

ANÁLISE DE ÍONS DE CLORETO E SUA INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE ENVELHECIMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO *

Ana Paula dos Santos Pereira¹

Flavio James Humberto Tomassini Vieira Ramos²

Marcelo Henrique Prado da Silva³

Resumo

As estruturas de concreto presentes em zonas de alto índice de agressividade, como as zonas próximas ao litoral, são propícias ao ataque de agentes químicos agressivos, como no caso o ataque por íons de cloretos, resultando na corrosão da armação e posteriormente a degradação do concreto e sua desagregação, tendo assim a funcionalidade da estrutura comprometida. Com a finalidade de estudar o comportamento do concreto no meio agressivo a metodologia empregada foi o processo acelerado de envelhecimento de concreto, sendo o período máximo de 120 dias, e em paralelo a esse processo foram realizados testes de compressão axial nas idades de 7, 28, 60, 90 e 120 dias, como também, testes de cloretos, condutividade, sólidos totais dissolvidos, salinidade, no mesmo período. Mediante aos testes realizados, pode-se observar o efeito dos cloretos nas estruturas de concreto, mas incisivamente na armadura, já o concreto apresentou uma patologia que não é levada muito em consideração que é a eflorescência, e a sua atuação se tornou bem visível após o período de 60 dias.

Palavras-chave: Concreto; Envelhecimento; Corrosão; Durabilidade.

ANALYSIS OF CHLORIDE IONS AND ITS INFLUENCE IN THE PROCESS OF AGING OF CONCRETE STRUCTURES

Abstract

Concrete structures present in areas of high aggressiveness, such as areas near the coast, are prone to attacks by aggressive chemical agents, such as chloride ion attack, resulting in corrosion of the frame and consequent concrete degradation and its breakdown, structure functionality committed. In order to study the behavior of the concrete in the aggressive environment, the methodology used was the accelerated process of aging of the concrete, with a maximum period of 120 days, and parallel to this process axial compression tests were performed at the ages of 7, 28, 60, 90 and 120 days, as well as tests of chloride, conductivity, total dissolved solids, salinity, in the same period. Through the tests, it is possible to observe the effect of the chlorides in the concrete structures, but in an incisive way in the reinforcement, already the concrete presented a pathology that does not take into account that is the efflorescence, and its performance became very visible after the period of 60 days.

Keywords: Concrete; Aging; Corrosion; Durability.

¹ Instituto Militar de Engenharia, Doutoranda em Ciência dos Materiais – Praça General Tibúrcio, 80, 22.290-270, Praia Vermelha, Urca, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

² Instituto Militar de Engenharia, Pós - Doutorado em Ciência dos Materiais – Praça General Tibúrcio, 80, 22.290-270, Praia Vermelha, Urca, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

³ Instituto Militar de Engenharia, Professor, D.C. em Engenharia Metalúrgica – Praça General Tibúrcio, 80, 22.290-270, Praia Vermelha, Urca, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os cloretos são íons abundantes nas águas presentes em regiões costeiras, e é nesse cenário que se instalam grandes obras da construção civil, como pontes, postes, portos e etc. Nestas estruturas tanto a parte metálica como a de concreto são desgastadas pelos processos de intemperismo e corrosão. No processo de corrosão, os cloretos agem diretamente na superfície metálica presente no concreto acelerando o processo de corrosão.

O concreto possui um papel de grande importância na construção civil, pois o mesmo se encontra em quase todas as obras já realizadas pelo setor da construção, como, por exemplo, nas fundações, obras de arte especiais como pontes, galerias e túneis, edifícios e em vários empreendimentos. Isso ocorre devido a sua versatilidade de uso, pois o concreto é um material que apresenta fluidez e plasticidade na sua forma fresca, que possibilita ser moldado e rigidez e resistência em sua fase final. Além disso, as matérias-primas de sua constituição são de fácil disponibilidade e de custo razoáveis, o que viabiliza seu uso corrente desde pequenos reparos a grandes obras de engenharia. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), com todas as vantagens apresentadas o concreto encontra-se em segundo lugar dentre os materiais mais consumidos no mundo, perdendo somente para a água.

A vida útil de uma estrutura de concreto esta intrinsecamente ligada à forma de como ela é projetada e executada, e a falta controle na elaboração e execução possibilitam o surgimento de patologias. As patologias de uma estrutura de concreto podem ser compreendidas em fissuras e trincas, desagregação, disgregação, segregação, manchas, eflorescência, calcinação, entre outras. E algumas dessas patologias podem estar diretamente associadas a presença de íons de cloreto na estrutura. E dentre elas a mais comum é a corrosão das armaduras, principalmente em estruturas aparente sujeitas a agentes externos.

O desgaste precoce do concreto armado e conseqüentemente a sua perda de desempenho, é uma variável que ocorre em todas as construções espalhadas no mundo. Esse desgaste se manifesta principalmente pela corrosão da parte metálica, ocasionando desprendimento do concreto e reduzindo a vida útil do mesmo. A corrosão da armadura caracteriza-se pelo processo eletroquímico entre um anodo e catodo, e água de mistura do concreto funciona como eletrólito, proporcionando assim, uma diferença de potencial gerando uma corrente, e inicia-se o processo de oxirredução, nesta matriz complexa.

2 DESENVOLVIMENTO

Foram realizados estudos do comportamento das estruturas de concreto, tendo como objetivo à avaliação dos cloretos como agente químico fundamental nos mecanismos de deterioração das estruturas, como também classificado os meios de acordo com a agressividade que os mesmos apresentam. Para compreensão dos cenários, foram verificadas as seguintes variáveis, como: dosagem do concreto

(traço), a relação água/cimento, condições de cura e as ações do meio que influenciará na durabilidade.

Para elaboração dos corpos de prova foi utilizado cimento CP IV - 32 da marca Nassau, o agregado miúdo foi de areia lavada, a qual possuía a presença de materiais orgânicos como folhas e gravetos, tendo que ser peneirada e posterior determinando o percentual de umidade; para o agregado graúdo, foi utilizado brita 0 (12mm); assim como água potável fornecida pela rede pública de abastecimento.

Os insumos acima listados foram utilizados, para obtenção de um concreto com 25 MPa de resistência, fator água/cimento de 0,55 e com um traço de 1:2:3. Os materiais foram misturados com o auxílio de uma betoneira, marca CSM e modelo CS 130L, de eixo inclinado até que a perfeita homogeneização dos constituintes fosse alcançada. Como se trata de uma investigação da atuação dos cloretos nas estruturas de concreto, os corpos de prova possuíam uma armação constituído por vergalhão de 6,3mm (1/4'), a qual foi posicionada no centro do cilindro, com o auxílio de um espaçador (conhecido como "bolacha") de concreto, com dimensões de 5x5x7cm³ moldadas em um gabarito de compensado, onde a ferragem foi fixada no centro da bolacha com 2cm de penetração. Foram utilizadas duas caixas d'água de polietileno com capacidade para 150 L, marca Fortlev, que funcionou como recipiente para o armazenamento da solução e dos corpos de prova durante o processo de envelhecimento do concreto. Em uma das caixas, foi utilizada uma solução de cloretos a 4,5% m/v, sendo esse um valor médio de cloretos encontrado na água do mar na maior parte do litoral brasileiro, e na outra caixa foi utilizada com água potável fornecida pela rede pública.

Foram confeccionados 30 unidades de corpos de prova cilíndrico nas dimensões de 100x200mm, sendo que após 24 horas da confecção, 15 desses corpos foram submetidos a uma cura por via úmida, de acordo com a NBR 9479/1994, com a presença de cloreto de sódio na solução e os outros 15 corpos de prova foram submetidos ao mesmo processo, sendo que a solução é neutra, sem cloreto. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial aos 7, 28, 60, 90 e 120 dias de idade. Com 24hs de antecedência ao ensaio, os corpos de prova foram retirados de seus devidos recipientes. Para cada idade do ensaio, foram utilizados três corpos de prova, para que o ensaio de compressão axial fosse realizado de acordo com a NBR 5739/2007.

Para melhor compreensão da teoria abordada na pesquisa, fez-se necessário o uso de alguns ensaios para mensurar e mostrar, de forma mais clara, os fenômenos que ocorreram nos cenários analisados, com foco em zonas costeiras. Como a pesquisa tem um enfoque na questão da durabilidade e funcionalidade da estrutura, foram realizados alguns testes de forma direta aos corpos-de-prova como: envelhecimento acelerado e compressão axial. Já para um melhor entendimento do meio em que as estruturas de concreto estavam inseridas, priorizou-se pela realização de testes de cloretos e salinidade das soluções, sendo estes realizados com o auxílio de um medidor portátil de EC/TDS/NaCl/°C, a prova de água, com gama automática e microprocessador da marca Hanna modelo HI 9835.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram simulados alguns cenários para avaliar o processo de envelhecimento acelerado do concreto. Para avaliação dos cenários, vários testes foram realizados, afim de gerar dados capazes de subsidiar a interpretação dos fenômenos observados.

Com base nos testes realizados, foram possíveis coletar alguns dados dos cenários que foram realizados nesta pesquisa. Logo abaixo serão apresentados e discutidos os resultados de cada teste de acordo com cada categoria de forma separada. Para cada ensaio foram mostrados os valores e as suas alterações em função dos períodos de exposições das amostras. Para os testes que foram realizados nas soluções, as alterações foram medidas a partir de uma solução inicial neutra (sem cloreto) e outra solução com concentração de 4,5% m/v de NaCl, com as seguintes características:

Tabela 1 - Características das soluções iniciais da câmara úmida

| Testes | Solução Neutra | Solução com 4,5% m/v de NaCl |
|--------------------|----------------|------------------------------|
| Salinidade (%) | 0,60 | 20,90 |
| Condutividade (mS) | 0,24 | 9,89 |
| Sólidos (TDS) | 0,12 | 5,03 |
| pH | 7,00 | 7,00 |
| Cloretos (mg/L) | 67,36 | 2322,00 |

Os ensaios observados foram divididos em dois cenários, cenário 1 atribuído para solução neutra e cenário 2 para solução salina. Sendo assim são apresentados na tabela 2 os resultados obtidos na análise de salinidade e cloretos, bem como o resultado do ensaio de compressão.

Tabela 2 – Ensaio analisados e parâmetros observados

| Ensaio realizado | | | | | | |
|------------------|------------------------|----------------------|---------|---------|---------|----------|
| Condições | Ensaio | Período de exposição | | | | |
| | | 7 dias | 28 dias | 60 dias | 90 dias | 120 dias |
| Cenário 1 | Salinidade (%) | 5,30 | 6,00 | 7,20 | 4,10 | 2,70 |
| Cenário 2 | | 24,00 | 27,00 | 29,30 | 26,30 | 24,00 |
| Cenário 1 | Cloreto (mg/L) | 53,18 | 53,18 | 53,18 | 60,27 | 60,27 |
| Cenário 2 | | 16.963 | 17.601 | 17.388 | 17.725 | 17.211 |
| Cenário 1 | Compressão axial (Mpa) | 22,79 | 27,25 | 37,10 | 33,52 | 28,83 |
| Cenário 2 | | 21,02 | 21,88 | 29,66 | 22,66 | 21,41 |

a) Teste de Salinidade

Para os dois cenários, observou-se uma alteração crescente da salinidade até o período de 60 dias, isso pode ser explicado através do o “amadurecimento” do concreto, que seria a finalização das reações do cimento, que pode ser evidenciado

na liberação de sais para o meio, para que o equilíbrio da solução fosse alcançado mediante a disponibilidade dos trocadores iônicos.

Com a remoção dos 60% dos corpos de prova, ocasionou um desequilíbrio na solução, de tal forma que favoreceu inversão do fluxo iônico que tinha se estabelecido inicialmente, já que os corpos de prova após a finalização de suas reações tornaram-se elementos receptores dos sais disponíveis em solução, trazendo assim uma redução no valor da salinidade conforme pode ser observado na tabela acima (tabela 2), nos períodos de 90 e 120 dias. O volume de solução se manteve constante, mas as disponibilidades dos trocadores iônicos mediante a presença de corpos de prova foram reduzidos, e a grande formação de carbonatos ocasionou uma diminuição na disponibilidade de sais na solução, reduzindo assim seus valores.

b) Teste de Cloretos

Na condição que os corpos de provas foram submetidos em solução neutra e salina, não houve variação significativa da quantidade de cloretos, mesmo sendo constatado um comportamento crescente ao longo dos dias de ensaios. Em relação a cenário 2, pode-se observar que os cloretos existentes favoreceram a corrosão da armadura, efeito esse não detectado no cenário 1. A presença da película de passivação, não é suficiente para impedir que a corrosão por íons de cloreto ocorra, pois os íons de cloreto atuam diretamente na destruição da película independente que qual pH o meio esteja. Já quando os íons estiverem presentes na camada do concreto, podem diminuir a resistividade do mesmo, já que o cloreto facilmente absorve umidade, favorecendo a corrosão da armadura (RIBEIRO, D.V et al, 2003), como pode ser observado na figura 1.

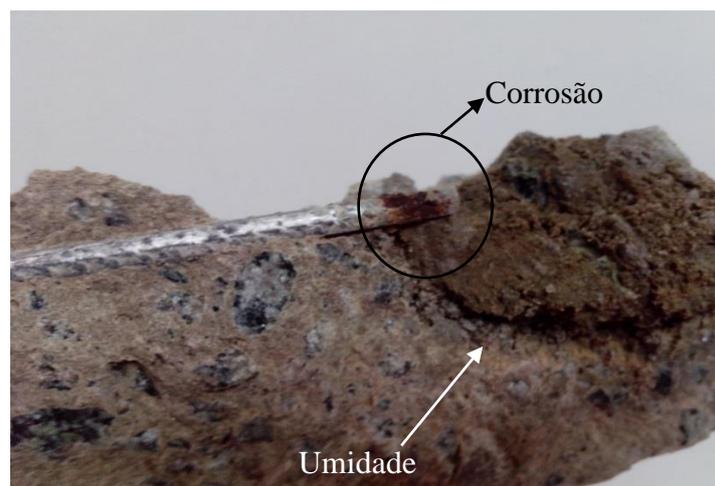


Figura 1 – Parte interna do CP

c) Resistência a Compressão

Para os cenários 1 e 2, observou-se uma alteração significativa crescente de resistência até o no período de 60 dias e após esse período há uma queda no valor da resistência. Isso se deve ao efeito da eflorescência no concreto. Esse fenômeno constitui-se no pelo acúmulo de cristais salinos na superfície do concreto, sendo o mesmo de característica pulverulento ou insolúvel em água, como pode ser visto na foto abaixo (Figura 2), e em grande parte é um fenômeno visível, mas em outros casos pode ocorrer somente no interior da estrutura, onde o mesmo traz danos no aspecto visual e mecânico do concreto. Observa-se também que o cenário 2, possuiu menores resistências, devido a solução alcalina que evidenciou o efeito da eflorescência. A eflorescência é o resultado da dissolução dos sais presentes na estrutura, mediante a contaminações externas e água atua como o agente de transporte desses sais através dos poros do concreto, e com o acúmulo de concentração dos sais na solução dar-se-á o processo de cristalização ou formação de precipitado na solução (UEMOTO, 1988). Quando eflorescência ocorre no interior da estrutura, a mesma é classificada com subeflorescência, pois a cristalização dos sais ocorre na rede de poros do concreto, produzindo assim esforços mecânicos não previstos, comprometendo a resistência mecânica e consequentemente a durabilidade da peça (MENEZES,2006).



Figura 2 - Efeito da eflorescência nos corpos de prova

3 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo estudar o comportamento de estruturas de concreto armado, por meio de teste acelerado de envelhecimento em solução de cloreto, a fim avaliar os cenários de exposição das estruturas de concreto, onde ocorre a troca química com o meio. Foram elaborados 30 corpos de prova armados, e submetidos a cura por via úmida, sendo 15 em solução neutra e os demais em solução salina, o mesmo processo ser repetiu os corpos de argamassa.

Após a avaliação dos resultados foi possível observar a relação de equilíbrio dos sais e suas influencias nas estruturas. Sendo assim também foi possível verificar

que a durabilidade das estruturas de concreto esta intrinsecamente ligada com a qualidade do projeto e especificações das estruturas, pois nessa etapa requer um maior empenho dos profissionais, para que custos futuros de reparos e manutenção sejam minimizados. Constatou-se que a agressividade do meio, a falta de controle na escolha dos materiais, elaboração do traço e execução, entre outros fatores, podem acarreta um acumulo de variáveis que possibilita a degradação dos corpos de concreto ao longo do tempo, sendo que a corrosão da armadura de concreto ser um dos fatores de maior impacto na redução da durabilidade do concreto.

Os principais agentes da corrosão da armadura do concreto são os íons de cloreto e o CO₂, onde o primeiro contribui na redução da resistência do corpo de concreto mediante a agressividade do meio, enquanto o outro contribui na redução do pH, que acarreta a redução da camada passivadora da armadura. Sendo que um dos principais fatores que aceleram o processo da corrosão da estrutura são o recobrimento e a qualidade do concreto.

Conclui-se que os sistemas estudados são fortemente influenciados pela presença de sais, mediante ao fenômeno de eflorescência dos corpos de prova, que após a cristalização desses sais na rede de poros, os mesmos contribuíram para perda de resistência mecânica, como foi analisada ao fim do período de 120 dias de estudo. A variação dos sais dissolvidos também pode ser considerada como determinantes nas propriedades químicas, físicas e mecânicas das estruturas de concreto, principalmente com o surgimento de pontos de corrosão na parte metálica da armação do concreto.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte à agência de fomento CAPES que possibilitou a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738. Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos**. Rio de Janeiro, 2003.
- 2 _____. **NBR 5739. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.
- 3 _____. **NBR 9479. Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto**. Rio de Janeiro, 1993.
- 4 BAUER, R.J.F. et. al. **Estudo da característica física e mecânica do concreto pelo efeito de vários tipos de cura**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 41,1999. Salvador-BA.Anais.Salvador: Instituto Brasileiro do Concreto, 1999. 1 CD-ROM
- 5 HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 271f. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 1993.
- 6 LIMA, E. **Tratamento de estruturas em concreto aparente**. Revista Tèchne, n.11, jul/ago, p. 22-24, 1994.
- 7 MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

- 8 MENEZES, R. R.; H. S. Ferreira; G. A. Neves; H. C. Ferreira, **Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção** – revisão, cerâmica v.52 n.321, São Paulo, jan./mar. 2006
- 9 NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.
- 10 RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENCO, M. Z.; HELENE, P. R. L. **Efeitos da ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto**. Cap.4, In: Daniel Vêras Ribeiro. (Org.). Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. 1ed.Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2013, v. 1, p. 51-72.
- 11 _____. **Princípios da corrosão eletroquímica**. Cap. 2, Daniel Vêras Ribeiro. (Org.). Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. 1ed.Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2013, v. 1, p. 13-35.
- 12 SONG, G. **Equivalent circuit model for SAC electrochemical impedance spectroscopy of concrete**. **Cement and Concrete Research**, v.30, n 11, p.1723-1730, 2003.
- 13 UEMOTO, K. L. **Patologia: danos causados por eflorescência**. Tecnologia de Edificações, São Paulo. PINI/ IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Coletânea de trabalhos da Divisão de Edificações do IPT. 1988. p. 561-64..