
Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Distintas formas de corrosão das armaduras de estruturas em concreto armado: uma revisão

Tatiana Conceição Machado Barretto^a, Igor Machado da Silva Parente^b

Abstract

Concrete is one of the most used materials in the world, so it is very important to study this type of material and the structures in which they are used. Many constructions are made with reinforced concrete are affected by several pathologies, both in the pulp and in the armors, caused by physical and chemical factors. One of the main pathologies that affect reinforced concrete is the corrosion of its reinforcement. Porosity, exposure to aggressive agents are the main factors that promote the destabilization of the armature and allow degradation of the same. However, for corrosion, three factors are needed: electrolyte, potential difference and oxygen. Many structures in reinforced concrete undergo electrochemical corrosion with the presence of oxygen and the formation of iron oxide, the so-called "red corrosion", where the aggressive agent, usually chloride ions, comes into contact with the reinforcement and causes degradation. But this is not the only form of corrosion of the armor, it can be found, under special conditions and the absence of oxygen, or black corrosion. In this paper, the forms of corrosion that affect reinforced concrete reinforcement will be discussed.

Keywords: reinforced concrete, corrosion, Black rust.

Resumo

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, por esse motivo é muito importante estudar este tipo de material e as estruturas em que são utilizados. Muitas construções são confeccionadas com concreto armado são atingidas por diversas patologias, tanto na pasta, quanto nas armaduras, ocasionadas por fatores físicos e químicos. Uma das principais patologias que atingem o concreto armado é a corrosão de suas armaduras. Porosidade, exposição a agentes agressivos são os principais fatores que promovem a despassivação da armadura e permitem com que ocorra a degradação da mesma. Porém, para que haja corrosão são necessários três fatores: eletrólito, ddp e oxigênio. Muitas estruturas em concreto armado sofrem corrosão eletroquímica com presença de oxigênio e formação de óxido de ferro, a conhecida "corrosão vermelha", onde o agente agressivo, em geral os íons cloretos, entram em contato com a armadura e promovem a degradação. Mas essa não é a não é a única forma de corrosão das armaduras, pode-se encontrar, em condições especiais, e a com ausência de

^a Doutorando, Engenheiro Civil - Universidade Federal da Bahia

^b Mestrando, Engenheiro Civil - Universidade Federal da Bahia

oxigênio, ou corrosão negra. Neste trabalho, serão discutidas as formas de corrosão que atingem as armaduras de concreto armado.

Palavras-chave: Concreto armado, corrosão, corrosão negra, corrosão por correntes de fuga.

Introdução

Patologia das construções necessita de uma avaliação multidisciplinar com o objetivo de se estudar as origens da ‘doença’, suas formas de manifestação e atuação. Para ser considerado um sintoma patológico, é necessário que o mesmo danifique alguma das exigências da estrutura, sejam elas as capacidades mecânica, estética ou funcional. (1).

Há uma relação direta entre patologia e desempenho da estrutura, já que a medida da primeira depende da segunda. Outros dois pontos importantes para a análise das patologias são o tempo e as condições de exposição. Esses fatores estão associados a o conceito de durabilidade, vida útil e desempenho. (1).

Os agentes causadores de manifestações patológicas possuem diversas origens, desde falha humana, tanto no projeto como execução, até problemas com a estrutura química dos componentes dos materiais, ou ainda, ataques de agentes agressivos ao material concreto e às armaduras. Para uma melhor compreensão das causas e origens, estas foram divididas e detalhadas em três grandes grupos: causas intrínsecas de manifestações patológicas, causas extrínsecas, e processo físico de deterioração do concreto armado. (2).

O conhecimento aprofundado das causas de deterioração do concreto é de suma importância, visto que possibilitará identificar, e desta forma evitar as possíveis causas de degradação do concreto, que, podem ser de origem química, por conta das reações de troca entre um fluido agressivo e componentes da pasta de cimento endurecida, reações envolvendo hidrólise e lixiviação dos componentes da pasta de cimento endurecida e reações envolvendo formação de produtos expansivos, e podem ser de origem física.

As causas químicas de deterioração podem ser internas ao material ou externas, como o ataque químico devido à ação de íons agressivos, como cloretos, sulfatos, dióxido de carbono, entre outros. (3). A corrosão das armaduras é uma das principais patologias que atingem o concreto. Fatores como porosidade, exposição a agentes agressivos promovem a despassivação da armadura, aliados a presença de um eletrólito, ddp e oxigênio, permitem com que ocorra a degradação da mesma. Mas o processo corrosivo pode se apresentar de formas distintas nas armaduras, a mais comum, “corrosão vermelha”, ou em condições especiais, as corrosões por correntes de fuga e a com ausência de oxigênio, ou corrosão negra. Este trabalho trata-se de uma revisão de literatura, em que serão discutidas as formas de corrosão que atingem as armaduras de concreto armado.

Corrosão das Armaduras de Estruturas em Concreto Armado

Define-se corrosão como sendo um processo de deterioração dos materiais, com perda de massa, devido à ação do meio ambiente. Este processo ocorre de forma espontânea devido à necessidade dos materiais em atingir seu estado de menor energia, ou seja, mais estável. Na natureza, em seu estado de menor energia, os metais são encontrados na forma de compostos (sob a forma de óxidos ou sais metálicos, na forma de sulfetos, carbonatos e silicatos) (4).

A corrosão pode ser classificada como química ou eletroquímica. A primeira, também chamada de corrosão seca, ocorre na presença de gases com a formação de uma película de

óxido. A segunda, chamada de aquosa, só ocorre em presença de umidade e de um eletrólito, havendo movimento de elétrons ao longo de trechos da armadura e movimento iônico através do eletrólito (1). Segundo Helene (5), o mecanismo predominante de corrosão em concreto armado é o eletroquímico. Quando se trata de um processo eletroquímico, a corrosão pode ser classificada também, como sendo a reação de oxi-redução da superfície dos materiais, onde ocorre um fluxo de elétrons e íons entre a região catódica e anódica com formação de uma pilha eletroquímica (6).

Como se trata de um mecanismo eletroquímico, para que ocorra a corrosão são necessários fatores, como a presença de um eletrólito, diferença de potencial, oxigênio e agentes agressivos (7). Para que se inicie o processo torna-se necessário a despassivação da armadura, que permite a propagação do fenômeno e depende de diversos condicionantes que irão determinar a sua intensidade e velocidade. Alguns dos principais elementos que contribuem com o desenvolvimento da corrosão em armaduras de concreto armado são a umidade e temperatura. A primeira devido à presença da água que atua como eletrólito durante o processo eletroquímico e a segunda promovendo o estímulo e aceleração da velocidade da reação de oxi-redução, favorecendo o transporte de íons (4).

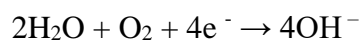
A passivação é relativa à perda de reatividade química de certos metais e ligas sob condições particulares. Sua formação se dá em ambiente altamente alcalino onde forma-se uma película protetora de caráter passivo. O concreto possui uma alta alcalinidade oriunda das reações de hidratação dos silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), que liberam certa porcentagem de $Ca(OH)_2$ promovendo a passivação da armadura (8). Alterações no pH do interior de uma estrutura de concreto armado torna a película passiva instável, causando o fenômeno de despassivação, a qual pode ser provocada pela ação de agentes agressivos, tais como: dióxido de carbono (CO_2) e cloretos (8).

Para Ribeiro (8), a corrosão da armadura pode ser equacionada resumidamente da seguinte forma:

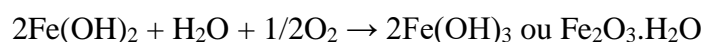
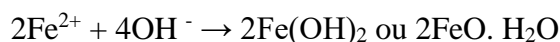
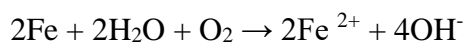
- a) Na região do ânodo, o ferro perde elétrons, acarretando na dissolução do metal (processo de oxidação):



- b) Na região do cátodo, em meios neutros e aerados, se processa a redução:



- c) 3. Tendo como reação global, as seguintes reações de corrosão, com formação da ferrugem:



O mecanismo é ilustrado Figura 1.

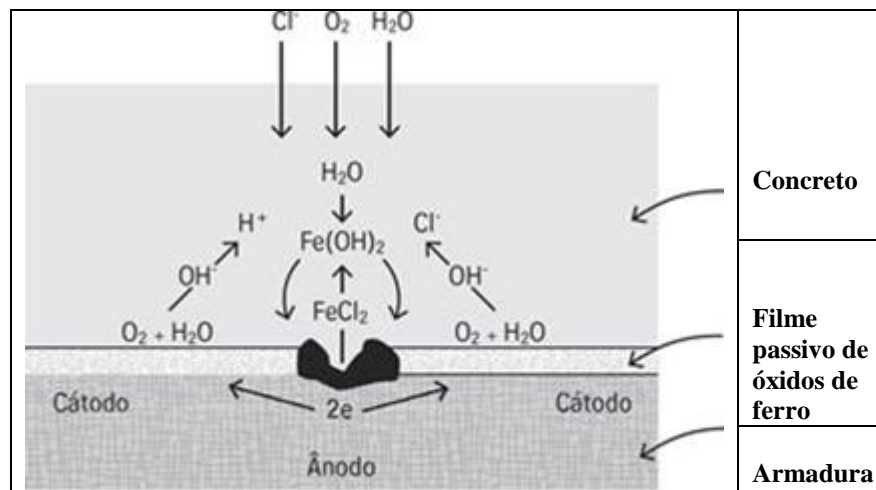


Figura 1. Modelo de corrosão da armadura. (7)

Diversas são as consequências advindas do processo corrosivo em estruturas de concreto armado. Tal ação provoca a redução do desempenho estrutural das construções civis, reduzindo seu tempo de vida útil. Um grande problema relativo à corrosão é devido ao fato de que diversas propriedades estruturais podem ser afetadas de forma simultânea, intensificando a degradação da estrutura (9).

As principais consequências da corrosão na armadura do concreto se apresentam na forma de perda de aderência entre o aço e o concreto, redução da área da seção transversal das barras de armadura, desenvolvimento de tensões radiais de tração que afetam o concreto, deslocamento do concreto, alteração da capacidade de resistência à tração, entre outros (6)

- I. Aderência entre o aço e o concreto: Uma vez iniciada a corrosão, a aderência entre o aço e o concreto é prejudicada pelo acúmulo de produtos de corrosão ao longo da barra de armadura.
- II. Redução da área da seção transversal das barras de armadura: ao ser atacada por agentes causadores de corrosão, a exemplo dos cloretos, na armadura são formados pites. Nestes pontos, a seção de armadura pode ficar comprometida, com elevada redução da mesma, o que pode levar a ruptura total de certos trechos da barra.
- III. Desenvolvimento de tensões de tração, fissuração e deslocamento: Os produtos formados na corrosão, ocupam um volume maior (de 3 a 10 vezes) que do aço original. Este aumento de volume cria altas tensões internas contra o concreto circundante (superiores a 15 MPa), o que gera sua fissuração e o deslocamento na direção paralela à armadura corroída, que facilita a penetração de agentes agressivos, como o Cl^- , CO_2 , (10) (9). A Figura 2 ilustra o efeito dos produtos de reação.

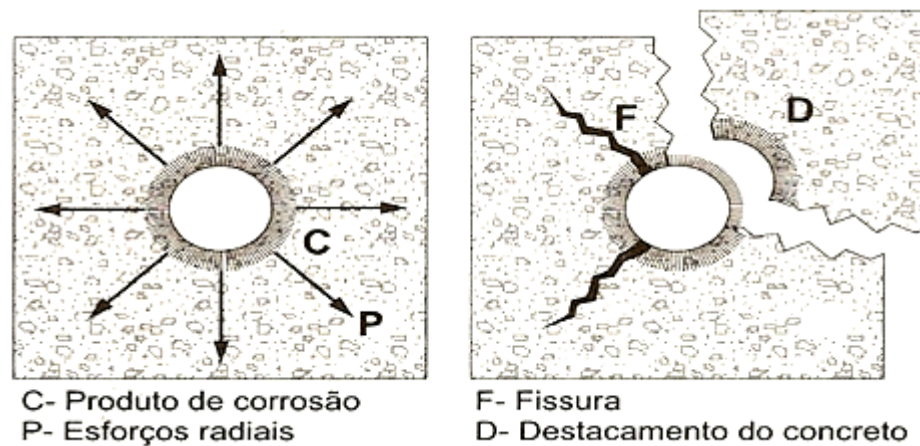


Figura 2. Esforços produzidos pelos produtos de corrosão, levando à ruptura do concreto. (10).

Santos (7) expõe que a corrosão eletroquímica está baseada na ocorrência um desequilíbrio elétrico entre metais diferentes ou entre distintas partes do mesmo metal. Tal configuração exemplifica a chamada pilha de corrosão ou célula de corrosão que tem seu processo iniciado após a ruptura do filme passivo.

Corrosão Negra

Existem alguns casos em que há ausência de oxigênio nos poros do concreto, como quando ocorre a imersão da estrutura em água. O processo de corrosão do aço nestes casos é denominado de corrosão anaeróbica e, apesar do seu estudo ser importante para inúmeras áreas como por exemplo calhas de maré e em estruturas de pontes, incluso cabos de pré-esforço em suas vigas, existindo muito pouca informação na literatura sobre esse processo e a formação da ferrugem. (8) (11)

A corrosão do aço é um processo eletroquímico que necessita de oxigênio na presença de umidade para ocorrer. O produto de corrosão, geralmente, ocupa um volume algumas vezes maior do que o aço não corroído, o que origina fissuras no concreto. Quando há restrição de oxigênio em ânodos ativos pode ser originada a ferrugem negra (Figura 3) formada pelo processo de corrosão anaeróbica. Este tipo de ferrugem não é expansivo, por esse motivo, a corrosão gerada no concreto armado é um dos mais difíceis de serem detectados e considerado mais grave do que a corrosão normal, devido ao fato de estar presente muito tempo antes de ocorrer evidências visíveis na superfície do concreto (11).



Figura 3. Ferrugem negra em viga de borda. Fonte: (11)

Segundo O'Donovan et. al (11), para que a corrosão anaeróbica ocorra, são necessárias algumas condições concomitantes: disponibilidade de oxigênio no cátodo; existência de um meio que condicione o livre fluxo de elétrons da região anódica para sítios catódicos; e o ânodo está em um ambiente com deficiência em oxigênio.

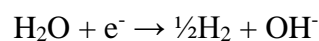
O fluxo de elétrons de locais anódicos para catódicos é conseguido quando a resistividade elétrica do concreto é reduzida a menos de 12 kΩcm. Essa redução é conseguida devido à presença de íons altamente condutores, como cloretos ou nitratos. É importante saber que, taxas de corrosão do aço sob condições anaeróbicas variam de 0,1 a 7,0 μm por ano. (11)

As condições anaeróbicas em concreto armado podem ocorrer quando o ânodo está desprovido de oxigênio por fatores como sistemas de impermeabilização de concreto, acumulação da camada de ferrugem, revestimento em reforço de aço ou dentro de concreto submerso. (11)

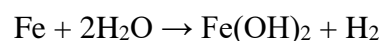
A corrosão do aço é um processo eletroquímico e em condições anaeróbicas a reação de interesse é a dissolução anódica de ferro:



A redução catódica:



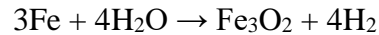
A reação de corrosão global pode ser escrita como:



A reação de Schikkor converte $\text{Fe}(\text{OH})_2$ para Fe_3O_4 :



Alternativamente, a formação de Fe_3O_4 pode ser escrita como:



Na Figura 4 podem ser observados os mecanismos de corrosão anaeróbica da literatura para a formação de ferrugem preta e verde.

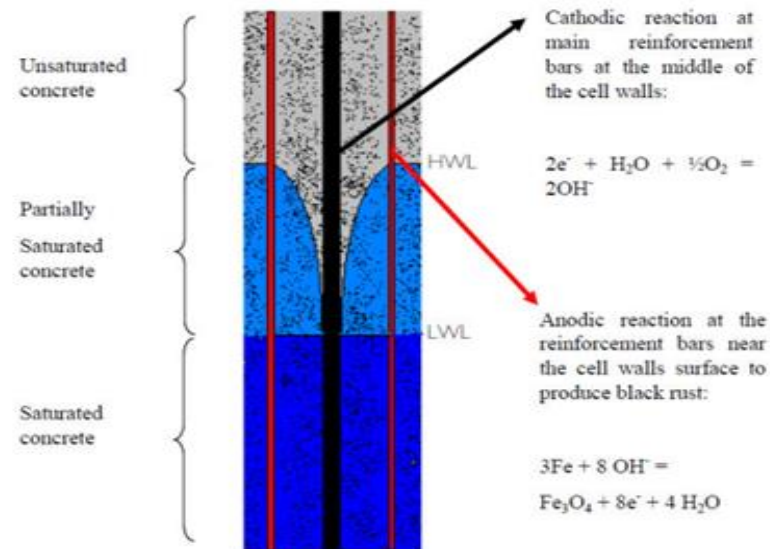


Figura 4. Formação de ferrugem negra em canalizações. (11).

O produto de corrosão resultante pode apresentar coloração verde ou preta, por este fato é conhecido como ferrugem verde ou negra. Imagina-se que o produto verde seja um complexo de cloreto já o produto negro é uma combinação de óxido férrico e ferro. (11)

A ferrugem negra é descrita como sendo um produto esponjoso e solúvel em água. Este não é um material cristalino e ocupará espaços disponíveis, tais como vazios e poros, ou planos de fratura dos concretos (se a fissuração estiver presente por outras causas) sem exercer pressão expansiva sobre o mesmo. É possível que ocorram manchas de ferrugem na superfície do concreto, pois o produto da corrosão é relativamente instável, podendo migrar lentamente para a superfície onde, se o oxigênio é mais abundante, pode formar manchas de ferrugem marrom/laranja convencionais, ou seja, converte a ferrugem negra em óxido férrico, ou pode simplesmente ser perdido na água do mar (Figura5). Portanto, o período inicial após a ruptura do concreto pode ser crucial para que a presença de corrosão anaeróbia sejam identificados corretamente. (11)



Figura 5. Corrosão negra. Fonte: (11)

Uma vez que existem poucos sinais exteriores deste mecanismo, e embora este processo seja geralmente lento, uma perda significativa de metal pode ocorrer ao longo do tempo com subsequente perda de integridade estrutural e possível falha súbita e catastrófica. Mesmo o concreto sendo de alta qualidade e densidade, pode corroer por este mecanismo. (11)

A presença de corrosão anaeróbica pode ser indicada pelos seguintes métodos de detecção: observação da coloração vermelha da ferrugem presente na superfície do concreto, medição de potenciais de meia-célula, teste de continuidade elétrica, teste de cloretos e perfurações no concreto. (11)

Conclusões

Entender as causas de degradação do concreto armado ajuda a criar estruturas mais duráveis, e que não passem por muitas intervenções corretivas ao longo de sua vida útil, ganhando em qualidade, economia e atendendo as novas necessidades competitivas e exigências de sustentabilidade do setor da construção.

As formas mais difundidas que visam garantir a durabilidade do concreto armado incluem: assegurar cobertura mínimo das armaduras e adequado fator água/cimento em função dos macros e microclimas, correto adensamento e cura do concreto. Porém, de acordo com pontos abordados nesse trabalho, essas medidas podem não ser suficientes para combater a corrosão das armaduras de estruturas de concreto. Observou-se que fatores externos, não ligados diretamente a construção, como o ambiente de exposição, mas devem ser considerados no projeto, são decisivos e de extrema importância.

O tema é bastante amplo e importante, o que gera grande quantidade de livros, dissertações, teses e outras publicações. As medidas de combate dos fatores degradantes do concreto passam por um bom planejamento, boa execução e realização de manutenções periódicas. De acordo com a regra de Sitter, o custo inicial para a construção de uma obra em que são observadas medidas de combate dos fatores degradantes são mais altos quando comparados a construções que não tomam essas precauções e podem estar em meios agressivos de deterioração, porém, esse custo é recuperado à longo prazo, uma vez que é mais caro executar intervenções corretivas do que intervenções preventivas.

Portanto, é necessária a ciência dos vários fatores envolvidos na durabilidade das estruturas de concreto e quanto antes são realizadas ações de combate à esses agentes mais econômica irá ficar a construção.

Referências bibliográficas

- (1) ISAIA, G.C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, v.1 e v. 2, IBRACON: São Paulo, 2005.
- (2) GONÇALVES, E. A. B. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. Monografia. UFRJ. Rio de Janeiro. 2015.
- (3) NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São paulo: PINI, 1997. p. 503-510.
- (4) RIBEIRO, D.V; ALMEIDA, F. C.R.A.; CUNHA, M.P.T.; HELENE, P.R.L.; LOURENÇO, M.Z.; SALES; A.; DE SOUSA, C.A.C. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro, Elsevier Brasil, 2014. v. 1. 244p.
- (5) HELENE, P. R.L. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado**. 3ª reimpressão (fev. 96). São Paulo, PINI, IPT, 1986.
- (6) FORTES, LYTTELTON REBELO, **Corrosão na armadura do concreto armado e sua avaliação pela técnica do potencial de eletrodo**, dissertação de mestrado UFCE. Fortaleza, 1995. 228p.
- (7) SANTOS, Aleíson Vilas-Bôas dos. **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido à carbonatação**. Revista online IPOG – Especialize. 2015.
- (8) RIBEIRO, D.V. **Influência da Adição da Lama Vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado**. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2010. 260 p.
- (9) GRAEFF, Ângela Gaio. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2007.

- (10) CASCUDO, O, **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, GO: Editora UFG, 1997. 237p.
- (11) O'DONOVAN, R. ; O'Rourke, B. D. ; Ruane, K. D; Murphy, J. J. ."Anaerobic Corrosion of Reinforcement", Key Engineering Materials, Vols. 569-570, pp. 1124-1131, 2013.
- (12) SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 161p. Dissertação (Mestrado em estruturas), Departamento de Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- (13) RODRIGUES, Joaquim. Corrosão no concreto armado; A proteção Catódica no Concreto Armado. **Revista Recuperar** nº 33, p. 4 -27 Rio de Janeiro, Ed. Thomastec, 2000.
- (14) SANTOS, Aleíson Vilas-Bôas dos. **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido à carbonatação**. Revista online IPOG – Especialize. 2015.
- (15) CASIMIRO, Paulo Jorge Nico. **Materiais de contacto com água para consumo humano, mecanismos de degradação e contaminação**. 2010. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2010.
- (16) BOTELHO, A. P.; SILVA, D. S. **Corrosão de Armadura em Estruturas de Concreto Armado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade da Amazônia, Belém, Pará. 2008. 85p.
- (17) CORSINI, R. Ambientes Agressivos. **Revista Técnica**. Edição 196. Editora PINI. São Paulo, SP. 1 julho 2013. P. 36-39. Disponível em: < <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/196/artigo294033-1.aspx>> Acesso em 22 dezembro 2016.
- (18) FIGUEIREDO, E. P. **Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, IBRACON, Cap. 27, p.829 – 855, V. 2, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005
- (19) GENTIL, V. **Corrosão**. 4º ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003. 341p.

-
- (20) LAPA, J. S. **Patologia, Recuperação e Reparo das Estruturas de Concreto**. Monografia (Especialização em Construção Civil). Escola de Engenharia Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais. 2008. 56p.
- (21) LIMA, M.G. **Ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto**, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, Cap. 24, p.713 – 772, V.1, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2011
- (22) LIMA, M.G. **Ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto**, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, Cap. 21, p.733 – 751, V.1, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005
- (23) METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. IBRACON. 3ª edição. 2008. 674p.
- (24) POLDER, R. B.; ROOIJ, M. R. Durability of marine concrete structures – field investigations and modelling. **Heron Journal**, Vol. 50, N° 3, 2005, p. 133 – 153.
- (25) PONTE, Maria José J. S.. **Capítulo 3 – Formas de Corrosão**. Notas de aula. Universidade Federal do Paraná. 2012.