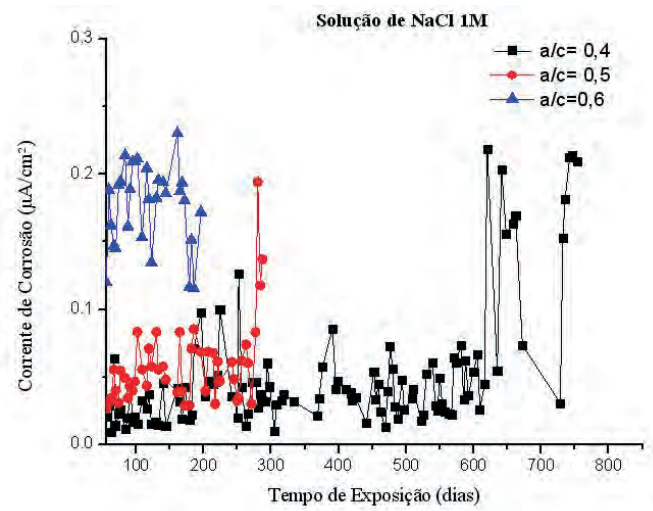


Gráfico 07 – Variação da corrente de corrosão com o tempo de exposição das armaduras para cada tipo de concreto (a/c)



da oxidação. (Figuras 2 e 3).

O tipo de concreto utilizado, a quantidade de água/cimento são alguns dos fatores que indicam a sua durabilidade, pois a permeabilidade (porosidade) facilita os íons de cloretos (Cl⁻) e sulfatos (SO₄²⁻) chegarem ao interior do concreto através do processo de difusão ou capilaridade originando o ataque localizado no eletrodo de trabalho.

A corrosão da armadura do concreto é de grande importância, pois provoca não somente a sua deterioração, mas também pode afetar a estabilidade e a durabilidade da estrutura. A armadura não é suscetível a sofrer corrosão, devido à alta alcalinidade do concreto, garantindo a durabilidade do conjunto. Porém

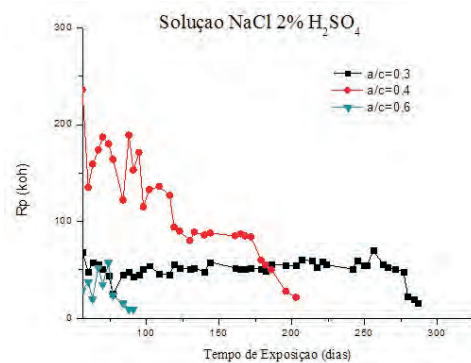
contaminações com produtos químicos favorecem a despassivação do ferro diminuindo drasticamente a resistência. Wolyneq (2003) afirma que o Rp diminui, significa que a corrosividade do meio aumenta. No Gráfico 08 observamos que o Rp diminuiu para os quatro tipos de concreto em relação ao fator a/c atacados com solução de NaCl 1M + 2% de H₂SO₄, conforme o avanço da despassivação.

A deterioração por ação química pode ocorrer na pasta do cimento e no agregado, observando a lixiviação dos componentes com o aparecimento do aspecto típico do agregado e a expansibilidade do concreto provocando fissuras que facilitam a entrada do agente químico no interior da matriz de concreto.



Figura 02 - CP despassivado

Gráfico 08 – Variação do Rp com o tempo de exposição das armaduras para cada tipo de concreto (a/c)



CONCLUSÕES

De acordo com o monitoramento eletroquímico, através da técnica de polarização linear (PL) a despassivação do aço assumi valores mais negativos que (-350mV); as correntes de corrosão permaneceram na faixa limite (0,1 – 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) e o R_p diminui conforme o avanço da despassivação. Concluímos que a relação água/cimento foi fator determinante na corrosão da armadura em concreto, ou seja, quanto maior a relação a/c mais poroso é o concreto, conseqüentemente os íons de cloretos (Cl^-) e sulfatos (SO_4^{2-}) chegam com maior facilidade ao seu interior, ocorrendo a despassivação.

Certificamos que a intensidade do ácido sulfúrico contribui com a aceleração da despassivação, isto é, a solução agressora de NaCl contendo 2% de ácido sulfúrico foi a única a despassivar o concreto 0,3, considerado um concreto muito resistente, em relação aos demais analisados.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro, ao Laboratório de Engenharia Eletroquímica (LEEq – UFCG) onde foram realizados os ensaios eletroquímicos e ao IFPB onde foram moldados os corpos de prova.

REFERÊNCIAS

- 1)GENTIL, Vicente. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 4.^a ed. 1996.
- 2)HELENE, P.R.L. **Corrosão das armaduras em concreto armado**. São Paulo, PINI, 1986.
- 3)HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. 231 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
- 4)MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.



Figura 03- corrosão do aço

- 5)VIEDMA, P. G. de; CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C. **Comparison between several methods for determining the depassivation threshold value for corrosion onset**. J. Phys, IV France 136, 79-88, 2006.
- 6) ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. **Técnicas electroquímicas cuali y cuantitativas para medir los efectos de las adiciones sobre la corrosión de las armaduras**. Materiales de Construcción, n 182,p. 69 – 78.1981.
- 7)TAVARES, M, L. **Estudo do processo de corrosão por íons de cloreto no concreto armado utilizando armaduras comuns e galvanizadas**. Porto Alegre, 2006. 132p. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.
- 8)WOLYNEC, Stephan. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 2003.