

RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS

CORROSÃO DE ARMADURAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

AVALIAÇÃO, DIAGNÓSTICO,
CAUSAS, PREVENÇÃO E
CONTROLE

ABRACO-RP-CAC-001-R01

V. 01012025

Total de páginas: 48

NOTA 1

A Associação Brasileira de Corrosão alerta os usuários: o uso de suas recomendações práticas requer conhecimento e experiência. O uso inadequado das mesmas e consequentes resultados impróprios não se constituem responsabilidade da Associação.

NOTA 2

É recomendável que todos os trabalhos relacionados aos sistemas de proteção anticorrosiva sejam executados por profissionais certificados conforme conforme Norma ABNT NBR 15.653.

COMPOSIÇÃO DO GRUPO DE TRABALHO EXECUTOR (2018)

O Grupo de Trabalho responsável pela elaboração da presente Recomendação Prática foi constituído pelas seguintes pessoas:

Aldo Cordeiro Dutra – Coordenador

Adriana de Araújo – Membro

Laerce de Paula Nunes – Membro

Luiz Eduardo Cardoso – Membro

Luiz Paulo Gomes – Membro

Ricard Suplicy Goes – Membro

COMPOSIÇÃO DO GRUPO DE TRABALHO REVISOR (2025)

Laerce de Paula Nunes – Coordenador

Felipe Barreto – Membro

Luiz Paulo Gomes – Membro

Camile Paula Theodoro – Membro

João Paulo Klausling Gervasio – Membro

SUMÁRIO

1.0	OBJETIVO	4
2.0	DOCUMENTOS NORMATIVOS DE REFERÊNCIA	4
3.0	RECOMENDAÇÕES BÁSICAS SOBRE O CONCRETO E A ARMADURA	6
4.0	CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL ÀS ESTRUTURAS DE CONCRETO	8
5.0	FATORES QUE INFLUENCIAM A DETERIORAÇÃO DO CONCRETO	8
6.0	PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO QUE AFETAM A ARMADURA.....	10
7.0	CORROSÃO DAS ARMADURAS	11
8.0	PREVENÇÃO E CONTROLE DA CORROSÃO	14
9.0	CONCLUSÃO.....	17
	ANEXO A – PROCESSOS DE FISSURAÇÃO E DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO	18
	ANEXO B – MECANISMO ELETROQUÍMICO ASSOCIADO À CORROSÃO EM CONCRETO	29
	ANEXO C – ARMADURA DE AÇO INOXIDÁVEL	32
	ANEXO D – USO DE INIBIDOR DE CORROSÃO	34
	ANEXO E – ARMADURAS COM REVESTIMENTO EM ZINCO POR IMERSÃO A QUENTE	35
	ANEXO F – PROTEÇÃO CATÓDICA DE ARMADURAS DE CONCRETO	38
	ANEXO G – INSPEÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO	44
	ANEXO H – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1.0 OBJETIVO

Esta Recomendação Prática tem por objetivo apresentar as causas e os mecanismos principais de deterioração das estruturas de concreto armado decorrentes da corrosão das armaduras, bem como indicar as recomendações básicas para avaliação, diagnóstico, prevenção e controle da sua corrosão.

A aplicação das recomendações feitas neste documento deve ser realizada por profissional com conhecimento em corrosão e concreto, ou por dois profissionais cada um especialista em uma destas áreas. Ressalta-se também que este documento se refere somente aos processos que afetam as armaduras do ponto de vista de corrosão. Desse modo, não são abordados com profundidade aspectos específicos de deterioração do concreto propriamente dito.

2.0 DOCUMENTOS NORMATIVOS DE REFERÊNCIA

2.1 NORMAS E RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS BRASILEIRAS

- NORMA BRASILEIRA – ABNT NBR 6118 – ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO – PROCEDIMENTO.
- NORMA BRASILEIRA – ABNT NBR 12655 – CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND: PREPARO, CONTROLE E RECEBIMENTO - PROCEDIMENTO.
- NORMA BRASILEIRA – ABNT NBR 15575-1 – EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS - DESEMPENHO.
- NORMA BRASILEIRA – ABNT NBR 16300 – GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE DE BARRAS DE AÇO PARA ARMADURA DE CONCRETO ARMADO - REQUISITOS E MÉTODOS DE ENSAIO.
- NORMA BRASILEIRA – ABNT NBR ISO 9223 – CORROSÃO DE METAIS E LIGAS METÁLICAS – CORROSIVIDADE DE ATMOSFERAS – CLASSIFICAÇÃO, DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA
- NORMA BRASILEIRA – ABNT NBR 6323 – GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE DE PRODUTOS DE AÇO E FERRO FUNDIDO – ESPECIFICAÇÃO

Nota: encontra-se em elaboração com estágio evolutivo bastante adiantado o projeto de norma brasileira para proteção catódica de estruturas de concreto. Sugerimos aos interessados acompanhar a aprovação e colocação no Portal da ABNT.

- ABRACO-RP-PAC-002 – RECOMENDAÇÕES PARA SELEÇÃO DE ESQUEMAS DE PINTURA ANTICORROSIVA.
- SC - 07 – IBRACON - RECOMENDAÇÃO PRÁTICA DE PROTEÇÃO CATÓDICA DE ARMADURAS DE CONCRETO

2.2 NORMAS E RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS INTERNACIONAIS

- NACE INTERNATIONAL SP0187 - DESIGN CONSIDERATIONS FOR CORROSION CONTROL OF REINFORCING STEEL IN CONCRETE. HOUSTON.
- NACE INTERNATIONAL. RP0209 - IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION OF REINFORCING STEEL IN ATMOSPHERICALLY EXPOSED CONCRETE STRUCTURES.

- NACE INTERNATIONAL. PUB 11105 - SACRIFICIAL CATHODIC PROTECTION OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS: A STATE-OF-THE-ART REPORT.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 12944-2 - PAINTS AND VARNISHES - CORROSION PROTECTION OF STEEL STRUCTURES BY PROTECTIVE PAINT SYSTEMS - PART 2: CLASSIFICATION OF ENVIRONMENTS.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 14657 - ZINC-COATED STEEL FOR THE REINFORCEMENT OF CONCRETE.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN EN 12696 - CATHODIC PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G109 STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINING EFFECTS OF CHEMICAL ADMIXTURES ON CORROSION OF EMBEDDED STEEL REINFORCEMENT IN CONCRETE EXPOSED TO CHLORIDE ENVIRONMENTS.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A767: STANDARD SPECIFICATION FOR ZINC-COATED (GALVANIZED) STEEL BARS FOR CONCRETE REINFORCEMENT.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A 775 - STANDARD SPECIFICATION FOR EPOXY-COATED STEEL REINFORCING BARS.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A1055: STANDARD SPECIFICATION FOR ZINC AND EPOXY DUAL-COATED STEEL REINFORCING BARS
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A955. STANDARD SPECIFICATION FOR DEFORMED AND PLAIN STAINLESS-STEEL BARS FOR CONCRETE REINFORCEMENT.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 201.2R - GUIDE TO DURABLE CONCRETE.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1504-1: PRODUCTS AND SYSTEMS FOR THE PROTECTION AND REPAIR OF CONCRETE STRUCTURES. - DEFINITIONS, REQUIREMENTS, QUALITY CONTROL AND EVALUATION OF CONFORMITY: DEFINITIONS.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1504-2: PRODUCTS AND SYSTEMS FOR THE PROTECTION AND REPAIR OF CONCRETE STRUCTURES. - DEFINITIONS, REQUIREMENTS, QUALITY CONTROL AND EVALUATION OF CONFORMITY: SURFACE PROTECTION SYSTEMS FOR CONCRETE. BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION: LONDON, 2004. 45P.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (EN). EN 1504-3: PRODUCTS AND SYSTEMS FOR THE PROTECTION AND REPAIR OF CONCRETE STRUCTURES; DEFINITIONS, REQUIREMENTS, QUALITY CONTROL AND EVALUATION OF CONFORMITY: STRUCTURAL AND NON-STRUCTURAL REPAIR.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DE BÉTON. BULLETIN D'INFORMATION N° 183: DURABLE CONCRETE STRUCTURES.

RECOMENDAÇÕES BÁSICAS SOBRE O CONCRETO E A ARMADURA

O concreto armado é um compósito constituído de uma matriz cimentícia, agregados e uma armadura de aço-carbono, normalmente sob a forma de vergalhões.

Os concretos, de uso geral nas estruturas, são constituídos basicamente de quatro materiais: cimento portland, água, agregado miúdo e agregado graúdo.

Com relação ao cimento portland, principal componente do concreto, as matérias primas utilizadas na sua fabricação são, basicamente, calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, que reagem entre si quando aquecidas formando os principais componentes do produto final que são o silicato tricálcico ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$), o silicato dicálcico ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), o aluminato tricálcico ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) e o ferro aluminato tricálcico ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$), existindo ainda, em quantidades menores, outros componentes como o óxido de magnésio (MgO), dióxido de titânio (TiO_2), trióxido de manganês (Mn_2O_3), óxido de potássio (K_2O), óxido de sódio (Na_2O) e sulfato de cálcio (CaSO_4), mostrando que o concreto é um material extremamente complexo.

Durante a hidratação do cimento, tem-se a formação do hidróxido de cálcio, que possui pH elevado, em torno de 12,5. De acordo com o diagrama de Pourbaix para o ferro, o meio de alta alcalinidade do concreto é propício à estabilidade eletroquímica das armaduras de aço-carbono (estado passivo), como mostrado na figura 01.

No diagrama da Figura 01 é identificada a região de possível formação de uma película de caráter protetor, denominada de camada passiva, que está localizada na região superior à direita demarcada como “passivação”. Também mostra a região de estabilidade do ferro metálico (Fe), estado em que não há atividade de oxidação/dissolução do ferro no meio ou reação de oxidação/passivação, sendo esta região localizada na parte inferior do diagrama demarcada como “imunidade”. A região localizada na parte superior esquerda do diagrama, demarcada como “corrosão generalizada” é a de estabilidade de íons de ferro (Fe^{2+} e Fe^{3+}), em que o ferro se encontra no estado ativo de corrosão.

No diagrama da figura 01 também é apresentada a faixa aproximada (cor cinza) de valores de potencial de circuito aberto (também chamado de potencial de corrosão ou potencial de eletrodo) assumido pelo aço-carbono em contato com o concreto. A condição de concreto íntegro (sem contaminações), que apresenta pH em torno de 12,5 é representada pela linha de cor verde que tem intersecção com as linhas tracejadas a e b que representam as condições de equilíbrio das reações que envolvem apenas as espécies presentes na água.

Pelo diagrama, observa-se que a intersecção da linha verde com a linha “a” corresponde à reação $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$, enquanto com a linha “b”, corresponde à reação $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 4\text{OH}^-$. Abaixo da linha a, tem-se a intersecção da linha verde com a linha de equilíbrio do ferro $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^-$.

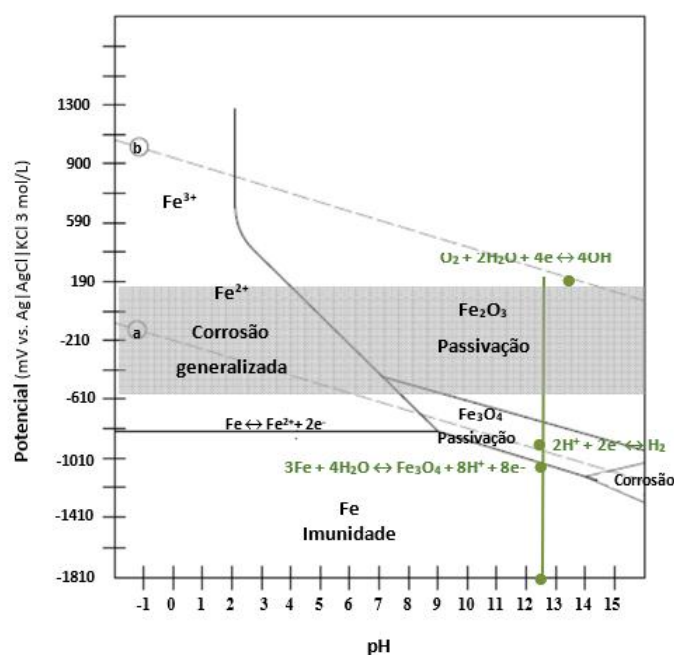


Fig. 01 – Diagrama de equilíbrio potencial x pH do ferro em água na temperatura de 25o C, com indicação (faixa cinza) dos valores típicos de potencial de circuito aberto (Eca) do aço-carbono em concreto.

Fonte: Pourbaix (1974).

Com relação aos agregados, estes são considerados materiais inertes, enquanto a mistura da matriz cimentícia com a água (pasta de cimento) constitui o material ligante que aglutina os agregados em uma massa sólida que endurece, formando um material sólido, no entanto, poroso.

A porosidade do concreto é decorrente da presença de diferentes tipos de vazios na pasta de cimento portland hidratado, sendo os principais: espaços interlamelares no silicato de cálcio hidratado (C-S-H) também conhecidos como poros de gel, vazios capilares e vazios de ar incorporado intencionalmente e vazios de ar aprisionado na mistura fresca do concreto. Os vazios capilares representam todo espaço não ocupado pelos produtos hidratados e pelo cimento anidro, sendo que, associados aos vazios de ar, formam uma rede de poros comunicantes de conexão com o meio exterior. Essa conexão possibilita a penetração de gases atmosféricos (O_2 , CO_2 e N_2) e da água na forma de vapor e líquida com ou sem contaminantes dissolvidos, como íons cloreto (Cl^-) e íons sulfato (SO_4^{2-}). A partir do acesso desses, pode ser estabelecido um processo de degradação, que compromete a durabilidade da estrutura de concreto.

Face ao exposto, concretos resistentes e duráveis são aqueles cujas características são adequadas ao uso e ao ambiente no qual estão situados. Dessa forma, quando se trata de durabilidade de estruturas de concreto, é fundamental que os parâmetros de dosagem e as premissas para composição levem em consideração os requisitos físicos e mecânicos que o produto final deve atingir para garantir sua integridade quando da exposição ao ambiente.

A corrosão é considerada um dos maiores problemas para a durabilidade das estruturas. Designa-se genericamente de corrosão em concretos, aos processos corrosivos que se observa nas barras de aço-carbono das estruturas de concreto, ou seja, corrosão da armadura. A deterioração da estrutura em razão da corrosão é comumente observada em estruturas aéreas expostas à atmosfera, bem como partes que estão imersas no mar ou enterradas no solo.

4.0

CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL ÀS ESTRUTURAS DE CONCRETO

A norma ABNT NBR 12655, referente às especificações de preparo, controle, recebimento e aceitação do concreto de cimento Portland, enumera quatro principais classes de agressividade ambiental, relacionadas às condições de exposição e riscos que podem oferecer à integridade da estrutura, a saber:

- Classe I - contempla ambientes de natureza rural e submersa em água doce, e é considerada a de menor agressividade.
- Classe II representa pequeno risco de deterioração da estrutura, e enquadra especificamente estruturas edificadas em ambientes urbanos.
- Classe III, por sua vez, engloba áreas industriais e a região marinha, representando grande risco de deterioração.
- Classe IV, a mais agressiva, contempla regiões industriais com especificidades de agressão química, bem como áreas onde há respingos de maré, uma das condições mais prejudiciais à integridade do concreto.

Nesta classificação da norma ABNT NBR 12655 a classe I corresponde às classificações C1 e C2 das Normas - ABNT NBR ISO 9223, ISO 12944-2 e Recomendação Prática ABRACO RP - PAC 002; a classe II corresponde às classificações C3 e C4 das Normas - ABNT NBR ISO 9223, ISO 12944-2 e Recomendação Prática ABRACO - RP - PAC 002; a classe III corresponde às classificações C5 das Normas - ABNT NBR ISO 9223, C5, C5M e C5I da Norma ISO 12944-2 e também da Recomendação Prática ABRACO - RP - PAC 002; a classe IV corresponde às classificações CX da Norma ABNT NBR ISO 9223, ISO 12944-2 e também da Recomendação Prática ABRACO - RP - PAC 002.

5.0

FATORES QUE INFLUENCIAM A DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

A deterioração em estruturas de concreto pode estar associada a fatores mecânicos (vibrações, sobrecargas e erosão), físicos (variações de temperatura), químicos (ação de produtos químicos) ou biológicos (ação de bactérias), conforme descrito abaixo.

5.1

FATORES MECÂNICOS

As vibrações e sobrecargas podem ocasionar fissuras no concreto, possibilitando o contato da armadura com o meio corrosivo, ao passo que, líquidos em movimento, principalmente com partículas em suspensão, com ou sem substâncias químicas agressivas, podem ocasionar erosão no concreto, permitindo que as armaduras também sejam atingidas.

5.2

FATORES FÍSICOS

Variações de temperatura do concreto podem ocasionar microfissuras, facilitando a penetração de agentes agressivos, que também podem atingir as armaduras.

5.3 FATORES QUÍMICOS

Substâncias químicas agressivas nos diferentes ambientes (água, solo e atmosfera), em especial os ácidos, também podem causar deterioração no concreto e, conseqüentemente, a corrosão das armaduras de aço-carbono.

5.4 FATORES BIOLÓGICOS

O concreto muitas vezes precisa ser utilizado em áreas poluídas, sujeitas à ação de bactérias, que também podem causar sua deterioração. Algumas bactérias possuem a propriedade de oxidar o enxofre e seus compostos com a produção de ácido sulfúrico (H_2SO_4), reduzindo o pH, deteriorando a massa de concreto e atingindo as armaduras, como é o caso de tubulações e tanques de estações de tratamento de esgoto e efluentes industriais.

5.5 POROSIDADE E PERMEABILIDADE DO CONCRETO

A penetração de eletrólitos, como os sais de um modo geral e a absorção de gases, como o oxigênio, ocorre nas áreas de maior heterogeneidade do concreto e de cobrimento da armadura que são as mais permeáveis e porosas e, portanto, as mais suscetíveis a um processo de corrosão da armadura.

No caso de corrosão em desenvolvimento, a penetração de eletrólitos faz com que a resistividade elétrica do concreto caia bastante, intensificando o funcionamento das pilhas de corrosão em curso. Assim sendo, todos os cuidados devem ser tomados para que o concreto seja o mais denso possível (menor permeabilidade), o que nem sempre é fácil de se conseguir na prática.

5.6 FISSURAÇÃO

Da mesma forma, o concreto pode apresentar fissuras térmicas, causadas pelas solicitações mecânicas e outros motivos, que também facilitam a penetração de soluções de eletrólitos e gases até a interface do concreto com a armadura, propiciando o funcionamento das células de corrosão.

Assim sendo, embora muitas vezes seja especificado um concreto de baixa permeabilidade, em função da agressividade do meio de exposição, falhas ocorrem durante as diferentes etapas (projeto, execução e cura), gerando fissuras e outras anomalias, que são a porta de entrada para os eletrólitos que desencadeiam ou aceleram os processos corrosivos.

Evitar que a estrutura de concreto apresente, com o passar do tempo, fissuras também é uma tarefa difícil de ser conseguida, mas que deve ser sempre perseguida. Uma vez que o eletrólito atinja as armaduras não existe outra solução segura e garantida para a sua proteção contra corrosão, a não ser a adoção de sistemas de proteção, como inibidor de corrosão e reparo com uso de anodos galvânicos de proteção catódica. e a utilização de vergalhões galvanizados.

No ANEXO A item A.1 são detalhados os aspectos de fissuração do concreto.

6.0 PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO QUE AFETAM A ARMADURA

6.1 DETERIORAÇÃO POR ÁCIDOS

O contato direto do concreto com soluções de ácidos, como os ácidos clorídrico, fluorídrico, nítrico, sulfuroso e sulfídrico ocasiona deterioração importante, pois eles reagem com componentes do concreto e diminuem o valor do pH.

Para complemento e mais detalhes ver ANEXO A – Item A.2.1

6.2 DETERIORAÇÃO POR BASES - REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado depende da presença de álcalis e de agregados reativos no concreto e, ainda, da exposição do concreto à água ou à umidade. Nessa condição, a reação álcali-agregado pode resultar na formação de produtos expansivos pela geração de um gel expansivo (de sílica ou de sílico-alcalino) que acaba por fissurar e diminuir a resistência mecânica do concreto. Com a evolução do processo, a superfície do concreto se fissa (fissura mapeada), o que é propício para a penetração facilitada da água e de agentes agressivos à armadura.

6.3 DETERIORAÇÃO POR SAIS

Os sais, de um modo geral, são bastante agressivos para o concreto armado, podendo deteriorar a pasta de cimento e acelerar a corrosão das armaduras, uma vez que, sendo eletrólitos, reduzem a resistividade elétrica do concreto e facilitam o funcionamento das células de corrosão eletroquímica.

As estruturas de concreto em ambiente marinho ficam muito expostas aos cloretos, podendo ser enterradas, permanentemente submersas, sujeitas às variações de marés e de respingos ou permanentemente aéreas em contato com a névoa salina.

Para complemento e mais detalhes ver ANEXO A – Item A.2.2

6.4 LIXIVIAÇÃO E CARBONATAÇÃO

O hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) originado pela hidratação do cimento, possui pH elevado e apresenta uma boa solubilidade em água. A água, principalmente de baixa dureza, com pequenas concentrações de sais de cálcio e de magnésio, pode solubilizar o hidróxido de cálcio, que é lixiviado para a superfície do concreto.

O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lixiviado ao entrar em contato com a atmosfera reage com o dióxido de carbono (CO_2), formando o carbonato de cálcio (CaCO_3) e água. A lixiviação do hidróxido de cálcio e a consequente formação do carbonato de cálcio é responsável pelo aparecimento de um depósito eflorescente na superfície do concreto, de cor branca, muito comum de ser observado, sendo que muitas vezes este depósito evolui com formação de estalactites.

O CO_2 também é responsável pela carbonatação do concreto de cobrimento da armadura, ficando esta suscetível à corrosão. A carbonatação do concreto é consequência das mencionadas reações químicas do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dentre outros componentes alcalinos da pasta de cimento (NaOH , KOH e cálcio-silicatos hidratados) com CO_2 presente na atmosfera. Primeiro, há formação de uma solução aquosa ácida que

reage com a pasta de cimento hidratada e tende a neutralizar a alcalinidade do concreto, a saber:



A reação de carbonatação se inicia na superfície externa e penetra no concreto formando uma frente de baixo pH. O valor do pH da água de poro do concreto carbonatado pode atingir valores de até 8, sendo este valor menor que o limite de despassivação das barras de aço-carbono, que é em torno de 9,5.

A velocidade de avanço da frente de carbonatação depende de alguns fatores, sendo os mais importantes a característica do material e quantidade de CO_2 disponível na atmosfera associada à umidade relativa, sendo que teores em torno de 60 % de umidade relativa favorece essa velocidade.

7.0 CORROSÃO DAS ARMADURAS

Em condições normais para um concreto integro (sem contaminação com agentes agressivos), a alta alcalinidade do concreto inibe os processos corrosivos. Isso porque o pH do concreto situa-se acima de 12, condição em que há formação e manutenção espontânea da já mencionada película passivadora de caráter protetor, composta de óxidos e hidróxidos de ferro, elemento principal do aço-carbono. Embora nem sempre a película passiva seja uma camada de espessura uniforme e estável ao longo do tempo, a sua presença mantém a taxa de corrosão do aço-carbono em níveis desprezíveis, na ordem de 0,1 $\mu\text{m}/\text{ano}$ a 1 $\mu\text{m}/\text{ano}$.

A corrosão ocorre quando há diminuição do pH ou a contaminação do eletrólito (água dos poros do concreto) que está sempre em contato com a armadura. Quando a armadura de um concreto sofre corrosão, o produto de corrosão possui um volume maior do que o volume do metal corroído, o que favorece a formação de fissuras bem como o seu deslocamento do concreto de cobrimento, com exposição da armadura corroída. Para maiores detalhes do mecanismo eletroquímico da corrosão de armaduras de concreto o leitor deve reportar-se ao ANEXO B.

As fotos das figuras 02 a 08 ilustram exemplos de deterioração de elementos de estruturas de concreto em decorrência da corrosão na armadura.

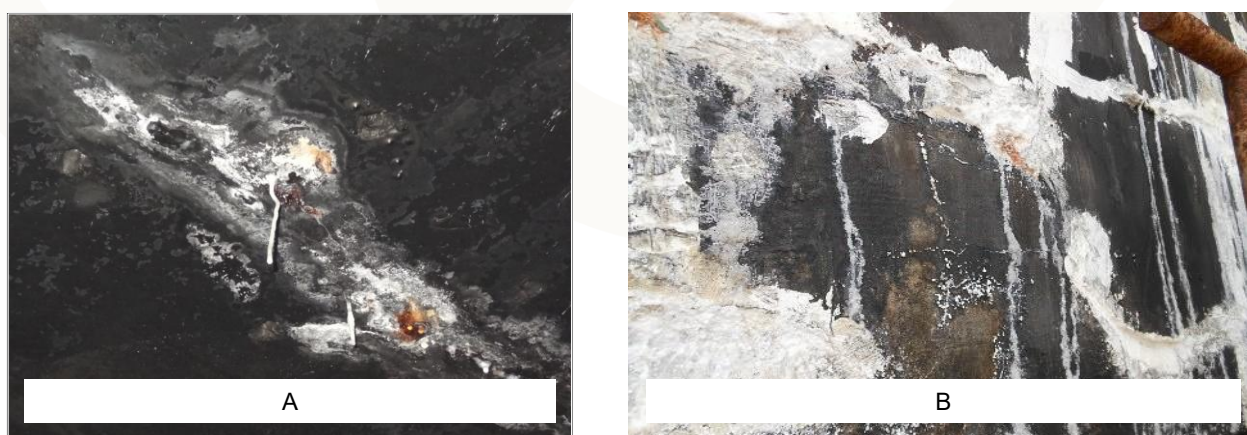


Figura 02 - Laje de concreto (A) e costado de tanque em concreto (B) com presença manchas de eflorescências e com formação de estalactites resultantes da lixiviação de compostos do cimento e de sua reação química com o CO_2 atmosférico e com a presença de manchas de lixiviação de produto de corrosão.



Figura 03 – Viga de concreto armado com exposição de armadura com corrosão severa.



Figura 04 – Laje de concreto com presença manchas de eflorescências e com formação de estalactites resultantes da lixiviação de compostos do cimento e de sua reação química com o CO₂ atmosférico e com a presença de manchas de umidade resultante dessa reação química e de possível infiltração de água pela junta.



Figura 05 – Pilar de concreto, com manchas de eflorescência na parte inferior e com desagregação com exposição do agregado



Figura 06 – Estaca de concreto armado com manchas de corrosão.



Figura 07 – Lajes de concreto armado com armadura exposta com intensa corrosão em área de concreto deslocado.



Figura 08 – Lajes de concreto armado com armadura exposta com intensa corrosão em área de concreto deslocado.

8.0 PREVENÇÃO E CONTROLE DA CORROSÃO

8.1 EM ESTRUTURAS NOVAS (ETAPA DE PROJETO)

São muitas as medidas protetivas que podem ser adotadas quando se deseja prevenir ou controlar a corrosão da armadura de aço-carbono, podendo ser divididas em quatro formas, a saber.

- Substituir a armadura de aço-carbono por outro tipo de material que seja mais resistente ou apresente taxa de corrosão menor na mesma condição de exposição, tais como: armaduras de compósitos de fibra de vidro ou fibra de carbono em matriz polimérica (fiber reinforced polymer), de aço ao cromo de baixo carbono (low-carbon, chromium), de aço inoxidável martensítico com adição de nitrogênio (MMFX(C)) e outros aços inoxidáveis austeníticos ou lean duplex, os quais podem ser utilizados em estruturas que requerem uma vida útil longa e ou com restrição de manutenção periódica e de reparos de reabilitação. O uso de aços inoxidáveis como armadura é abordado no ANEXO C.
- Modificar o meio em que a armadura está exposta: no caso de estruturas novas, o uso do inibidor de corrosão ou impermeabilizante podem ser previstos na composição do concreto que também é melhorada para obter um concreto de alta qualidade que limite o acesso de substâncias potencialmente corrosivas às armaduras. Soma-se a essas medidas, a importância de uma correta execução e cura do concreto e o atendimento à espessura de cobertura da armadura, conforme diretrizes da ABNT NBR 6118 - 2014. A proteção com uso de inibidor de corrosão é abordada no ANEXO D.
- Interpor barreiras entre o meio e a armadura: Para armaduras novas, um dos métodos mais eficazes e amplamente utilizado na Europa e Estados Unidos é a galvanização da armadura por imersão a quente, onde o contato do aço com o zinco fundido promove uma proteção por barreira, devido à formação das camadas intermetálicas de Zn-Fe até a superfície do vergalhão protegida com zinco, e a proteção catódica, onde o zinco atua como metal de sacrifício, oxidando-se preferencialmente ao aço. Para potencializar a proteção contra corrosão em ambientes de agressividade extrema, pode-se incluir a pintura após a galvanização (zinc and epoxy dual-coated), caracterizando o sistema duplex.

Por se tratar de uma medida eficaz e muito importante encontra-se no ANEXO E um maior detalhamento da utilização da galvanização a quente das armaduras de concreto.

É possível ainda a diminuição da permeabilidade superficial do concreto à gases e à água líquida por impregnação ou aplicação de pintura, sendo este tipo de proteção relativamente comum no Brasil em razão de fácil execução e ser mais viável economicamente, em detrimento aos outros métodos.

- Aplicar à armadura um potencial externo (proteção catódica): no caso de estruturas de concreto armado, a proteção catódica consiste em mudar o potencial do sistema armadura/concreto em direção à região de imunidade do diagrama de Pourbaix. Por se tratar de uma medida eficaz e muito importante encontra-se no ANEXO F um maior detalhamento da aplicação de proteção catódica.

8.1.1 SÍNTESE DAS MEDIDAS PREVENTIVAS E DE CONTROLE DA CORROSÃO

Para minimizar os problemas de corrosão em armaduras de concreto recomenda-se, nas fases de projeto, execução e manutenção, as medidas cabíveis em cada caso indicadas a seguir de forma simplificada.

- Avaliar a agressividade do meio onde a estrutura se encontra ou será instalada conforme as classes de agressividade definida na normalização;
- Prever cuidados especiais para garantir uma espessura de cobrimento mínima, seguindo diretrizes da normalização;
- Adotar medidas para assegurar uma baixa permeabilidade do concreto seguindo diretrizes da normalização, tais como relação água/cimento, granulometria do agregado, aditivos, adições, dentre outras;
- Adotar medidas adicionais tradicionais de proteção, como armaduras revestidas por galvanização à quente (ANEXO E) ou prever a utilização de proteção catódica (galvânica ou corrente impressa), como indicado no ANEXO F.
- Avaliar a adoção de soluções ainda pouco comuns no Brasil, prover modificações no meio, como adição de inibidor de corrosão (ANEXO D ou como armaduras de aços especiais ou ainda de aços inoxidáveis (ANEXO C).

8.2 EM ESTRUTURAS EXISTENTES

8.2.1 INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO

As estruturas de concreto devem ser avaliadas regularmente com uma frequência adequada à agressividade do ambiente e as suas condições de conservação e uso/ocupação.

Especificamente quanto à atividade de inspeção das estruturas de concreto, diferentes técnicas podem ser aplicadas para o correto diagnóstico do seu estado de conservação. A principal técnica é a realização de um exame visual detalhado da estrutura e demais componentes, como juntas e aparelhos de apoio.

São vários os fatores que requerem atenção especial durante uma inspeção visual, tais como o seguinte:

- Alterações na coloração do concreto original, identificando a coloração da mancha, como exemplo: coloração avermelhada (que indica a corrosão da armadura) e esbranquiçada (que indica a carbonatação do concreto).
- Presença de fissuras, identificando sua abertura, configuração e causa provável, como exemplo: fissuras resultantes de esforços estruturais e fissuras resultantes da corrosão da armadura.
- Deterioração da camada superficial do concreto, identificando profundidade afetada e causa provável, como exemplo: deslocamento por impacto e desgaste devido à erosão.
- A ocorrência de armadura exposta, identificando o seu estado, como exemplo: com ou sem corrosão, seção efetiva e presença de ruptura e descontinuidades.
- Presença e falhas nos revestimentos, em pinturas e em impermeabilizações.
- Presença de umidade, acúmulo de água e infiltrações, indicando possíveis causas e a existência, na região, de outras patologias, juntas, sistema de drenagem etc.

Com base na intensidade e gravidade das falhas e manifestações patológicas observadas no exame visual, outras técnicas são aplicadas. Essa associação de técnicas é importante devido ao exame visual se limitar à avaliação da superfície do concreto.

Usualmente, o exame visual é associado a ensaios que verificam a presença de agentes agressivos e alterações químicas no concreto e de detecção de anomalias não visíveis na sua superfície, como a corrosão da armadura. Eventualmente, são realizados ensaios de determinação de propriedades físicas e mecânicas do concreto, de verificação da presença de corrente de interferência e da condutividade elétrica do concreto e da avaliação de revestimentos superficiais.

Quanto à corrosão das armaduras, um estado ativo de corrosão pode ser constatado pela simples presença de certas anomalias na superfície do concreto e, ainda, pelo exame direto do estado da armadura recém-exposta. A armadura está despassivada quando da visualização da perda da coloração característica de sua passivação, no meio (acinzentada), para outras colorações (preta, marrom ou vermelha). No caso de corrosão avançada, é possível visualizar o acúmulo de produtos de corrosão.

Além desses procedimentos, a corrosão pode ser investigada pela realização de medições eletroquímicas (associadas a outras técnicas), sendo a medição do potencial de corrosão a mais usual. Esta medida indica, aproximadamente, a condição de um estado ativo de corrosão ou passivação da armadura. No caso de estruturas expostas ao ambiente marinho, há aproximadamente 90 % de probabilidade de estado ativo de corrosão da armadura de aço-carbono quando o valor de potencial obtido é mais negativo do que -350 mV (em relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre, ECSC) (ASTM C 876, 2009). A tabela 1 apresenta valores indicados na literatura consultada.

Tabela 1- Faixa de valores típicos de potencial de corrosão em campo para armadura de aço-carbono embutida em diferentes condições de concreto

<i>Condição do concreto de cobrimento</i>	<i>Umidade relativa (UR) atmosférica provável (%)</i>	<i>Estado provável do aço-carbono</i>	<i>Valores de Ecorr (mV) Eletrodo de cobre sulfato de cobre - Cu/CuSO₄ - saturado</i>
Concreto saturado	> 98 (UR saturada)	Estado ativo com taxa de corrosão desprezível (restrição de acesso O ₂)	-900 a -1000
Concreto com teor de umidade alto (com superfície úmida) e contaminado com Cl ⁻	85 a 98 (UR alta)	Estado ativo	-400 a -600
Concreto com teor de umidade médio e livre de Cl ⁻	65 a 85 (UR média)	Estado passivo	+100 a -200
Concreto com teor de umidade médio e carbonatado		Estado ativo	+100 a -400
Concreto com teor de umidade baixo e carbonatado	45 a 65 (UR baixa)	Estado ativo, mas com taxa de corrosão desprezível ou pouco significativa.	+200 a 0
Concreto aerado com teor de umidade baixo		Estado passivo	

O potencial de corrosão pode ser determinado com uso de um eletrodo de referência e um voltímetro de alta impedância. A medição consiste na determinação da diferença de potencial elétrico entre a barra de aço e o eletrodo de referência que se coloca em contato com a superfície do concreto. Em campo, é mais adequado o uso de equipamentos específicos que também determinam resistividade elétrica do concreto e/ou taxa de corrosão.

Como o estabelecimento e a evolução da corrosão são dependentes da resistividade elétrica do meio e do pH (além do acesso de oxigênio à armadura), o seu conhecimento pode ser importante para a avaliação do risco de corrosão em estruturas de concreto. Este risco é significativo quando o concreto apresenta baixa resistividade (valores menores que 5.000 $\Omega \cdot \text{cm}$), em que há facilidade de fluxo de íons através da solução aquosa presente nos poros do concreto.

Nas estruturas contaminadas com cloretos, é de grande valia o monitoramento da resistividade elétrica do concreto, pois a diminuição de seu valor ao longo do tempo indica o aumento do ingresso de água contaminada com cloretos e, deste modo, o aumento de risco de corrosão das armaduras.

Cabe considerar que valores elevados de resistividade elétrica são típicos de concreto novos, não contaminados e também em concretos carbonatados. Nestes últimos, as reações de carbonatação resultam na diminuição da permeabilidade do concreto e no consumo de diferentes íons presentes na água de poros, com consequente diminuição significativa da intensidade do fluxo corrente elétrica, necessária para a realização da medida. A carbonatação do concreto só deixa de ser um fator interveniente na medida da resistividade quando a profundidade de sua frente no concreto é pouco significativa.

A taxa de corrosão é a medida eletroquímica que indica a velocidade de corrosão. Usualmente, considera-se que a armadura está em estado ativo de corrosão quando a densidade corrente de corrosão obtida é $\geq 0,1 \text{ mA/cm}^2$. Com a medida da taxa de corrosão pode ser acompanhada a evolução do processo corrosivo na armadura e, assim, avaliado o desempenho da estrutura ao longo dos anos.

As técnicas de proteção aplicáveis são as mesmas citadas no item anterior, sendo que a aplicação de proteção catódica assume nesta condição um grande destaque. A título de exemplo, colocou-se no ANEXO G alguns passos importantes e típicos na recuperação do concreto.

De forma resumida pode-se sintetizar a inspeção nos seguintes aspectos.

- Inspeção visual, como detalhado acima.
- Análise do histórico da estrutura, principalmente quanto a choques e danos mecânicos.
- Avaliação do concreto, incluindo avaliação da frente de carbonatação e da contaminação do concreto com íons cloreto.
- Medição de potencial eletroquímico de corrosão (por amostragem).
- Medição de resistividade elétrica (por amostragem).

9.0 CONCLUSÃO

Uma condição importante a ser considerada no projeto de estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras de aço-carbono. Dentre as diversas formas conhecidas para garantir a vida útil prevista em projeto, cita-se a fundamental especificação, execução e cura adequada do concreto

e, também, uma espessura de cobrimento adequada da armadura, assim como a manutenção da uniformidade desta espessura ao longo dos elementos. Outras formas de garantir e até mesmo estender a vida útil das estruturas sob o ponto de vista da corrosão é a adoção de medidas adicionais de proteção.

As estruturas de concreto são uma excelente opção em termos de desempenho sob o ponto de vista da corrosão, no entanto, alguns cuidados são essenciais, especialmente nos ambientes corrosivos e muito corrosivos e imersão em água salgada de modo a evitar deterioração precoce da armadura.

ANEXO A – PROCESSOS DE FISSURAÇÃO E DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

A.1 - Processos de Fissuração Térmica do Concreto

A.1.1 - Considerações introdutórias

O objetivo deste item é observar a importância da fissuração muito comum no concreto por efeito da temperatura e do calor de hidratação na sua primeira fase executiva, comprometendo inquestionavelmente, em meio ambiente agressivo, a durabilidade da estrutura de concreto pela corrosão das armaduras com consequente fragilização estrutural progressiva.

Dessa maneira cabe-nos argumentar a importância do controle tecnológico do concreto, os planos de concretagem, o correto posicionamento das armaduras e os cobrimentos normativos associados aos procedimentos criteriosos da cura do concreto para minimizar os efeitos das solicitações da retração e dos gradientes de temperatura incluindo o conhecimento do meio ambiente ao qual se destina a estrutura.

Dando ênfase a uma reunião técnica muito elucidativa com os professores José Luiz Cardoso, Luiz Eduardo Cardoso e André Luiz B. Geyer podemos expor algumas considerações técnicas que julgamos oportunas para a minimização da fissuração do concreto.

Num primeiro momento é importante citar as questões normativas para a fissuração do concreto onde levantamos a questão de convivermos com uma fissuração limite de 0,2mm a 0,4mm em meio agressivo, onde a questão principal reside em garantir uma durabilidade adequada à estrutura.

Acresça-se a questão da fissuração outras questões técnicas de suma importância onde ressaltamos problemas relacionados com as porosidades excessivas do concreto, falhas de juntas de concretagem e o não controle adequado do fator água/cimento (A/C) associado também à cura do concreto e às condições ambientais a saber, que possam comprometer a qualidade da obra e fundamentalmente a sua segurança e durabilidade.

Pela Norma NBR 6118 - 2014 - Item 13.4 - Controle da fissuração e proteção das armaduras temos:

A fissuração em elementos estruturais de concreto armado é inevitável, devido à grande variabilidade e à baixa resistência do concreto à tração; mesmo sob as ações de serviço (utilização), valores críticos de tensões de tração são atingidos. Visando obter bom desempenho relacionado à

proteção das armaduras quanto à corrosão e à aceitabilidade pelos usuários, busca-se controlar a abertura dessas fissuras.

Nas estruturas com armaduras ativas (concreto protendido), existe também, com menor probabilidade, a possibilidade de aparecimento de fissuras. Nesse caso as fissuras podem ser mais nocivas, pois existe a possibilidade de corrosão sob tensão das armaduras.

De maneira geral, a presença de fissuras com aberturas que respeitem os limites em estruturas bem projetadas, construídas e submetidas às cargas previstas na normalização, não implicam em perda de durabilidade ou perda de segurança quanto aos estados-limites últimos.

As fissuras podem ainda ocorrer por outras causas, como retração plástica térmica ou devido a reações químicas internas do concreto nas primeiras idades, devendo ser evitadas ou limitadas por cuidados tecnológicos, especialmente na definição do traço e na cura do concreto.

Limites para fissuração e proteção das armaduras quanto à durabilidade

A abertura máxima característica, w_k , das fissuras, desde que não exceda valores da ordem de 0,2mm a 0,4mm, (conforme tabela 1) sob ações das combinações frequentes, não tem importância significativa na corrosão das armaduras passivas.

Como para as armaduras ativas existe a possibilidade de corrosão sob tensão, esses limites devem ser mais restritos e função direta da agressividade do ambiente, dada pela classe de agressividade ambiental.

Na tabela A.1 são dados valores-limites da abertura característica w_k das fissuras, assim como as outras providências, visando garantir proteção adequada das armaduras quanto à corrosão. Entretanto, devido ao estágio atual dos conhecimentos e da alta variabilidade das grandezas envolvidas, esses limites devem ser vistos apenas como critérios para um projeto adequado de estruturas.

Embora as estimativas de aberturas de fissuras devam respeitar esses limites, não se deve esperar que as aberturas de fissuras reais correspondam estritamente aos valores estimados, isto é, fissuras reais podem eventualmente ultrapassar esses limites.

Tabela A.1 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.

<i>Tipo de estrutura de concreto</i>	<i>Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão</i>	<i>Exigências relativas à fissuração</i>	<i>Combinação de ações em serviço a utilizar</i>
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto armado	CAA I	$ELS-W w_k \leq 0,4 \text{ mm}$	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	$ELS-W w_k \leq 0,3 \text{ mm}$	

	CAA IV	ELS-W wk ≤ 0,2 mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós- tração com CAA III e IV	ELS-W wk ≤ 0,2 mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós- tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-Da	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-Da	Combinação frequente
a - A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com ap = 50 mm			
Notas:			
1. as definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.			
2. Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.			
3. No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação freq das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.			

Na sequência de nossa experiência técnica podemos expor que o concreto é um material da construção durável, quando bem executado, mas não perene, pois ele tende a se deteriorar com o tempo em função da agressividade do meio em que se encontra. Consequentemente, é necessário que ações de prevenção e de proteção sejam adotadas em tempo hábil para prolongar a vida útil dessas estruturas.

Como já mencionado anteriormente, sabemos que agentes agressivos tais como o dióxido de carbono, os sulfatos, os cloretos, os nítricos, etc., levam uma estrutura de concreto a se deteriorar com o tempo, perdendo as suas funções de segurança e servicibilidade.

Daí a fissuração, a deterioração e a conservação das estruturas de concreto passam a constituir uma preocupação permanente para os engenheiros civis, tendo em vista os graves prejuízos que causam.

De fato, mesmo para uma obra bem executada, bem projetada e especificada, poderá ocorrer a sua degradação, iniciando-se pela penetração dos agentes agressivos no concreto, por meio de difusão e absorção capilar e/ou fissuração do concreto, até atingir a armadura, despessivando-a e dando início ao processo de deterioração por corrosão, que se constitui na principal causa de degradação das estruturas de concreto.

Assim, teremos um período de iniciação do processo até a despassivação da armadura, onde a degradação inicial é de pequena monta, passando-se a seguir para um período de propagação, em que a degradação da estrutura compromete progressivamente a sua vida útil.

Cita-se que, entende-se por vida útil de um material, o período durante o qual suas propriedades permanecem acima dos limites mínimos especificados. Já por desempenho entende-se o comportamento em serviço, ao longo da vida útil.

Entende-se por vida útil de um material o período durante o qual suas propriedades permanecem acima dos limites mínimos especificados.

Já por desempenho entende-se o comportamento em serviço, ao longo da vida útil.

Verifica-se, portanto, que com o envelhecimento da estrutura e o seu desempenho ao longo do tempo, surgiu a necessidade técnica, econômica e social de se definir um novo critério, que não seja apenas o de capacidade resistente e de suas condições de utilização em serviço, para garantir o sucesso de uma construção.

Surgiu, assim, o conceito de durabilidade, como o tempo de um desempenho satisfatório, implicando desta forma, na adoção de procedimentos técnicos e de aditivos de proteção ao concreto associado um sistema de manutenção adequado, visando ampliar, a custo reduzido, a sua vida útil.

O estudo dos fatores, que comprometem progressivamente a estabilidade ou o uso de uma estrutura, assim como o estudo das causas e das consequências dos danos que comprometem seu uso e sua segurança, é o que se intitula Patologia das estruturas.

Deve-se entender que a concepção de uma obra durável implica na adoção de um conjunto de procedimentos que garantam à estrutura e aos materiais que a compõem, um desempenho satisfatório ao longo de sua vida útil.

Daí decorre a necessidade de se ter um projeto e detalhes construtivos, condizentes com uma boa execução, especificando materiais tendo em vista as condições do meio ambiente, de forma a se evitar falhas construtivas, ao mesmo tempo que se deve, por meio de uma fiscalização criteriosa, exigir uma execução a mais correta possível.

Para o material concreto, que é o material do nosso estudo, em termos de resistência mecânica e de durabilidade, o fator principal é a água.

De fato, sabemos nós ser a quantidade de água no concreto e sua relação com a quantidade de cimento (fator A/C), o elemento de maior relevância que irá reger características como resistência mecânica, compacidade, porosidade, permeabilidade, capilaridade, passo primeiro para a classificação de uma estrutura ser durável ou não.

Outro fator importante de degradação de uma estrutura de concreto é a agressividade ambiental, ou seja, a capacidade de transporte de líquidos e gases no concreto.

Assim, as novas normas optaram por estabelecer critérios que permitem criar modelos duráveis para as construções, a partir da definição de classes de exposição das estruturas, em função da deterioração a que estarão submetidas, a partir dos seguintes itens:

- Corrosão das armaduras, sob efeito de carbonatação e/ou de cloretos e sulfatos por tipo de ambiente.
- Ação do frio e/ou calor, também por tipo de ambiente.
- Agressividade química, com formação de pilhas eletroquímicas para potenciais de corrosão.

Para cada caso ou combinação de casos, as classes de exposição indicarão níveis de risco ou parâmetros mínimos a serem observados, como condição para que se consiga uma construção durável. Assim, estarão definidos a seguir:

- Dosagem mínima de concreto kg cimento/m³ concreto.
- Fator A/C máximo.
- Classe de resistência mínima do concreto.
- Cobrimento mínimo das armaduras.
- Procedimentos de cura e controles de retração e gradientes de temperatura para minimização do estado fissuratório do concreto.

Pretende-se, assim, com a observância a estes limites, que o desempenho das estruturas seja satisfatório.

Diante do exposto e da nossa frequente realidade com processos de corrosão em estruturas de concreto, apresentamos a seguir uma recomendação de contribuição técnica que nos parece pertinente na tentativa de minimizar a fissuração do concreto nos seus primeiros dias de vida causados por processos térmicos no momento das concretagens, melhorando a durabilidade das estruturas.

O Efeito da Temperatura no Concreto e Prescrições para Concretagem

Este relatório técnico específico tem como objetivo apresentar o tema Fenômeno Térmico nas Estruturas de Concreto, sua importância e necessidade de que seja considerado no projeto, especificações de materiais e na execução das mesmas, buscando fundamentalmente a minimização da fissuração do concreto e a sua durabilidade.

As reações de hidratação do concreto de cimento portland, sendo exotérmicas dão origem e elevações consideráveis de temperatura na massa do concreto.

Na primeira fase, o cimento ao se hidratar libera calor e, durante a elevação de temperatura, o concreto tem uma certa plasticidade. Nesta fase, a elevação de temperatura origina tensões de compressão, pois se considerando um cubo de volume unitário no interior do concreto, ele, ao tender expandir-se, será impedido pela massa do concreto que o envolve. Esta compressão está associada a um concreto com baixo módulo de elasticidade e maior fluência (primeiras idades) é absorvida pelo concreto (PAULON, 1987).

No entanto, a falta de uma cura adequada associada às altas temperaturas iniciais do concreto podem levar a ocorrência de retração hidráulica e como consequências a fissuração do material. A retração hidráulica ou por secagem se dá pela evaporação da água contida dentro da rede de capilares do concreto ligados à superfície, seguida de um desequilíbrio entre a umidade relativa do ambiente e dos capilares (PINTO E GEYER, 2004).

O problema térmico no concreto ocorre em uma segunda fase, ao atingir a temperatura máxima, inicia-se o resfriamento, quando o concreto é mais resistente e menos deformável, ou seja, com valores maiores de módulo de elasticidade. O cubo imaginado irá então se retrair e, havendo qualquer restrição a esta contração, desenvolver-se-á uma tensão de tração que poderá ser superior à resistência à tração do concreto, causando então a chamada fissuração térmica.

Pode-se afirmar, portanto que o desenvolvimento do calor gerado na hidratação do concreto e o resfriamento da massa pelas faces da peça resulta em um gradiente de temperatura capaz de provocar tensões de tração no material.

A.1.2 - O Efeito Térmico no Concreto

Considera-se temperatura adiabática (tad) a elevação de temperatura, devida à hidratação, não considerando as perdas.

A partir da temperatura de lançamento (tl) do concreto se inicia a elevação de sua temperatura. Como a temperatura de hidratação não varia com a de lançamento, se, por exemplo, a temperatura adiabática (tad) for 35 °C, como tl = 20 °C, tem-se uma temperatura máxima de 55° C, desconsiderando-se as influências da temperatura de controle (tamb) (ambiental).

Para fins de controle da fissuração do concreto, o importante é a diferença entre temperatura (dt).

Por diferença de temperatura entende-se a diferença entre a temperatura máxima atingida no concreto (tmax) e a temperatura média anual (tamb).

A diferença de temperatura (dt) consiste na temperatura de lançamento do concreto (tl), mais a elevação diabática (tad) menos a temperatura de equilíbrio anual (tamb) menos as perdas. Conforme a expressão abaixo:

$$Df = tl + tad - tamb - tperdas$$

O Gráfico da figura A.1 mostra o diferencial de temperatura que ocorre no concreto.

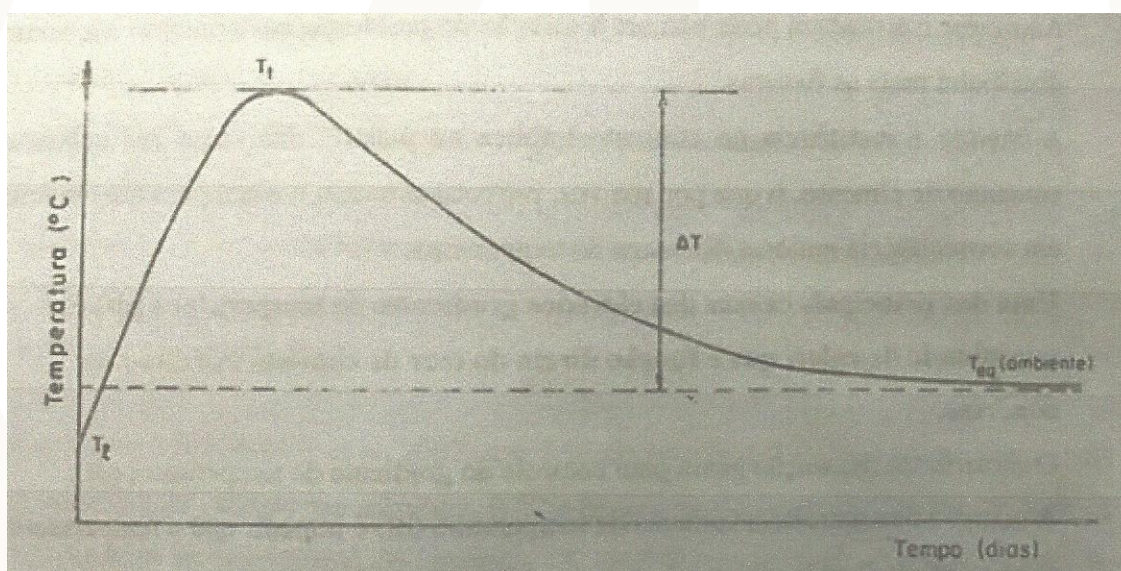


Figura A.1 - Gradiente de temperatura

Onde:

TL = temperatura de lançamento de concreto

Teq = temperatura média do meio ambiente

T1 = temperatura máxima da peça

Fissuração térmica e formas de evitá-la

Na massa de concreto existe, por um lado, o desenvolvimento no seu interior do calor causado pela hidratação do cimento e, por outro, o resfriamento da massa pelas faces da peça, disso resultando um

gradiente de temperatura através da massa do concreto, capaz de provocar por tração, a qual se maior que a capacidade de deformação do concreto, dará origem a fissuras.

A fissuração inicia-se, portanto, o momento em que as tensões de tração, geradas pelo diferencial de temperatura, superam resistência à tração do concreto.

Para combater a fissuração, em primeiro lugar há a necessidade do conhecimento das temperaturas envolvidas.

Em geral pensa-se, como forma de evitá-las, em ser aumentar a taxa de aço ou aumentar a resistência do concreto.

Aumentar a armadura pode não ser a solução do problema, em princípio isto somente distribuirá mais as fissuras.

Aumentar a resistência do concreto implica na maioria das vezes em aumentar o consumo de cimento, o que por sua vez, provoca aumento nas temperaturas internas e em consequência maiores diferenças de temperatura.

Uma das principais causas dos elevados gradientes de temperatura (dt) é a quantidade de calor, que é função direta do teor de cimento portland no concreto.

O controle da fissuração passa pelo controle do gradiente de temperatura (dt). A maneira de controlar a variação de temperatura (dt) é impedir que a temperatura inferior ($t_l + tad$) se eleve demasiadamente.

Lançando-se o concreto em baixas temperaturas, a temperatura máxima poderá ser reduzida.

Para melhor se entender o efeito das temperaturas tomemos os exemplos abaixo. Desconsiderando-se as perdas, por exemplo, se a temperatura de elevação adiabática (tad) for de 35°C , e seu lançamento (t_l) a 20°C , a temperatura máxima será 55°C . Tomando-se como média diária anual uma temperatura de ($tamb$) 25°C , o dt seria 30°C .

PAULON (1987), afirma que, aproximadamente, a queda de 1°C de temperatura acarreta uma tensão térmica da ordem de $0,2\text{ MPa}$.

No exemplo isto resultaria em uma tração gerada no concreto de 6 MPa e caso o material não suportasse esta atenção ele fissuraria.

Considerando-se que valores de resistência à tração entre 3 e 5 MPa são encontrados em concretos convencionais utilizados nas estruturas de edifícios, para estes casos os valores limites de dt seriam entre 15°C e 25°C . No exemplo citado, portanto, certamente se teria fissuração.

NEVILLE (1997) e CANOVAS (1987) colocam que de uma forma geral, dt superiores a 20°C levam à fissuração do concreto. Podendo dt menores, em determinadas situações, também levarem à fissuração.

As formas mais utilizadas na construção civil para se obter este controle são as seguintes:

- Pré-Resfriamento do concreto;
- Substituição de parte do cimento por adições pozolânicas;
- Redução do consumo de cimento;
- Concretagem em camadas com intervalo de tempo entre as mesmas.

Pré-Refrigeração

Conforme (GAMBALE et al, 2002) um fator de grande influência na temperatura que o concreto irá atingir na estrutura é a temperatura do concreto fresco, ou seja, a temperatura de lançamento do concreto. À medida que se diminui a temperatura de lançamento, menor será a temperatura máxima na estrutura.

A refrigeração do concreto é um dos procedimentos mais utilizados para reduzir a temperatura máxima do concreto, sem atrasar o cronograma da obra. Em grandes obras, muitas vezes é mais econômico refrigerar o concreto e aumentar a altura das camadas, diminuindo desta forma o gasto com preparação de superfícies, com montagem de formas, desforma e cura.

As formas de refrigeração mais utilizadas para concretos são as seguintes:

- Utilização de gelo em substituição parcial da água de amassamento.
- Resfriamento prévio dos agregados, por exemplo, com nitrogênio.

Para as obras correntes no Brasil a forma mais utilizada é o uso do gelo.

Com a substituição de parte de água por gelo, entre 30% e 60%, pode-se obter significativa redução da temperatura de lançamento (tl) e, por conseguinte a redução da temperatura total e do gradiente de (dt).

Além da redução do gradiente térmico (dt) a utilização do gelo traz vantagens técnicas como melhoria da trabalhabilidade do concreto e redução do consumo de cimento para uma mesma trabalhabilidade (economia de cimento), além de pequenos retardos no tempo de pega.

Substituição de parte do cimento por adições pozolânicas

As substituições parciais de cimento por adições como cinza volante e escória de alto forno, as quais produzem muito menos calor nas suas reações que o cimento portland levam a significativas reduções de calor. No Brasil os cimentos CP III-32- cimento portland de alto forno pode ser produzido com substituições de até 65% do cimento portland por escória de alto forno e o CP IV 32 - cimento portland pozolânico com até 50% de substituição de cinza volante. No caso da utilização destes cimentos se obtém grandes reduções de geração de calor.

Outra forma de substituição do cimento por pozolonas mais fortes, como é o caso da Sílica Ativa. Neste caso substituições entre 6 a 8%, em peso de cimento Portland por Sílica ativa, podem reduzir o consumo de materiais cimentantes, para uma mesma resistência à compressão, mas como neste caso se reduz à quantidade total de materiais cimentantes há também significativas reduções na geração total de calor.

Redução do consumo de cimento

A quantidade de cimento no concreto é diretamente responsável pelo calor de hidratação gerado, então a redução nos consumos de cimento, sem prejuízos para as propriedades mecânicas, leva a reduções de calor e por consequência menor fissuração e maior durabilidade do material.

É possível se reduzir o consumo de cimento basicamente de duas formas: substituição de parte do cimento por pozolanas potentes (sílica ativa, metacaulim ou cinza de casca de arroz), conforme

indicado no item anterior, ou redução no consumo de cimento através da utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes.

Os aditivos plastificantes e superplastificantes permitem que se reduza a quantidade de água na mistura, para uma mesma trabalhabilidade, em 10% e 25% respectivamente. Com isto para concretos de mesma resistência (mesma A/C) pode-se reduzir proporcionalmente a quantidade de cimento na mistura.

As reduções de cimento, advindas do uso destes aditivos proporciona reduções no calor gerado pelo concreto.

Concretagem em camadas com intervalo de tempo entre as mesmas

Para que se tenha uma boa dissipação do calor de hidratação, a que a temperatura adiabática se eleva, sem que se tenha significativo gradiente térmico, se podem estabelecer intervalos de concretagem em camadas. As camadas de concretagem devem ter uma altura de tal ordem que as tensões não ultrapassem limites admissíveis.

Considera-se como intervalo mínimo entre concretagens sucessivas o tempo suficiente para o preparo das formas e juntas de concretagem e, como tempo máximo, o valor a partir do qual seu aumento não trará benefícios ao controle de tensões térmicas (PAULON, 1987).

A.1.3 - Considerações Finais

O conhecimento das propriedades térmicas do concreto em estruturas e especificamente em estruturas de grande volume é de fundamental importância para uma correta avaliação do comportamento térmico e distribuição de temperaturas no interior da peça. As propriedades térmicas podem indicar possíveis ocorrências de fissuras de origem térmica.

Com auxílio este trabalho busca informar o meio técnico a respeito da importância das propriedades térmicas dos concretos e contribuir para que sejam reduzidas significativamente as fissurações de origem térmicas muito presentes nas obras atuais e que trazem como consequência a penetração do meio agressor ao interior do concreto promovendo a formação de pilhas eletroquímicas para um processo eletroquímico de corrosão, com a fragilização progressiva das estruturas.

Nota de Agradecimento: Agradecemos ao Eng. Prof. Luiz Eduardo Cardoso pelas contribuições neste item.

A.2 - Processos Químicos de Deterioração dos Concretos

A.2.1 - Deterioração por ácidos

O ataque por soluções ácidas resulta muitas vezes na dissolução da pasta de cimento, seguida da hidrólise de compostos que ocorre com maior ou menor intensidade de acordo com a natureza química do agente precursor do ataque e das condições de umidade do concreto. Com o avanço do ataque, ocorrem alterações na microestrutura do concreto, ocasionando um aumento da porosidade e, conseqüentemente, facilitando o transporte da água, dentre outros agentes que favorecem o desencadeamento de processos corrosivos da armadura.

Como exemplo da deterioração por ácidos temos o fenômeno conhecido como chuva ácida, causada

por óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre da queima de combustíveis em veículos automotivos, indústrias e termelétricas, que na atmosfera, em presença de umidade e oxigênio, formam os ácidos sulfuroso (H_2SO_3), sulfúrico (H_2SO_4) e nítrico (HNO_3). Esses ácidos, depositando-se sobre as estruturas de concreto podem causar a desagregação da camada superficial do concreto, aumentando a sua porosidade e favorecendo o mencionado ingresso da água e de agentes agressivos.

A.2.2 - Deterioração por sais

Os sais de modo geral provocam a deterioração dos concretos, como exemplo citam-se os sais de amônio que são muito destrutivos porque reagem com o meio alcalino liberando amônia (NH_3) e eliminando o hidróxido de cálcio responsável pela alcalinidade do concreto. Citam-se também, os sais de magnésio que podem ocasionar a reação dos íons magnésio com o hidróxido de cálcio, formando o hidróxido de magnésio e causando a lixiviação do íon cálcio sob a forma de sal solúvel. Também são bastante agressivos os sais facilmente hidrolisáveis, como o cloreto de ferro III (FeCl_3) e o cloreto de alumínio (AlCl_3), que formam ácido clorídrico em contato com a água.

Cabe também considerar o cloreto de sódio, presente na água do mar e que é o principal agente agressivo responsável pela deterioração das estruturas de concreto armado nas regiões marítimas. Como mencionado anteriormente, no concreto, a corrosão induzida por íons Cl^- inicia-se pela quebra localizada da camada passiva do aço-carbono com formação de macrocélulas constituídas por uma pequena área anódica (pite) e uma grande área catódica ao redor do pite. Dependendo do teor de íons Cl^- , vários pites podem ser nucleados e com o tempo os pites podem coalescer formando macrocélulas de grande área anódica e catódica.

A norma ABNT NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) cita a concentração crítica de íons Cl^- , em relação à massa de cimento, entre 0,15 % e 0,40 % para concreto armado e de 0,05 % para o concreto protendido. O código Americano ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2011), cita valores entre 0,15 % a 1 % para concreto armado e de 0,06 % para concreto protendido. A norma Europeia EN 206-1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2013) cita valores entre 0,20 % a 0,40 % para o concreto armado e valores entre 0,10 % a 0,20 % para o concreto protendido.

Outros valores críticos são encontrados na literatura. Isso ocorre por várias razões, citando-se a heterogeneidade do concreto; o pH e a concentração de oxigênio da água de poro junto à armadura; o tipo e a condição da superfície do aço; presença de vazios nas vizinhanças da armadura e as diferentes metodologias adotadas para a determinação desse teor, entre outros.

A contaminação por íons Cl^- ocorre somente por meio da penetração de solução aquosa contendo cloretos. Condições de molhamento e secagem de estruturas de concreto com solução salina são as mais agressivas. A contaminação ocorre durante o contato da superfície do concreto com a solução salina. No período de secagem, somente a água é eliminada por evaporação. Durante um novo período de molhamento mais solução salina penetra aumentando o nível de contaminação.

Assim, a condição de molhamento contínuo, como imersão em água do mar, é menos agressiva.

Os íons Cl^- presentes na solução podem contaminar o concreto por quatro mecanismos: sucção por capilaridade devido aos vazios na pasta de cimento e à interface pasta/agregado; permeação devido ao gradiente de pressão; difusão devido ao gradiente de concentração e migração devido à diferença

de potencial. Além desses mecanismos, a presença de fissuras no concreto contribui para a rápida penetração da solução salina, constituindo a forma mais rápida de contaminação. A penetração pelo processo de difusão (segunda lei de Fick) tende a ser o processo de contaminação dominante dos íons Cl^- em um concreto de excelente qualidade. Porém, em um concreto de baixa qualidade o processo de contaminação por capilaridade será dominante. E em um concreto que apresenta fissuras, a entrada de íons cloreto por transporte direto é preferencial.

Na literatura, algumas das principais reações representativas da corrosão pelo ataque dos íons Cl^- são as seguintes.



Para o caso de portos e terminais, onde é comum a utilização de estacas e estruturas de concreto, todas essas condições são encontradas com muita frequência, sendo que, cada uma delas possui um comportamento diferente em termos de corrosão, conforme pode ser visto abaixo:

Zonas enterradas e zonas permanentemente submersas

Nessas áreas o concreto possui boa resistência à corrosão, principalmente nas regiões mais profundas, pelos seguintes motivos:

Ausência de oxigênio: A ausência de oxigênio, principalmente nas regiões mais profundas, não permite que ocorram as reações catódicas e consequentemente o processo de corrosão não tem continuidade. Se o oxigênio necessário para a reação catódica for limitado ou ausente ela não se processa, inibindo, em consequência, a reação anódica. Cumpre observar que, na medida que nos aproximamos da maré mínima, onde começa a zona de variação de marés, a corrosão já fica mais intensa, devido à presença do oxigênio.

Formação de Película Protetora: A difusão dos íons existentes na água do mar diminui muito com o passar do tempo, devido à formação na superfície de concreto de uma película densa de carbonato de cálcio (CaCO_3) e hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), resultantes da reação entre os íons bicarbonato (HCO_3^-) e magnésio (Mg^{++}) da água do mar e o hidróxido de cálcio do concreto. Essa película densa retarda e acaba impedindo a penetração de cloreto e sulfato no concreto, fazendo com que a corrosão seja mais suave.

Inundação dos poros capilares: Os polos capilares do concreto se tornam cheios de água, restringindo a penetração de oxigênio, que já é escasso nessas regiões.

Zonas de variação de marés e de respingos: Nas zonas de variação de marés e de respingos, temos problemas importantes de corrosão, devido à ação alternada de molhagem e secagem, com a presença de oxigênio e o funcionamento ativo das células de aeração diferencial. Essa ação alternada causa também a saturação do concreto com água do mar e posterior evaporação dessa água, com o

consequente acúmulo de sais na superfície do concreto, o que torna o processo corrosivo bastante severo nessas regiões, necessitando sempre de cuidados especiais de proteção, como a utilização de jaquetas com anodos galvânicos de proteção catódica, solução de comprovada eficácia e muito utilizada no mundo inteiro.

Zona permanentemente aérea: Já nas áreas atmosféricas a estrutura de concreto fica sob a ação de névoa salina, fazendo com que a corrosão seja também muito importante, embora espere-se que seja menos severa do que na zona de variação de marés e de respingos.

ANEXO B – MECANISMO ELETROQUÍMICO ASSOCIADO À CORROSÃO EM CONCRETO

A intensidade da corrosão das armaduras está diretamente relacionada com a umidade do concreto, ou seja, com a sua resistividade elétrica. Um grau crítico de umidade é fundamental para o início da corrosão da armadura. As reações de corrosão só ocorrem quando a superfície da armadura está em contato direto com a fase líquida do concreto, ou seja, com a solução aquosa eletrolítica que preenche a rede de poros e capilares.

Para a corrosão, também é fundamental a presença de oxigênio dissolvido na solução eletrolítica. Em geral, assume-se que o oxigênio controla o processo de corrosão em concreto, devido ao seu acesso lento até a superfície da armadura. No entanto, em estruturas aéreas, nem sempre isto é válido, podendo o processo de corrosão ser controlado pela mencionada resistividade elétrica do concreto.

Como exemplo prático da influência da água e do oxigênio, cita-se que a taxa de corrosão da armadura é insignificante quando o concreto está muito seco (pouco eletrólito), mesmo havendo o livre acesso do oxigênio na sua superfície. No caso de um concreto saturado (máximo volume de umidade), a taxa de corrosão também é muito lenta, devido à restrição do acesso de oxigênio dissolvido no eletrólito. No entanto, caso o concreto esteja úmido, mas não saturado, espera-se um processo intenso de corrosão.

Em atmosfera rica em íons cloreto (Cl^-), como o ambiente marinho, predomina a contaminação do concreto com esses íons dissolvidos em água. Geralmente, locais de acúmulo de água pluvial contaminada, água de condensação e, especialmente, sujeitas a ciclos de molhagem e secagem são mais suscetíveis à corrosão intensa decorrente do ataque desse agente. A corrosão é desencadeada quando um valor limite de concentração de Cl^- é atingido na interface aço/concreto. Com isso, a estabilidade da camada passiva é alterada, com quebra localizada e formação de pites de corrosão.

A estabilidade da camada passiva também é normalmente alterada pela redução do pH da água de poros do concreto (fase líquida do concreto), com isto, é estabelecido um processo de corrosão da armadura. Em geral, a diminuição do pH do concreto ocorre por reações do CO_2 com componentes alcalinos da pasta de cimento. Esse gás está presente na atmosfera, sendo a sua concentração maior no ambiente de grandes centros urbanos.

O mecanismo eletroquímico da corrosão das armaduras de aço-carbono enseja a formação de uma célula de corrosão, com presença de áreas anódicas e áreas catódicas na superfície metálica. Uma

célula de corrosão eletroquímica é esquematizada na Figura B.1. Nessa figura, são apresentadas, simplificadamente, as reações indicadas na literatura como representativas do processo de corrosão do aço-carbono em concreto. Na região anódica, ocorre oxidação do metal ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$) e, na catódica, redução do oxigênio dissolvido no eletrólito ($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$). Entre essas regiões, há formação de um circuito elétrico: no metal há condução de corrente elétrica de natureza eletrônica e, na solução de água de poro (eletrólito), condução de corrente elétrica de natureza iônica e, na interface metal/meio, corrente elétrica decorrente das reações de transferência de cargas.

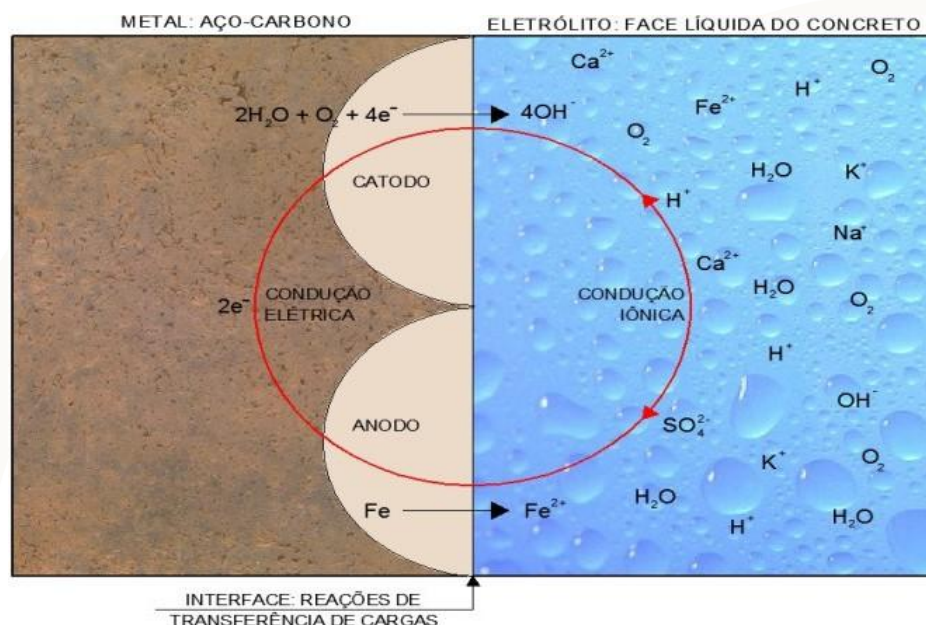


Figura B.1 Desenho esquemático de uma célula de corrosão eletroquímica em concreto armado.

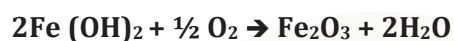
Devido às diferentes localizações do anodo e do catodo, a corrosão da armadura pode ocorrer de duas maneiras distintas, sendo conhecidas como corrosão por microcélulas e corrosão por macrocélulas. No concreto, as macrocélulas de corrosão podem coexistir com as microcélulas de corrosão na superfície das armaduras.

A corrosão por microcélula ocorre em escala microscópica e é formada por inúmeras microcélulas de corrosão nas quais as regiões anódicas e as regiões catódicas estão tão próximas que o efeito da resistência elétrica do eletrólito é baixo. Cada elétron produzido pela reação anódica é consumido por uma reação catódica em local imediatamente adjacente, não há corrente no volume da massa de concreto e o potencial de circuito aberto parece uniforme ao longo da superfície do metal. Geralmente a corrosão por micro célula é do tipo generalizado. No concreto, esse tipo de corrosão das barras de aço é típico de corrosão induzida por carbonatação, nos casos em que a penetração do CO_2 ocorre de maneira uniforme. Quando a corrosão é desencadeada pelos íons Cl^- , a corrosão generalizada ocorre nos casos em que grandes quantidades de cloreto penetram uniformemente no concreto de comprimento.

A corrosão por macrocélula é caracterizada pela presença de uma área anódica e uma área catódica, fisicamente separadas e macroscopicamente visíveis. A formação dessas regiões distintas na barra de aço-carbono ocorre quando há quebra localizada da camada passiva que pode ser induzida pela

carbonatação não uniforme do concreto ou pela concentração local de íons cloreto. A resistividade elétrica do concreto é o parâmetro predominante de controle para o sistema de macro célula, já que isso influencia fortemente na intensidade da corrente iônica de macro célula e, conseqüentemente, na taxa de corrosão local da armadura.

Iniciado o processo de corrosão, ocorre a sua propagação com formação de produtos de corrosão. Inicialmente, há formação do Hidróxido de Ferro $\text{Fe}(\text{OH})_2$, que em meio não aerado se transforma em magnetita (Fe_3O_4), de cor preta ou esverdeada. Já em meio aerado, mais comum, o Hidróxido de Ferro se transforma em Fe_2O_3 , de cor castanho-alaranjada, de acordo com a reação abaixo:



(Formação do Produto de Corrosão em Meio Aerado)

Essas duas colorações são muito comuns de serem observadas em estruturas de concreto em processo de corrosão, servindo como alerta sobre o problema e chamando a atenção para a necessidade da utilização urgente de métodos de mitigação da corrosão em curso.

Passado algum tempo de evolução do processo de corrosão, normalmente ocorre a fissuração do concreto ao redor da armadura, pois os produtos de corrosão do aço ocupam um volume maior do que o volume do metal corroído, levando a um aumento de pressão em torno das armaduras responsável pela fissuração. Com o progresso da corrosão, ocorre o desprendimento do concreto de cobertura, com exposição do trecho de armadura corroída.

Importante observar que a célula de corrosão aparece quando temos a presença de um eletrólito e porque existem diferenças de potencial ao longo da superfície do aço. Essas diferenças de potencial são causadas pelas variações de resistividade elétrica, temperatura e pH do concreto, pelas características intrínsecas do aço, como a variação da composição química e a presença de inclusões não metálicas e pelas tensões internas diferenciais causadas pelos processos de fabricação, conformação, corte, dobragem e soldagem das armaduras.

Importante também observar que a corrosão eletroquímica pode apresentar formas de corrosão diferentes, além da corrosão generalizada (em toda a extensão da armadura) e da localizada (com desgaste localizado causados por pites ou alvéolos), como a corrosão intergranular/transgranular (que podem levar à fratura quando há solicitação mecânica) e a corrosão por fragilização pelo hidrogênio (que pode fragilizar o aço fazendo com que ele perca uma de suas mais importantes características, a ductilidade).

Os processos de corrosão intergranular, transgranular e por fragilização pelo hidrogênio são extremamente perigosos, em especial para as estruturas de concreto protendido, porque podem levar a estrutura ao colapso sem aviso prévio. Problemas de corrosão nos cabos de protensão nessas estruturas são muito comuns de ocorrerem e precisam ser estudados e eliminados em tempo hábil, sob pena de acidentes e prejuízos severos.

ANEXO C – ARMADURA DE AÇO INOXIDÁVEL

Os aços inoxidáveis têm sido utilizados na construção civil não só como material estrutural, mas também como armadura em obras civis instalados em regiões de alta agressividade, como atmosferas marinhas, ou em regiões com intenso uso de sal de degelo, ou em indústrias químicas; ou em obras em que há controle de permeabilidade magnética e o aço-carbono não pode ser usado; ou em obras de vida longa prolongada (mais de 100 anos) ou em obras cujos custos de manutenção são muito elevados, por exemplo, decorrente de dificuldades de acesso; ou em obras cuja interdição para reparo causa transtornos à população.

O uso de barras de aço inoxidável não requer mudanças da concepção de projetos das obras civis e nem cuidados de manuseio. As armaduras de aço inoxidável podem ser utilizadas em obras novas (mais comum) ou em obras deterioradas, como elementos de substituição de armaduras de aço-carbono em locais críticos de uma obra.

O objetivo principal do uso de armaduras de aço inoxidável é estender a vida útil das estruturas (adequado para obras com vida útil desejada superior a 100 anos), reduzir os períodos de intervenções de manutenção corretiva e, conseqüentemente, reduzir os períodos de inatividade por elas causados.

Devido ao alto custo inicial da obra, o uso de armaduras de aço inoxidável é normalmente restrito à malha mais externa da estrutura de concreto armado, diretamente sujeita à contaminação por íons cloreto, enquanto nas outras áreas são utilizadas armaduras de aço-carbono.

Os aços inoxidáveis distinguem-se dos aços-carbono e dos aços de baixa liga, principalmente, pelo seu comportamento frente à corrosão, pois em ambientes oxidantes, normalmente na presença de oxigênio, ocorre formação de uma camada passiva de óxidos de Cr de natureza contínua, insolúvel e não porosa. Esta camada protege o metal da ação do ambiente agressivo, tornando o aço resistente à corrosão. A camada, filme ou película passiva é fundamental aos aços inoxidáveis para manter a resistência à corrosão, sendo sua formação e integridade função de inúmeras variáveis provenientes do meio de exposição, da composição química e dos fatores metalúrgicos característicos de cada tipo de aço inoxidável. O grau de proteção proporcionado pela camada passiva é também dependente da espessura da camada, de sua continuidade, aderência ao substrato e das velocidades de difusão iônica e eletrônica através do óxido. No entanto, caso as condições de exposição sejam alteradas, pode-se desestabilizar a homogeneidade da camada e provocar a degradação, primeiro da própria camada e depois do metal, decorrente de sua corrosão.

Os principais elementos de liga que normalmente são adicionados visando uma melhoria da resistência à corrosão são: Cr, Mo, N, Ni e Mn. O Cr é elemento essencial para a formação da camada passiva, devendo este, conforme mencionado, estar presente em um teor mínimo de 12 %. Com a associação de Cr e Mo, tem-se uma estabilização da camada passiva, mesmo na presença de íons cloreto.

Os aços inoxidáveis são classificados em cinco famílias distintas, definidas pela estrutura cristalográfica e pela presença de precipitados endurecedores, quais sejam: aços inoxidáveis austeníticos, martensíticos, ferríticos, endurecíveis por precipitação e duplex. Em termos estruturais, para a indústria da construção civil, são dois os tipos de aços inoxidáveis de real interesse: aços inoxidáveis austeníticos e aços inoxidáveis duplex.

Os aços inoxidáveis austeníticos contêm na sua matriz uma porcentagem de Cr mínima de 16 %, de Ni mínima de 8 % e um teor de C variando entre 0,02 % e 0,15 %. Outros elementos de liga podem ainda estar presentes. Os mais conhecidos são AISI 304, AISI 316 e AISI 317. O uso do aço inoxidável em armaduras de concreto teve início com o austenítico AISI 304. Um grande exemplo é o píer Progreso, o qual possui 2,1 km de extensão e está localizado no Golfo do México, na Península de Yucatán, ambiente de alta agressividade.

Os aços duplex são ligas a base de Fe, Cr e Ni com uma microestrutura ferrítico-austenítica na temperatura ambiente. Embora exista predominância das fases ferrítica e austenítica, microestruturas ferrítico-martensítica e austenítico-martensítica também podem ser encontradas, assim como aços triplex com microestrutura ferrítico-austenítico-martensítica. O teor de Cr dos aços duplex varia entre 21 % e 28 % e o de Ni entre 5 % e 7 %. Esses aços podem conter outros elementos em pequenas quantidades, tais como N, Mo, Cu, Si, Mn e W, os quais controlam o equilíbrio microestrutural e melhoram a resistência à corrosão. A maioria das ligas duplex contém teores de C inferior a 0,08 %. Em meios contendo íons cloreto, os aços inoxidáveis duplex apresentam resistência à corrosão superior aos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos, especialmente à corrosão sob tensão, à corrosão por pite e à corrosão em frestas. Hoje essa classe é constituída por quatro grupos, a saber:

- Aço UNS S32205: responsável por 80 % do aço inoxidável duplex consumido no mercado.
- Aços duplex com 25 % de Cr: como exemplo citam-se as ligas UNS S32550 (comercialmente conhecida como 255) e UNS S31260 (comercialmente conhecida como DP-3).
- Aços superduplex: (25 a 26) % de Cr e teores elevados de Mo e N, quando comparados aos presentes no grupo anterior. Como exemplo citam-se as ligas UNS S32507 (comercialmente conhecida como 2507), UNS S32760 (comercialmente conhecida como Zeron 100), UNS S32520 (comercialmente conhecida como UR52N+) e UNS S39274 (comercialmente conhecida como DP-3W).
- Aços lean duplex: os baixos teores de Ni e Mo desse grupo permitiram uma grande redução de custo e, conseqüente, ampliação das áreas de utilização. Eles possuem resistência mecânica equivalente aos aços duplex convencionais, mas menor resistência à corrosão localizada, mesmo possuindo resistência à corrosão comparável aos aços austeníticos mais largamente utilizados (AISI 304 e AISI 316).

Os aços inoxidáveis duplex apresentam uma resistência à corrosão superior em meios contaminados com cloreto decorrente dos maiores teores de cromo, molibdênio e nitrogênio, sendo, por isso, preferidos em ambientes de extrema agressividade. Como exemplo de construção que utilizou barras de aço inoxidável duplex, cita-se a ponte Haynes Slough na cidade de North Bend, estado de Oregon, Estados Unidos que foi construída utilizando aço inoxidável duplex UNS S32205. A obra foi finalizada em 2003 e espera-se, para ela, uma vida útil superior a 120 anos. Isto representa uma vida útil duas vezes e meia superior à apresentada pela ponte Conde Mc Cullough Memorial construída na mesma região na década de 1940 com armaduras de aço-carbono.

ANEXO D – USO DE INIBIDOR DE CORROSÃO

Nas últimas décadas, ocorreu um avanço no segmento da construção civil, o que inclui melhorias no controle tecnológico do concreto que garantem uma durabilidade superior às estruturas em relação às edificadas no passado. Como parte desses avanços, têm-se novas alternativas como medidas adicionais de proteção e melhorias em técnicas tradicionais, das quais se incluem o uso de inibidor de corrosão que é uma substância química que pode tanto retardar o estabelecimento de processo corrosivo como controlar a taxa de corrosão em curso.

Quando o inibidor de corrosão age de forma a influenciar as reações catódicas de corrosão é chamado de inibidor catódico. Se, por outro lado, ele influencia as reações de oxidação do metal, ele é chamado inibidor anódico. Aqueles que influenciam tanto as catódicas quanto as reações anódicas são denominados inibidores mistos.

Os inibidores catódicos são normalmente substâncias que fornecem íons metálicos capazes de reagir com os íons hidroxila existente no meio, produzindo compostos insolúveis que se precipitam sobre a superfície metálica na forma de um filme passivo que restringe tanto a difusão do oxigênio e, portanto, retardando a sua redução, como restringe a condução de elétrons. Com a formação do filme, observa-se uma diminuição do potencial (assume valores mais negativos) e da taxa de corrosão.

Os inibidores anódicos, geralmente, atuam de duas maneiras distintas. Podem conter ânions que reagem com os íons metálicos (cátions), formando compostos insolúveis que se precipitam sobre a superfície metálica na forma de um filme passivo (invisível e muito delgado); ou podem conter compostos capazes de acelerar a oxidação dos íons ferrosos - ferro II ($2\text{Fe}^{2+} + 4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_2$) a íons férricos - ferro III ($4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$), formando compostos insolúveis que se precipitam sobre a superfície metálica na forma também de um filme passivo. Com a formação do filme, tem-se uma menor taxa de corrosão e um potencial de corrosão mais nobre (mais positivo). Nota-se que formação do filme na superfície do metal deve ser completa, pois no caso de falhas (regiões sem filme) a taxa de dissolução do metal será maior do que a taxa na ausência do filme, levando à corrosão localizada.

Admite-se que os inibidores da corrosão específicos para corrosão localizada por pite (situação típica do aço no concreto) podem atuar pelas seguintes ações:

- Um processo competitivo dos íons nitrato com os íons cloreto na superfície metálica (adsorção específica), reduzindo a sua concentração superficial.
- Um processo competitivo dos íons nitrato com os íons cloreto dentro do pite (migração, balanço iônico), impedindo a evolução da redução local do pH e do aumento do teor de Cl^- os quais sustentam o crescimento do pite.
- Aumento da reserva alcalina (efeito tampão) no local de formação do pite.

No caso do concreto armado para novas estruturas, é comum que a adição do inibidor de corrosão seja definida quando da especificação do concreto, na etapa de projeto. No caso de estruturas existentes, o inibidor também é usado, o que ocorre por meio da impregnação da superfície do concreto. Outras modificações comuns seriam a realcalinização do concreto ou a extração de Cl^- .

Como importantes considerações quanto ao uso de inibidores de corrosão em concreto, podem ser destacadas as seguintes:

- Período de iniciação da corrosão: nesse período, a adição do inibidor no concreto, desde que em concentração elevada, pode retardar o estabelecimento da corrosão induzida por íons cloreto.
- Período de propagação da corrosão: nesse período, não há resultados claramente demonstrativos sobre a ação do inibidor de corrosão na redução da taxa de corrosão.
- Qualidade do concreto: parece que a qualidade do concreto (relação A/C), adições suplementares, cura, execução etc.) é um parâmetro mais importante no combate à corrosão das armaduras do que a presença do inibidor. Obviamente, estruturas duráveis são obtidas com a combinação de concreto de alta qualidade com adição de inibidor de corrosão.

ANEXO E – ARMADURAS COM REVESTIMENTO EM ZINCO POR IMERSÃO A QUENTE

E.1 - Introdução

Independentemente da observação de outras práticas de prevenção e combate à corrosão podem ser adotadas as seguintes alternativas para aumentar a resistência à corrosão das armaduras de concreto.

- Revestimento da armadura com zinco por galvanização a quente.
- Utilização de armadura com materiais mais resistentes à corrosão que o aço carbono.
- Aço carbono revestido com pintura anticorrosiva.
- Para ambientes considerados de altíssima corrosividade, pode-se realizar a pintura anticorrosiva sobre o aço carbono galvanizado por imersão a quente.
- Utilização de armadura com materiais mais resistentes à corrosão que o aço carbono.
- Aço-carbono revestido com pintura anticorrosiva.
- Para ambientes considerados de altíssima corrosividade, pode-se realizar a pintura anticorrosiva sobre o aço carbono galvanizado por imersão a quente.

E.2 - Revestimento da Armadura com Zinco por Imersão a Quente (Galvanização)

E.2.1 - Como prevenir a corrosão das barras de aço para armadura de Concreto

O método mais comum é assegurar que o concreto que cobre o reforço (a barra) seja da espessura adequada e que o concreto em si seja denso e impermeável.

Como muitas vezes a realidade em campo não condiz ao que foi projetado, uma linha de defesa importante é proteger da corrosão a própria barra.

A galvanização por imersão a quente consiste no revestimento de zinco sobre o aço-carbono. Para tanto, o aço é imerso em um banho de zinco fundido a uma temperatura entre 440 °C a 480 °C, o que resulta em uma reação metalúrgica entre o zinco e o ferro, isto é, o zinco penetra na rede cristalina do metal base, resultando em uma difusão intermetálica, ou seja, na formação de ligas de Fe-Zn, camadas intermetálicas, na superfície de contato do substrato.

Este processo torna o revestimento integrado desde o metal base até a superfície, onde a camada formada do revestimento isola as barras de aço do concreto ao redor.

As barras galvanizadas por imersão a quente oferecem muitas vantagens sobre as barras convencionais não revestidas, incluindo os seguintes itens:

- O aço fica protegido contra a corrosão antes de ser embutido no concreto.
- O zinco possui limite de concentração de cloreto mais alto para corrosão que o aço não revestido. Isso retarda significativamente o início da corrosão, que ocorre a partir de um limite crítico de íons cloretos junto à superfície das barras por galvanização por imersão a quente.
- A velocidade de corrosão do zinco no concreto é menor que a do aço, e os produtos de corrosão que o zinco forma restringem as tensões internas tão prejudiciais como as que o aço produz, quando sofre corrosão na condição de embutimento no concreto. Como resultado, o processo de deterioração do concreto é retardado, o que tem impacto positivo na vida útil da estrutura.
- Os revestimentos de zinco proporcionam, além de uma barreira física, uma proteção catódica, isto é, o zinco se oxidando preferencialmente ao aço, o que significa que se ocorrer alguma imperfeição ou trinca no revestimento, expondo o aço, a corrosão se concentrará preferencialmente na camada do zinco circundante, proporcionando assim uma proteção eletroquímica ao aço exposto. Dessa forma, o revestimento galvanizado não pode ser debilitado pelos produtos resultantes da corrosão do aço, como ocorre no caso de outros revestimentos tipo barreira, como por exemplo, o epóxi.
- A maior resistência à corrosão das barras galvanizadas por imersão a quente permite uma maior tolerância à diversidade e aplicações do concreto.
- Sua aplicação está padronizada de acordo com normas internacionais (ASTM A767, ISO 14657) que asseguram a qualidade e as características de aplicação.
- No Brasil existe a norma ABNT NBR 16300:2016 - Galvanização por imersão a quente de barras de aço para armadura de concreto armado - Requisitos e métodos de ensaio.
- As barras de aço para armadura de concreto armado galvanizadas por imersão a quente atendem aos requisitos da norma NBR 7480:2007 – aço destinado a armaduras de concreto armado.
- Aumenta a vida útil da estrutura. O uso de barras de aço galvanizadas prolonga os intervalos de manutenção das estruturas de concreto em razão da deterioração por processo de corrosão das armaduras, reduzindo assim, substancialmente o custo de manutenção como um todo.

De uma forma geral, de barras de aço galvanizadas, podem ser tratadas do mesmo modo que as barras sem revestimento e não exigem precauções especiais para proteger o revestimento durante o manuseio, transporte e instalação na obra.

E.2.2 - Desempenho, no concreto, das barras de aço para armaduras, galvanizadas por imersão a quente

Sobre as barras de aço galvanizadas a quente cabe ressaltar os seguintes pontos:

- Estudos mostram que a galvanização da armadura pode aumentar 2,5 vezes a tolerância ao ataque dos íons cloreto em relação à armadura não revestida.
- A capacidade protetora do filme passivo hidroxizincato é ótima na faixa de pH entre 12,0 e 12,8.
- Ocorre a passivação do revestimento do zinco dentro do concreto, pela formação de camadas de hidroxizincato de cálcio, muito aderentes, uma vez que o concreto é endurecido.
- A formação do hidroxizincato de cálcio (CaHZn) começa imediatamente em contato com a massa de cimento molhado, reduzindo assim o valor do pH ao redor de 9,0, levando o zinco ao seu estado passivado, portanto cessando sua oxidação, estabilizando o mesmo e isolando-o do ambiente circundante. A reação com zinco cessa logo que o concreto endurece.
- Há evidências que sugerem que a difusão dos produtos resultantes da corrosão do zinco ajuda a preencher os espaços porosos na interface concreto/armadura, tornando essa área menos permeável e, portanto, é reduzido o transporte de substâncias agressivas (como os cloretos) através desta interface, que podem atacar a armadura.

E.2.3 - Espessura do revestimento de zinco

Dependendo da agressividade e da condição de exposição, um revestimento com espessura entre 80 µm e 200 µm (barra de diâmetro entre 8 mm e 16 mm) pode conferir uma proteção adequada às estruturas de concreto contra deterioração em decorrência da corrosão das armaduras.

Embora o uso de armaduras revestidas pelo processo de zincagem por imersão a quente seja eficiente na proteção do aço tanto em concreto contaminado com íons cloreto como carbonatado, observa-se que o aumento da vida útil da estrutura é obtido quando do conhecimento das limitações da técnica e de sua aplicação correta. Devido ao pouco conhecimento da técnica no País, recomenda-se a realização de estudos, considerando padrões nacionais de produção, de construção e condições climáticas representativas.

E.2.4 - Obras importantes realizadas no Brasil

No Brasil já existem residências e edificações que utilizaram a barra de aço galvanizada por imersão a quente, para armadura de concreto armado.

As três principais obras que exemplificam este uso são as seguintes:

- Museu Iberê Camargo – em Porto Alegre -100% com vergalhões galvanizados -2008.
- Museu de Arte do Rio de Janeiro – Colunas e nova cobertura – 2017.
- Instituto Moreira Sales – no Rio de Janeiro - 100% com vergalhões galvanizados – 2017.

O ICZ – Instituto de Metais não Ferrosos, disponibiliza informações técnicas em seu site, www.icz.org.br ou no e-mail contato@icz.org.br.

ANEXO F – PROTEÇÃO CATÓDICA DE ARMADURAS DE CONCRETO

F.1 - Introdução

O concreto enquanto novo e em bom estado de conservação possui pH elevado e alta resistividade elétrica. Essas características conferem excelente proteção contra a corrosão para as armaduras nele embutidas. Com o passar do tempo o concreto pode deteriorar-se em razão da penetração de água e agentes agressivos como dióxido de carbono, íons cloreto, ácidos, sais diversos, dentre outros. Muitas vezes, as condições são propícias para que o concreto seja um eletrólito adequado para a formação de células de corrosão, que afetam a integridade e a segurança da estrutura.

Uma forma eficaz de prevenir ou mitigar significativamente processos corrosivos, com segurança e eficiência, consiste na instalação de anodos de proteção catódica, que podem ser do tipo galvânico, para os sistemas de proteção catódica galvânica ou do tipo inerte, para os sistemas de proteção catódica por corrente impressa.

Os anodos podem ser instalados em estruturas novas, durante a construção, para evitar o início dos processos corrosivos, durante os serviços de recuperação do concreto em que a corrosão já está em curso e há sinais visíveis de deterioração e, em certos elementos, em que as medições dos potenciais de corrosão das armaduras indicaram o seu estado ativo de corrosão.

F.2 - Proteção Catódica Galvânica

Para proteger as armaduras contra a corrosão uma solução eficiente, segura e muito utilizada consiste na utilização de anodos galvânicos de liga de zinco de alta pureza, fabricados especialmente para essa finalidade.

Esses anodos utilizam um encapsulamento especial com argamassa apropriada de pH elevado, igual ou superior a 14, com a finalidade de mantê-los permanente ativados. Há também a possibilidade de adições na argamassa para a formação de complexos hidrossolúveis capazes de manter aprisionados os íons de zinco, diminuindo assim o efeito barreira dos produtos de corrosão do zinco.

Experiências práticas mostram que os anodos de zinco, quando utilizados diretamente em contato com o concreto, sem o encapsulamento, ficam passivados em pouco tempo, deixam de funcionar corretamente e não fornecem proteção adequada às armaduras. Assim sendo, os anodos nunca devem ser instalados diretamente em contato com o concreto, sem esse encapsulamento, sob pena de tornarem-se imprestáveis, razão pela qual recomenda-se que somente sejam utilizados para essas aplicações anodos de comprovada procedência e com a devida certificação de garantia e qualidade.

O núcleo de cada um desses anodos é fundido em uma alma de arame recozido, para permitir que sejam amarrados com facilidade nas armaduras, sendo importante que a continuidade elétrica entre o arame e as barras de armadura seja verificada durante a instalação.

Esses anodos são fabricados em vários tipos, formatos e tamanhos, dependendo da aplicação que se deseja e podem ser dimensionados para a vida determinada pelo projetista, sendo que, como todo sistema galvânico, a vida útil e o desempenho dependem de vários fatores como a área de aço a ser

protegida, a resistividade elétrica, concentração de cloretos, temperatura e teor de umidade do concreto, além da quantidade, espaçamento e massa dos anodos.

Uma aplicação importante e econômica dos anodos galvânicos consiste na sua utilização para a proteção de regiões seletivas, onde os problemas de corrosão estão atuantes, eliminando a necessidade de instalação nos locais onde o concreto ainda está íntegro e sem contaminação.

F.3 - Proteção Catódica por Corrente Impressa

Para o caso de grandes estruturas de concreto, em especial quando a densidade de armadura é elevada, o sistema de proteção catódica mais indicado pode ser o do tipo por corrente impressa, onde são utilizados anodos inertes especiais alimentados por um retificador de corrente.

Os anodos inertes utilizados para esses casos podem ser de titânio revestido com óxidos mistos de metais nobres (Ti-MMO), de titânio platinizado (Ti-Pt), polímeros condutores ou tinta condutora, no formato de telas, fios ou pequenos cilindros, sendo que já existem anodos mais modernos, chamados de anodos híbridos, especialmente desenhados para as aplicações em obras de concreto. Esses anodos possuem uma parte funcionando como anodo galvânico e a outra parte como anodo inerte, alimentado por uma pequena bateria interna, com a finalidade de fazer uma polarização inicial das armaduras, facilitando o funcionamento posterior dos anodos galvânicos.

A definição do método mais indicado de proteção catódica, com anodos galvânicos ou por corrente impressa, depende de um estudo criterioso onde são analisadas as vantagens técnicas e econômicas de cada método para uma determinada estrutura de concreto.

F.4 - Proteção Catódica em Estruturas de Concreto na Água do Mar

Estruturas de concreto com elementos imersos na água do mar, como é o caso de estruturas de portos e terminais marítimos, estão sujeitas à corrosão severa, devido, principalmente, à presença de íons cloreto, que contribuem para baixar a resistividade elétrica da água, além de desencadear processo corrosivo da armadura.

Nessas estruturas, as zonas de variação de maré e de respingo e as regiões permanentemente aéreas, em contato com a névoa salina, são as que apresentam corrosão mais severa e as que precisam de atenção especial.

Já as zonas mais profundas, permanentemente submersas e as regiões enterradas, principalmente por estarem sujeitas a uma baixa concentração de oxigênio, apresentam corrosão bem mais suave e não são motivo de grande preocupação, a não ser que estudos específicos recomendem cuidados especiais para uma determinada estrutura.

Para as zonas logo abaixo da maré mínima, zona de variação de maré e zona de respingo, a solução mais indicada consiste na instalação de anodos galvânicos de proteção catódica, que podem ser instalados com facilidade e baixo custo, com o auxílio de jaquetas de polietileno especialmente desenhadas para essa finalidade.

Nas zonas permanentemente aéreas, mediante análise dos potenciais de corrosão e definição das áreas mais afetadas pelos processos corrosivos, a solução mais usualmente indicada consiste na instalação de anodos galvânicos embutidos no concreto, que podem ser instalados durante a

construção, por ocasião de um eventual serviço de recuperação estrutural ou ainda nos casos em que a corrosão ainda não estiver aflorando.

F.5 - Normas e Especificações Técnicas

Está em fase de elaboração a norma técnica brasileira que regulará os estudos de corrosão e a aplicação de proteção catódica em estruturas de concreto, sugerimos ao leitor acompanhar a publicação desta norma.

As normas e especificações técnicas internacionais mais utilizadas são as seguintes:

- Norma ASTM C 876-15 (Standard Test Method for Corrosion Potentials Uncoated Reinforced Steel in Concrete).
- Norma ISO12696:2016 (Cathodic Protection of Steel in Concrete)

São muito utilizados, também, os Standards NACE abaixo:

- Standard NACE SP0187-2017 (Design for Corrosion Control of Reinforcing Steel in Concrete)
- Standard NACE SP0112-2017 (Corrosion Management of Atmospheric Exposed Reinforced Concrete Structures)
- Standard NACE SP0290-2007 (Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures)
- Standard NACE SP0408 (Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Buried or Submerged Concrete Structures).

Nota: encontra-se em fase de consulta pública a norma brasileira de proteção catódica de estruturas de concreto. Recomendamos ao leitor atenção para a data de publicação.

F.6 - Procedimento

O procedimento recomendado para o estudo, projeto, fornecimento e instalação dos sistemas de proteção catódica em estruturas de concreto é o seguinte.

- Primeira Etapa: análise dos desenhos, inspeção visual, medições dos potenciais das armaduras e demais medições de campo.
- Segunda Etapa: análise das informações de campo e elaboração do projeto de proteção catódica, com definição do tipo de proteção a ser utilizado (galvânico ou corrente impressa), especificação dos materiais, desenhos e instruções de instalação.
- Terceira Etapa: fornecimento dos materiais e instalação dos anodos.
- Quarta Etapa: acompanhamento permanente das condições de operação da estrutura de concreto, mediante medições periódicas dos potenciais de corrosão e definição dos locais onde a instalação de novos anodos se torna necessária.

Nestas medições periódicas recomenda-se que seja atingido, pelo menos, um critério de proteção (conforme descrito na norma ISO12696:2022). De forma a verificar os critérios de proteção catódica, é necessário criar-se uma metodologia para medição de “potenciais off” (potenciais desconectados

dos anodos). Para isto o projetista deve propor dispositivos que permitam avaliar o potencial de polarização, como por exemplo, pontos de teste com cupom mostrado na figura F.1.

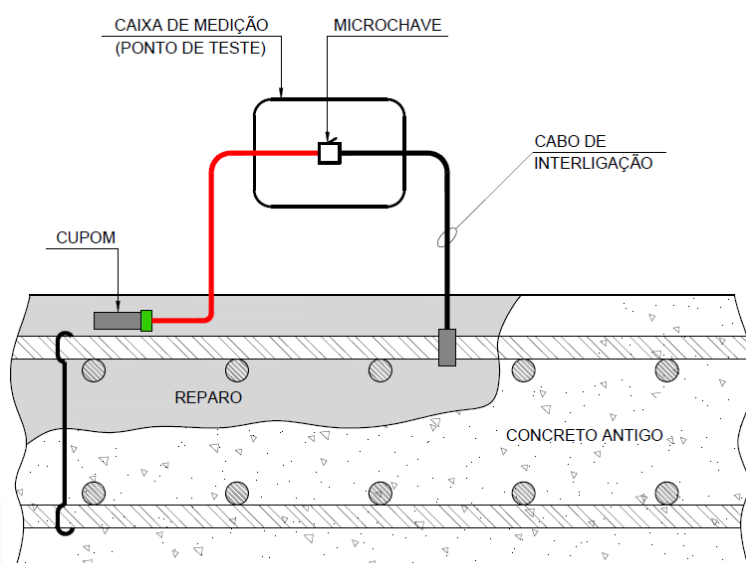


Figura F.1 - Desenho esquemático de um ponto de teste com cupom em estrutura de concreto, para acompanhamento dos potenciais de polarização em uma estrutura com proteção catódica.

Fonte: Revista da Associação Brasileira de Corrosão – Artigo Técnico – Barreto, F.S. e outros

F.7 - Critérios de Proteção

As diversas normas e especificações técnicas que tratam do assunto apresentam critérios de proteção ligeiramente diferentes, que colocamos a seguir:

Norma ISO 12696 (citada como critério básico desta Recomendação Prática)

- um potencial “OFF instantâneo” mais negativo que -790 mV em relação ao eletrodo CuCuSO_4
- um decaimento do potencial ao longo de no máximo 24 h de pelo menos 100 mV a partir do “OFF instantâneo”
- um decaimento do potencial durante um período prolongado (tipicamente 24 h ou mais) de pelo menos 150 mV a partir do “OFF instantâneo”, sujeito a um decaimento contínuo e ao uso de eletrodos de referência (não sondas de decaimento potencial) para a medição estendida além de 24 h

NOTA: Como critério investigativo, pode-se considerar buscar um potencial de aço/concreto em uma estrutura totalmente despolarizada após o sistema de proteção catódica ter sido desligado por um longo período (tipicamente 7 dias ou mais) menos negativo que -220 mV em relação ao CuCuSO_4 . Este potencial de aço na estrutura indica que o aço é passivo.

Não será permitido potencial instantâneo de aço/concreto superior a 1170 V mV em relação a CuCuSO_4 para aço de reforço simples. Para aço de alta resistência (>550 N/mm²) ou aço protendido, o limite de potencial seguro deverá ter sido determinado e documentado como parte do projeto.

Standard NACE SP0216 - Sacrificial Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures

a) Critério -720 mV CuCuSO₄

Se o potencial do aço em concreto úmido saturado for mais negativo que -720 mV em comparação com um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre com o anodo de sacrifício desconectado, considera-se que o aço não está corroído. Deve-se tomar cuidado para que o anodo de sacrifício não entre em curto com o aço, gerando potenciais negativos enganosos.

b) Decaimento de Polarização de 100 mV

Uma polarização mínima de 100 mV deve ser obtida no local mais anódico a cada área de 50 m², para potencial de corrosão mais negativo que -200 mV em comparação com um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre. Se o potencial de corrosão ou o potencial de decaimento for menos negativo que -200 mV CuCuSO₄, o aço é passivado e não é necessária polarização mínima.

Standard NACE SP0408 - Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Buried or Submerged Concrete Structures

a) Decaimento de Polarização de 100 mV

b) Critério de potencial polarizado -850 mV CuCuSO₄ (enterrado) ou -784 mV Ag/AgCl (água do mar)

Este critério é usado regularmente para estruturas de aço enterradas e submersas, mas não com tanta frequência para estruturas de concreto armado, devido à corrente adicional necessária para polarizar a estrutura em mais de 100 mV. Se o potencial de desligamento instantâneo do aço de reforço for -850 mV CuCuSO₄ (enterrado) ou -784 mV Ag/AgCl (água do mar) ou mais negativo, o aço de reforço estará protegido.

Se aços de alta resistência (> 690 MPa), que são suscetíveis à fragilização por hidrogênio, estiverem presentes na estrutura de concreto, deve-se tomar cuidado para garantir que o potencial OFF instantâneo não seja mais negativo que -1.000 V medido em um eletrodo de cobre-sulfato de cobre a 25 °C, para evitar a fragilização por hidrogênio.

Notas:

1. Sempre que possível deve-se comparar as medições feitas antes e após a instalação dos anodos nos sistemas galvânicos.
2. A norma ISSO 12.696:2022 estabelece três critérios para verificação de sistemas de proteção catódica, são eles:
 - O critério de polarização catódica de 100mV em relação ao eletrodo de Cu/CuSO₄, que compara o “potencial off instantâneo” com o potencial medido após a despolarização completa da armadura em até 24h (potencial natural - ver observação após a nota 5).
 - Queda de potencial de pelo menos 150mV em relação ao eletrodo de Cu/CuSO₄ em períodos prolongados (acima de 24h), que avalia o “potencial off instantâneo” ao potencial medido após a despolarização da armadura acima 24h.

- Valor de “potencial off instantâneo” mais negativo que -720mV em relação ao eletrodo de Ag/AgCl, mais aplicado em casos de proteção catódica por corrente impressa e em eletrodos permanentes.
- 3. O período de despolarização completa da armadura pode variar de 12 a 48 horas ou mais e depende de várias condições. Mudanças nas condições ambientais, como temperatura e umidade, podem alterar o potencial de um dia para o outro.
- 4. Períodos mais longos de observação podem ser necessários para concretos menos permeáveis, revestidos ou saturados de água.
- 5. Importante observar que o maior ou menor período de despolarização da armadura não significa uma maior ou menor eficiência do sistema de proteção catódica. Durante o intervalo de acompanhamento da despolarização o responsável pelas medições deve monitorar o impacto desses fenômenos ao longo de todo o período de teste, para garantir que essas condições não afetem as leituras.

Obs. - O período de despolarização completa da armadura pode variar de 12 a 48 horas ou mais e depende de várias condições. Mudanças nas condições ambientais, como temperatura e umidade, podem alterar o potencial de um dia para o outro. Períodos mais longos de observação podem ser necessários para concretos menos permeáveis, revestidos ou saturados de água. Importante observar que o maior ou menor período de despolarização da armadura não significa uma maior ou menor eficiência do sistema de proteção catódica. Durante o intervalo de acompanhamento da despolarização o responsável pelas medições deve monitorar o impacto desses fenômenos ao longo de todo o período de teste, para garantir que essas condições não afetem as leituras.

F.7 - Conclusões

Os problemas de corrosão em estruturas de concreto são bastante frequentes e precisam ser estudados com muito cuidado, sendo importante que sejam diagnosticados corretamente.

A utilização de proteção catódica com o uso de anodos galvânicos (proteção catódica galvânica) ou, em situações especiais, com anodos inertes e retificadores de corrente (proteção catódica por corrente impressa) é uma solução importante, que permite garantir resultados confiáveis ao longo dos anos.

Cumpra observar que a instalação de proteção catódica pode sempre ser complementada com outros métodos de proteção contra a corrosão, como a utilização de concretos especiais, injeção de polímeros e inibidores de corrosão, pintura, revestimento e galvanização das armaduras, mas é a única solução que pode ser utilizada isoladamente com segurança e total garantia, sem a utilização de qualquer outra medida de proteção.

Com relação a esse assunto, o Departamento de Transportes dos Estados Unidos (U.S. Department of Transportation / Federal Highway Administration Research and Development), responsável pela operação e manutenção das rodovias, pontes e viadutos do País, testou durante 5 anos todas as soluções existentes para resolver os problemas de corrosão das armaduras e emitiu um relatório completo e detalhado onde conclui textualmente que, dentre todos os métodos testados, o único que se mostrou totalmente eficiente para evitar os problemas de corrosão, independentemente do teor de cloretos presente na estrutura de concreto, foi a instalação dos anodos de proteção catódica.

Já o Departamento de Corrosão do IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo também estudou o assunto, experimentou vários métodos de proteção durante 3 anos e chegou a essa mesma conclusão, mediante emissão de relatórios e trabalhos técnicos sobre o tema.

A instalação de anodos galvânicos é sempre recomendada em todas as atividades de recuperação estrutural e de extrema importância para evitar a continuidade dos processos corrosivos em estruturas de concreto de um modo geral, antes mesmo que os primeiros sinais de deterioração comecem a aparecer.

Nessas situações as medições dos potenciais de corrosão são de extrema importância para o estudo e elaboração de um diagnóstico preciso e devem ser sempre utilizadas.

ANEXO G – INSPEÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

As inspeções e manutenções de estruturas de concreto devem ser feitas seguindo as normas que disciplinam esta matéria. Dentre as normas, podem ser destacadas as seguintes:

- ABNT NBR 15575-1/2:2013: a parte 1, estabelece requisitos, critérios e métodos de avaliação do desempenho geral das edificações habitacionais, visando ao cumprimento da sua finalidade durante o uso. Também trata de definições de vida útil de um projeto e do desempenho mínimo das edificações habitacionais. A parte 2 estabelece requisitos específicos para os sistemas estruturais, apresentado o Estado Limite último (ELU) e o Estado Limite de Utilização (ELS).
- ABNT NBR 9452 (2019): estabelece os requisitos exigíveis na realização de inspeções em pontes, viadutos e passarelas de concreto, incluindo a definição dos tipos de inspeções e documentação e dados referentes à apresentação dos resultados das inspeções. Destaca-se que o texto define inspeções rotineiras (visuais) anuais. Também determina uma inspeção especial (detalhada) mais apurada, a cada cinco anos, podendo ser estendida para oito anos, dependendo da classificação (nota 1, condição crítica, a nota 5, condição excelente) da obra de arte.
- ABNT NBR 16230 (2013): estabelece os requisitos de inspeção de estruturas de concreto e de qualificação e certificação de pessoas. Define dois níveis de inspetor e as competências mínimas exigidas para certificar os profissionais que desejam atuar na inspeção de estruturas de concreto. Cabe considerar que todas as atividades de consultoria e as atividades relativas à manutenção de caráter preventivo ou corretivo em edificações existentes também têm de ser feitas por profissionais legalmente habilitados.
- ABNT NBR 5674 (2012): estabelece os requisitos para a gestão do sistema de manutenção, com a obrigatoriedade de um planejamento anual das atividades envolvidas em sua realização. Nessa norma, a manutenção é definida como sendo “o conjunto de atividades a serem realizadas para conservar ou recuperar a capacidade funcional da edificação e de suas partes constituintes de atender às necessidades e segurança dos seus usuários”.

- ABNT NBR 14037 (2011): estabelece os requisitos mínimos para elaboração e apresentação dos conteúdos a serem incluídos nos manuais elaborados e entregues pelo construtor e/ou incorporador, conforme legislação vigente. Segundo a mencionada ABNT 5674 (2012), o manual de operação, uso e manutenção é um documento que reúne apropriadamente todas as informações necessárias para orientar as atividades de operação, uso e manutenção da edificação.
- ABNT NBR 16280 (2014): estabelece os requisitos para os sistemas de gestão de controle de processos, projetos, execução e segurança relativos à gestão de reformas de edificações.

ANEXO H – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Sugerimos aos leitores a bibliografia deste anexo para ampliar o conhecimento em corrosão e mais especificamente em corrosão e seu controle nas armaduras de concreto.

- Nunes, Laerce P. – Fundamentos de Resistência à Corrosão – Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2025.
- Gentil, Vicente – Corrosão, 7ªed. LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora, 2023.
- Dutra, Aldo C. e Nunes, Laerce P., Proteção Catódica – Técnica de Combate à Corrosão, Interciência, Rio de Janeiro, 5ª Edição.
- IEC – Sistemas de Proteção Catódica- Interciência, Rio de Janeiro, 2ª edição 2020.
- Panossian, Zehbour. Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas. 1ª Ed. São Paulo: Institutos de Pesquisas Tecnológicas, 1993. 2 v.
- Nunes, Laerce P. e Kriescher, Anderson T.– Introdução à Metalurgia e aos Materiais Metálicos– Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2010.
- Nunes, Laerce P. – Materiais – Aplicações de Engenharia – Seleção e Integridade – Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- ARAUJO, A.; PANOSSIAN, Z. Comportamento eletroquímico do aço-carbono em concreto: passivação e corrosão. Técnica, v.236, p.46-51, 2016.
- ARAUJO, A; PANOSSIAN, Z. Resistividade elétrica do concreto na avaliação do risco de corrosão nas estruturas atmosféricas. Techne: Revista de Tecnologia da Construção (São Paulo), v.21, p.66-68, 2013.
- ANACO STAINLESS. Experts in Stainless Steel for Engineering and Construction. Stainless steel reinforcing and related accessories. Disponível em: <<http://www.anacotrading.com/rebar.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2019.
- ANDRADE et al. RILEM TC 154-EMC. Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion: Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. Materials and Structures, v. 37, p. 623-643, 2004.

- ANDRADE, C. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armadura. São Paulo: Pini, 1992. 103 p.
- ARAUJO, A et al. Comportamento eletroquímico do aço-carbono em concreto: potencial de eletrodo e densidade de corrente elétrica. *Téchne*, v.25, n. 247, p. 29- 39, 2017.
- ARAUJO, A., PANOSSIAN, Z. Comportamento eletroquímico do aço-carbono em concreto: passivação e corrosão. *Téchne*, v. 236, p. 46-51, 2016.
- ARAUJO, A.; PANOSSIAN, Z.; LOURENCO, Z. Proteção catódica de estruturas de concreto. *Revista IBRACON de Estrutura*, v.6, n. 2, p.178-198, 2013.
- ARAUJO, A.; et al. Técnicas de medida da resistividade elétrica em estruturas atmosféricas de concreto convencional. *Téchne*, v.22, p.44-48, 2014.
- ARAUJO, A.; SILVA SOBRINHO, P. S.; PANOSSIOAN, Z. Estruturas zincadas por imersão a quente em concreto armado. *Corrosão e Proteção*, Rio de Janeiro, v. 55, p. 18-24, 2015.
- BAVARIAN, B.; REINER, L. Improving Durability of Reinforced Concrete Structures Using Migrating Corrosion Inhibitors. *NACE Corrosion Conference Proceedings*, paper nº 04323, 2004.
- BERKELEY, K. G. C.; PATHMANABAN, S. Cathodic protection of reinforcement steel in concrete. Butterworth: London. 1990, 158 p.
- BERTOLINI, L. et. al. Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair. Weinheim, KgaA: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2004. 393 p.
- BROOMFIELD, J. B. Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair. 2.ed. London: E & FN Spon, 2007. 271 p.
- CHESS, P.M. Cathodic protection of steel in concrete. E & FN SPON: London 1998. 188 p.
- DARWIN, D. et al. Multiple Corrosion Protection Systems for Reinforced Concrete Bridge Components. McLea: Virginia Office of Federal Highway Administration, 2007. 92 p. (Report n. FHWA-HRT-07-043).
- ELSENER et al. RILEM TC 154-EMC. Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion: Half-cell potential measurements – potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures*, v. 36, p. 461-471, 2003.
- ELSENER, B. Corrosion inhibitors for steel in concrete: state of the art report. London: Maney Publishing, 2001. 72 p. (European Federation of Corrosion Publications. EFC 35. - B0773).
- ESCADEILLAS, G.; HORNAIN, H.; A durabilidade do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos. In: OLLIVIER, J.; VICHOT, A. Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. [s.l.]: Ibracon, 2014. Cap. 11. p. 249-324
- HANSSON, C. M. Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete, *Cement and Concrete Research*, v.14. p. 547-558, 1984.
- HANSSON, C.M.; POURSAEE, A. JAFFER, S.J. Corrosion of reinforcing bars in concrete. *The Masterbuidr*. v.106, p.106-125, 2012.

- MARKESET, G.; ROSTAM, S.; KLINGHOFFER, O. Guide for the use of stainless steel reinforcement in concrete structures. BYGGFORSK - Norwegian Building Research Institute, p. 68, 2006.
- MCGURN, J. F. Stainless steel reinforcing bars in concrete. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.475.5101&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: out. 2019.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2 ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, IBRACON, 2014. 751 p.
- MEIRA, G. R. Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção. Paraíba: IFPB, 2017. 125 p.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do Concreto, BOOKMAN EDITORA LTDA: São Paulo 2010. 339 p.
- NÜRNBERGER, U. Stainless steel in concrete structures. In: BÖHNI, H. Corrosion in reinforced concrete structures. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005.
- ORMELLESE, M.; LAZZARI, L.; GOIDANICH, S.; FUMAGALLI, G; BRENN A. A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete. Corrosion Science n.51, p.2959-2968, 2009.
- OUTOKUMPU, Safety Information Sheet For Stainless Steel. 2018. Disponível em: <https://otk-sitecore-prod-v2-cdn.azureedge.net/-/media/files/sustainability/outokumpu-eu-safety-information-sheet-stainless-steel.pdf?revision=59a8a15c-ae9b-4052-bb53-3c9efa7817b1&modified=20180629121304>. Acesso em: 18 de nov. de 2019.
- PACHECO M. S. et al. Epoxy coated galvanized rebars as an alternative for rebars used in concrete structures contaminated with chloride ions. NACE Corrosion Conference Proceedings, 2018.
- PEDEFERRI, P. Cathodic protection and cathodic prevention. Construction and Building Materials, v. 10, n. 5, p. 391-402, 1996.
- POURBAIX, M. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. 2. ed. Houston: National Association of Corrosion Engineers, 1974.
- QIAN, S.; ZHANG, J.; QU, D. Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures. Cement and Concrete Composites, v. 28, p. 685-95, 2006.
- RIBEIRO, D. V. et. al. Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 246 p.
- SHREIR, L. L. Corrosion. 2th ed. London: Newnes-Butterworths, 1977
- SOYLEV, T. A.; RICHARDSON, M. G. Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report. Construction and Building Materials, v. 22, p. 609-622, 2008.
- WOLYNEC, S. Técnicas eletroquímicas em corrosão. São Paulo: Edusp, 2003
- XING, L.; DARWIN, D.; BROWNING, J. Evaluation of Multiple Corrosion Protection Systems and Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete Bridge Decks. Lawrence:

- Kansas Federal Highway Administration, 2010. 507 p. (Contract n. DTFH61-03-C- 00131).
- YEOMANS, S. R. Galvanized steel in concrete. Oxford: Elsevier, 2004.
- Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. Autores: Almir Sales; Carlos Alberto de Souza, Fernando de Couto Rosa Almeida, Manuel Paulo Teixeira Cunha, M. Zita Lourenço e Paulo Helene. Editora Elsevier – 2014.
- Galvanized Steel Reinforcement in Concrete, SR Yeomans (Editor), Elsevier, 2004.

