



**CENTRO UNIVERSITÁRIO FAMETRO
ENGENHARIA CIVIL**

FABIAN OLIVEIRA PALOMBELLA

**USO DA PROTEÇÃO CATÓDICA NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO:
UMA DISCUSSÃO CONCEITUAL E APLICAÇÕES**

**FORTALEZA
2021**

FABIAN OLIVEIRA PALOMBELLA

USO DA PROTEÇÃO CATÓDICA NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO:
UMA DISCUSSÃO CONCEITUAL E APLICAÇÕES

Monografia apresentada como requisito para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil da Faculdade Metropolitana da Grande Fortaleza – FAMETRO.

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Pereira Ribeiro

FORTALEZA

2021

P181u Palombella, Fabian Oliveira.

Uso da proteção catódica nas estruturas de concreto armado : uma discussão conceitual e aplicações. / Fabian Oliveira Palombella. – Fortaleza, 2021.

63 f. ; 30 cm.

Monografia - Curso de Engenharia Civil da Unifametro, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Jefferson Pereira Ribeiro.

1. Proteção catódica. 2. Estruturas – corrosão. 3. Concreto. I. Título.

CDD 624.1

FABIAN OLIVEIRA PALOMBELLA

USO DA PROTEÇÃO CATÓDICA NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO:
UMA DISCUSSÃO CONCEITUAL E APLICAÇÕES

Monografia apresentada como requisito a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil da Faculdade Metropolitana da Grande Fortaleza – FAMETRO – tendo sido aprovado pela banca examinadora composta pelos professores abaixo:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jefferson Pereira Ribeiro
Orientador – Centro Universitário Unifametro

Prof. Dr. Adriano Sampaio de Lima
Membro – Centro Universitário Unifametro

Prof. Dr. André Gadelha de Oliveira
Membro – Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

Ao professor orientador que, com sua dedicação e cuidado de mestre, orientou-me na produção deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, pela ajuda e proteção, por sua força e presença constante e por me guiar à conclusão de mais uma preciosa etapa de minha vida.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento”.

Albert Einstein (1879/1955)

RESUMO

A corrosão é, indubitavelmente, uma das mais severas patologias que afetam a construção civil em função de seu volume e frequência. Neste sentido a utilização de mecanismos de proteção catódica é um importante instrumento para aumentar a vida útil de estruturas de concreto armado, reduzindo custos de manutenção. O objetivo geral deste estudo foi, precisamente, apresentar a proteção catódica como instrumento de controle de corrosão em estruturas de concreto armado. Os resultados apontaram que fatores ambientais são importantes catalisadores de processos corrosivos, como o ataque de íons cloreto que acarretam a despassivação das armaduras. Comprovou-se que a resistividade elétrica do concreto é importante para que se possa dimensionar adequadamente os mecanismos de proteção catódica, razão pela qual a realização de testes para determinar com precisão esta resistividade é obrigatória. Mostrou-se também a necessidade de um meio eletrolítico, pois a proteção catódica não funciona para estruturas metálicas na ausência deste, já que é necessária a migração de elétrons do ânodo para o cátodo. Concluiu-se que o sistema de proteção catódica é bastante útil para prevenir a corrosão precoce ou minimizar a evolução de um processo corrosivo já em andamento, além de apresentar vantagens referentes à durabilidade em comparação com outros métodos, revelando-se uma técnica de efetiva eficiência para guarnecer estruturas de concreto armado, onde a manutenção preventiva é inexequível.

Palavras-chave: Corrosão; Proteção Catódica; Armadura; Concreto.

ABSTRACT

Corrosion is undoubtedly one of the most severe pathologies that affect civil construction due to its volume and frequency. In this sense, the use of cathodic protection mechanisms is an important tool to increase the useful life of reinforced concrete structures, reducing maintenance costs. The general objective of this study was, precisely, to analyze cathodic protection as an instrument of corrosion control in reinforced concrete structures. The results showed that environmental factors are important catalysts for corrosive processes, such as the attack of chloride ions that cause the depassivation of the reinforcement. It has been proved that the electrical resistivity of concrete is important so that the cathodic protection mechanisms can be adequately dimensioned, which is why testing to accurately determine this resistivity is mandatory. The need for an electrolytic medium has also been proven, since cathodic protection does not work for metallic structures in the absence of it, since it is necessary to migrate electrons from the anode to the cathode. It was concluded that the cathodic protection system is very useful to prevent early corrosion or to minimize the evolution of a corrosive process already underway, in addition to presenting advantages regarding durability in comparison with other methods, proving to be an effective efficiency technique. to fill reinforced concrete structures, where preventive maintenance is not feasible.

Key words: Corrosion; Cathodic Protection; Steel Reinforcement; Concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Macroestrutura do concreto	20
Figura 2 – Elementos principais das fôrmas de pilares	24
Figura 3 - Modelo de forma para viga de concreto armado	25
Figura 4 - Forma para laje de concreto armado	25
Figura 5 – potenciais dos elementos em referência ao Eletrodo Padrão de H.....	29
Figura 6 – Circuito elétrico da pilha simples	30
Figura 7 – Célula eletrolítica	32
Figura 8 - Pilha de corrosão galvânica	34
Figura 9 - Mecanismo de proteção catódica dado pelas curvas de polarização.....	35
Figura 10 - Sistema de proteção galvânica	36
Figura 11 – Estrutura de concreto armado recuperada com o uso de uma pastilha galvânica	36
Figura 12 - Sistema de proteção catódica por corrente impressa	37
Figura 13 – Corrosão eletroquímica na presença de cloretos	43
Figura 14 – Efeitos da corrosão no concreto	44
Figura 15 – Armadura, concretagem e corpo de prova	52
Figura 16 – Corpo de prova imerso em eletrólito.....	52
Figura 17 -- Diagrama de PourBaix.	53
Figura 18 – Detalhe após 1hr de experimento.....	53
Figura 19 – Corrosão da armadura	54
Figura 20 - Detalhe dos corpos de prova ao termino do experimento	54
Figura 21 – Aplicação de pastilha em reparo de borda em piso industrial	55
Figura 22 – Tela galvânica	56
Figura 23 - Vara galvânica.....	56
Figura 24 - Zinco Termo-projetado ZTP	57
Figura 25 - Galvanização a frio.....	57
Figura 26 - Cristo Redentor – utiliza a técnica de proteção catódica por corrente impressa com ânodo em tela de titânio.....	58
Figura 27 - Ponte San Leandro e velódromo San Cristobal – utiliza a técnica de proteção catódica por corrente galvânica com ânodo embutidos.....	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Classificação do agregado miúdo quanto à dimensão das partículas	21
Quadro 2 – Tipos de cimento	21
Quadro 3 – Classificação dos aditivos empregados no concreto	22
Quadro 4 – Prazo para desforma	26
Quadro 5 - Características das estações atmosféricas da cidade de Fortaleza	45
Quadro 6 - Quadro comparativo de serviços de recuperação para corrosão	48
Quadro 7 - Quadro comparativo de vantagens e desvantagens das proteções por corrente impressa e galvânica.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

IZA - International Zinc Association.

PIB - Produto Interno Bruto.

SHRP - Strategic Highway Research Program

NBR – Norma Brasileira

ZTP – Zinco termo-projetado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	METODOLOGIA.....	17
4	O CONCRETO DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	20
4.1	CONCRETO.....	20
4.2	CONCRETO ARMADO.....	22
4.2.1	Fôrmas.....	23
4.2.2	Armaduras.....	26
5	CORROSÃO.....	29
5.1	CÉLULAS ELETROQUÍMICAS.....	32
5.2	CORROSÃO ELETROQUÍMICA.....	33
5.3	TIPOS DE CORROSÃO.....	38
5.4	ATAQUES DE CLORETOS.....	42
6	PROTEÇÃO CATÓDICA.....	46
7	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um fenômeno ocasionado pela ação química ou eletroquímica do meio, associada ou não a uma ação física, gerando desgaste e destruição dos materiais metálicos (DUTRA; NUNES, 2011). Esses desgastes geram enormes prejuízos em diferentes setores ao longo do tempo. Recentes estudos têm mostrado que entre 1% a 5% do Produto Interno Bruto dos países é consumido pela corrosão. Conforme dados da International Zinc Association (IZA), no ano de 2015, 4% do PIB brasileiro foi afetado por este fenômeno.

Os municípios brasileiros localizados na faixa litorânea concentram 95% do PIB. Mais de 70% da população brasileira vive em cidades com distância de até 200 km da praia. Como o Brasil apresenta um desenvolvimento demográfico considerável na zona litorânea, as interferências da corrosão geram impactos enormes na infraestrutura de suas cidades, podendo chegar a cerca de 150 vezes maiores que os das zonas rurais, acarretando consequências mais acentuadas. Tais efeitos são agravados pelos fortes e constantes ventos que transportam íons cloretos diretamente para as edificações (ALVES, 2018).

O aço é um material largamente empregado na infraestrutura de um país. Ele é utilizado para compor as estruturas de concreto, e tem papel fundamental na estabilidade das edificações em serviço. Numa estrutura de concreto armado, o aço tem como função básica resistir aos esforços de tração. Isso ocorre, pois o concreto não possui resistência à tração suficiente para absorver os esforços solicitantes de uma edificação. (RODRIGUES, 2005 *apud* NORMA SHRP – S 359, 1994).

É por isso que as regiões sujeitas a esses tipos de esforços devem ser armadas. Sendo assim, os efeitos do desgaste do aço nas estruturas de concreto pelo fenômeno da corrosão acarretam sérios problemas de estabilidade para as edificações. Em razão disso, a corrosão das armaduras no concreto armado é a manifestação patológica mais estudada no âmbito da construção civil e industrial (RODRIGUES, 2005 *apud* NORMA SHRP – S 359, 1994).

Portanto, a utilização de técnicas de proteção e inibição contra corrosão dessas armaduras pode contribuir significativamente para o aumento da vida útil e conservação, redução dos custos de manutenção e das patologias que acometem as edificações. Dentre técnicas de proteção pode-se listar a galvanização, a pintura, a

redução da permeabilidade do concreto, o aumento da cobertura e a proteção catódica, objeto deste estudo.

A proteção catódica é um processo de controle contra a corrosão das ligas metálicas que utiliza um sistema ou subsistemas sujeitos ao processo corrosivo, transformando o que se deseja proteger em um cátodo. Isso pressupõe a introdução de um ânodo conhecido como ânodo de sacrifício. Assim, o processo natural de perda de elétrons da estrutura para o meio ocorrerá primeiro no polo mais eletronegativo, protegendo a armadura das estruturas de concreto(VINÍCIUS ABBATE, 2003). Neste trabalho será abordada a utilização desta técnica, com breve avaliação da sua eficácia.

1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto continua sendo o grande protagonista da evolução que a construção civil vem sofrendo nas últimas décadas. A corrosão da armadura das estruturas de concreto é a patologia que mais agride as edificações. Portanto, o projetista deve avaliar a aplicação de um método de proteção da armadura de forma a mitigar essa problemática. As principais alternativas de proteção se baseiam na substituição do material por outro mais resistente, modificação do meio de exposição, interposição de barreiras entre o meio e o metal e fornecimento de energia ao sistema. No entanto, a falta de conhecimento sobre o assunto acarreta a falta de aplicação de uma proteção extra, bem como, no caso da aplicação, na escolha incorreta do método.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar a proteção catódica como instrumento de controle de corrosão do aço.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Em complementação ao objetivo geral, temos os seguintes objetivos específicos:

- realizar uma revisão bibliográfica de caráter exploratório e abordagem descritiva sobre os processos de corrosão e seus tratamentos através de pesquisa em livros, revistas, periódicos e artigos.
- apresentar as vantagens e desvantagens dos sistemas de proteção catódica por corrente galvânica e por corrente impressa e
- apresentar os resultados de estudos experimentais e aplicações abordando a temática da corrosão.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para construção da pesquisa foi a bibliográfica, feita através de pesquisa em livros, revistas, periódicos e artigos. Tem caráter exploratório e abordagem descritiva.

Para Tartuce (2006), a metodologia científica trata de método e ciência. O termo Método tem origem no grego “methodos” e significa “caminho para chegar a um fim”. Assim, a metodologia é o conjunto de regras a serem seguidas para realizar uma pesquisa. Já a Metodologia científica é o estudo sistemático dos métodos utilizados nas ciências, os quais abrangem dados iniciais e ações necessárias para se chegar a uma conclusão, segundo objetivos previamente determinados. A atividade principal da metodologia é a pesquisa. Segundo Gil (2007), pesquisa pode ser definida como o:

Procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. A pesquisa desenvolve-se por um processo constituído de várias fases, desde a formulação do problema até a apresentação e discussão dos resultados.

Para Marconi e Lakatos (2010), pesquisa é: “procedimento formal, com método de pensamento reflexivo, que requer um tratamento científico e se constitui no caminho para conhecer a realidade ou para descobrir verdades parciais”. Conforme Matias-Pereira (2012), a pesquisa precisa ser norteada através de métodos científicos e termos técnicos. Somente assim se poderá assegurar a seriedade, o cuidado e o rigor necessários para dar legitimidade às informações nela contidas.

Quanto aos objetivos, a pesquisa desenvolvida para a elaboração deste estudo pode ser classificada como exploratória pois este tipo de pesquisa tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema e descrever as características do fenômeno estudado. Andrade (2010), ressalta algumas finalidades da pesquisa exploratória: proporcionar maiores informações sobre o assunto que se vai investigar, facilitar a delimitação do tema, fixar objetivos e formular hipóteses ou apontar um novo enfoque sobre o assunto em análise.

Segundo Cervo e Bervian (2002), “a pesquisa exploratória realiza descrições precisas da situação e quer descobrir as relações existentes entre os elementos componentes da mesma”. Já de acordo com Gil (1999), a pesquisa

exploratória “tem como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. Seu planejamento é, portanto, bastante flexível, de modo que possibilite a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado”. A pesquisa exploratória, entre outros itens, constitui também um levantamento bibliográfico (também chamada de pesquisa bibliográfica ou fundamentação teórica).

Assim, quanto aos procedimentos, realizou-se uma pesquisa de natureza bibliográfica, que visou assimilar o referencial teórico indispensável à realização da investigação. Para Fonseca (2002):

A pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. Qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto. Existem porém, pesquisas científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, procurando referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta (FONSECA, 2002).

Segundo Oliveira (1999), além da pesquisa bibliográfica ser realizada em bibliotecas ela também pode ser feita em institutos e centros de pesquisas, museus e acervos particulares, bem como em locais que sirvam de fonte de informações para o levantamento de dados. Conforme Santos (2010), a pesquisa bibliográfica é básica e obrigatória em qualquer modalidade de pesquisa. De forma geral, qualquer informação publicada (impressa ou eletrônica) é passível de se tornar uma fonte de consulta.

Conforme Vergara (2000), a pesquisa bibliográfica desenvolve-se a partir de materiais já elaborados (livros, artigos científicos, etc.) e é importante como fonte de informações básicas sobre aspectos ligados ao objeto de estudo e sua temática. Para Lakatos e Marconi (2010): “a pesquisa bibliográfica abrange toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema estudado, desde publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, materiais cartográficos, etc.”.

Já quanto à abordagem a pesquisa realizada pode ser definida como qualitativa pois preocupa-se com aspectos da realidade que não podem ser mensurados, focando na compreensão da dinâmica das relações sociais. Para Triviños (1987), a abordagem de cunho qualitativo busca o significado dos dados obtidos a partir da análise do fenômeno em seu contexto, isto é, preocupa-se não só

com a sua aparência, mas também com sua essência (origem, relações e consequências).

Para Minayo (2007), a pesquisa qualitativa lida com o universo de significados, crenças e valores que corresponde a um espaço mais profundo das relações e não podem ser reduzidos à operacionalização de variáveis. De acordo com Polit, Becker e Hungler (2004), a pesquisa qualitativa salienta os aspectos dinâmicos, holísticos e individuais da experiência humana, visando à compreensão total do contexto dos que vivenciam o fenômeno.

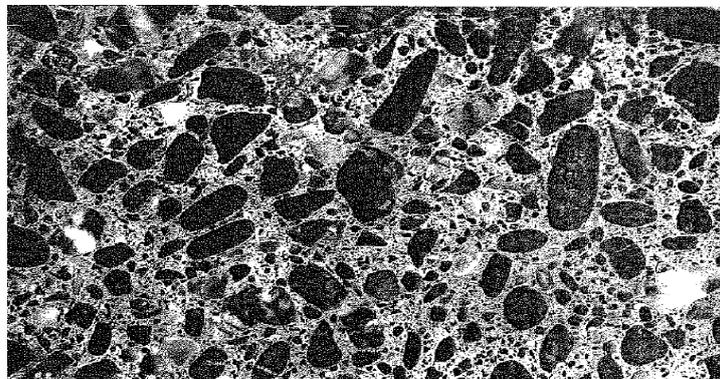
4. O CONCRETO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

4.1 CONCRETO

O Brasil usou concreto armado no Rio de Janeiro em 1904. Desde o seu início até hoje, o concreto passou por um grande desenvolvimento em termos de qualidade de agregado, cimento Portland melhorado e o aço usado. Esse tipo de concreto é utilizado na maioria dos projetos no Brasil e tem a designação de armadura com barras de aço devido à combinação desses materiais, no qual forma um elemento muito resistente à compressão e à tração (ARAÚJO, 2013).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o concreto é formado por agregados, cimento, aditivos e água, uma mistura dotada de plasticidade que possibilita seu manuseio, transporte e lançamentos em fôrmas. Possui natureza porosa, cujos poros são formados pelo excesso de água necessário à sua hidratação. A figura 1 ilustra sua macroestrutura é composta pela pasta de cimento e agregados.

Figura 1 - Macroestrutura do concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro, 1994.

Conforme Almeida e Luz (2009), os agregados utilizados na construção civil são granulares com volume e forma indefinidos e constituem as substâncias minerais mais consumidas no mundo: cascalho, brita e areia. Segundo a norma ABNT NBR 7.211, os agregados podem ser de origem natural ou resultar da britagem de rochas. Seu principal requisito é:

[...] ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a

proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto. (ABNT NBR 7.211)

Ainda segundo a referida norma, os agregados são classificados em miúdos ou grãos. O agregado miúdo é aquele cujos grãos passam por uma peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ficando retidos em peneiras com abertura de malha de 150 μm (ver quadro 1).

Quadro 1- Classificação do agregado miúdo quanto à dimensão.

Tipo de areia	Tamanho nominal		Módulo de Finura (MF)
	Mínima	Máxima	
Muito fina	0,15	0,6	MF<2,0
Fina	0,6	1,2	2<MF<2,4
Média	1,2	2,4	2,4 < MF < 3,2
Grossa	2,4	4,8	MF > 3,2

Fonte: NBR 7211, 2020.

Já o grão é aquele cujos grãos passam por uma peneira com abertura de malha de 75 mm, ficando retidos em peneiras com abertura de malha de 4,75 mm, como é o caso das britas.

Quanto ao cimento, trata-se do aglomerante mais comum utilizado no concreto. Segundo Oliveira (2008), os principais constituintes do cimento são: Cal (CaO); Sílica (SiO₂); Alumina (Al₂O₃); Óxido de Ferro (Fe₂O₃); Magnésia (MgO) e impurezas. Há no mercado diferentes tipos de cimento portland, que variam de acordo com sua composição e utilização (ver quadro 2).

Quadro 2 – Tipos de cimento.

Tipo de cimentos	Adições	Sigla	Norma
Cimento Portland comum	Escória, pozolana ou filler (até 5%)	CP I-S 32 CP I-S 40	5732
Cimento Portland composto	Escória (6 até 34%)	CP II-E 32 CP II-E 40	11578
	Pozolana (6 até 14%)	CP II-Z 32	
	Filler (6 até 10%)	CP II-F 32 CP II-F 40	
Cimento Portland de Alto forno	Escória (35 até 70%)	CP III-32 CP III-40	5735
Cimento Portland Pozolânico	Pozolana (15 até 50%)	CP IV-32	5736
Cimento Portland de alta resistência inicial	Materiais carbonáticos (até 5%)	CP V-ARI	5733
Cimento Portland resistente aos sulfatos	Esses cimentos são designados pelas siglas RS, EX: CP III-40 RS e CP V-ARI RS		5737

Fonte: Freitas Junior (2013).

Acerca dos aditivos, conforme Freitas Junior (2013), sua finalidade é melhorar as características físicas e químicas do concreto visando aumentar a sua resistência mecânica e prevenir ou minimizar a corrosão das armaduras, classificando de acordo com a NBR-11768/92 (ver quadro 3).

Quadro 3 – Classificação dos aditivos empregados no concreto.

NBR-11768/92 Classifica alguns tipos de aditivos	
Tipos	FINALIDADE
P	Plastificante e retardador de água (mínimo 6% de redução)
A	Acelerador do tempo de pega
R	Retardador do tempo de pega
PR	Plastificante e acelerador do tempo de pega
PA	Incorporador de ar
IAR	Superplastificante (mínimo 12% de redução de água)
SPR	Superplastificante e retardador
SPA	Superplastificante acelerador

Fonte: Freitas Junior (2013).

Os aditivos modificam certas características do concreto e facilitam seu manuseio e aplicação, devendo-se sempre atentar para o seu prazo de validade. Problemas na construção de estruturas de concreto armado também são muito comuns. Exemplo disso são as falhas durante o processo construtivo que resultarão na redução ou inexistência da camada de cobertura. Embora a corrosão seja um processo natural, podem ser tomadas medidas para proteger as estruturas de aço, sejam elas de concreto armado, concreto protendido ou estruturas metálicas. A Associação Brasileira de Corrosão estima que a importância da proteção de edificações seja muito relevante, pois, no Brasil, o processo de recuperação de estruturas corroídas representa 3% do PIB, e o uso de técnicas preventivas pode economizar 2% do PIB (JUNIOR, 2018).

4.2 CONCRETO ARMADO

O concreto armado, por sua vez, armado nada mais é do que uma estrutura de concreto com armações de aço em seu interior e ganhou tal notoriedade e importância devido a sua boa resistência tanto à compressão, proveniente do concreto, quanto à tração, oriundo do aço, boa durabilidade, resistência a choques e vibrações, dentre outras vantagens. Hoje o concreto armado está presente em todos

os tipos de construções, como casas, pequenos e grandes edifícios, pontes, porto, aeroportos, rodovias, sistemas de esgotamento sanitário e em muitos outros ramos da construção civil. Os componentes do concreto armado são divididos em agregados, água, cimento e aditivos, analisados mais detalhadamente a seguir.

Para Clímaco (2008), o concreto armado “é o material estrutural constituído pela associação do concreto simples com uma armadura passiva, ambos resistindo solidariamente aos esforços a que a peça estiver submetida”. Já armadura passiva é definida pela norma ABNT NBR 6.118:2014 como “qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, isto é, que não seja previamente alongada”.

Segundo a NBR 6.118, os elementos de concreto armado são: “aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência”.

Brandão (1998) fala que as “estruturas de concreto devem ser projetadas, construídas e utilizadas de modo que, sob as influências ambientais previstas, elas mantenham segurança, bom desempenho em serviço e aparência aceitável durante um determinado período de tempo, sem exigir altos custos”. Caso contrário, há uma grande probabilidade da estrutura sofrer com as chamadas patologias.

Para ser corretamente empregado, o concreto armado utiliza-se de fôrmas de madeira ou fôrmas metálicas, além das armaduras anteriormente citadas, como detalhado no próximo tópico.

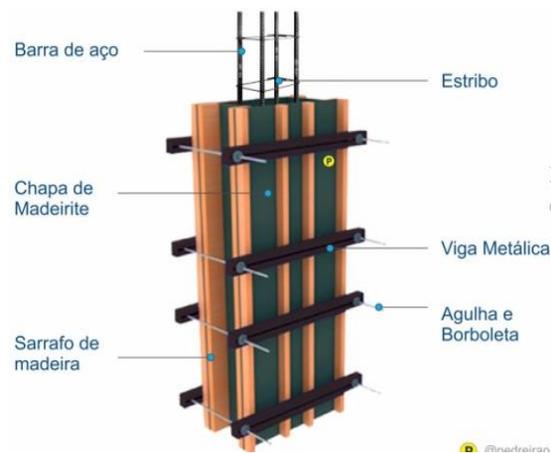
4.2.1 Fôrmas

Tratam-se de caixas, comumente de madeira, cuja finalidade é dar formato adequado às estruturas de concreto, assegurando seu alinhamento segundo a geometria estabelecida no projeto. De acordo com a NBR 15.696:2009 - *Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto - Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos*, fôrma pode ser definida como “estrutura provisória utilizada para moldar o concreto fresco, resistindo a todas as ações provenientes das cargas variáveis resultantes das pressões do lançamento do concreto fresco até que o concreto se torne autoportante”. Para Assahi (2005), uma fôrma consiste em um

molde provisório utilizado para dar ao concreto fresco a geometria e textura almejadas, sustentando-o até que esteja suficientemente resistente.

De forma sucinta, uma fôrma pode apresentar formato de pilar, viga ou laje. Conforme Milito (2004), a montagem de fôrmas de pilares é realizada por painéis verticais envolvidos por gravatas de travamento. Seus elementos principais são apresentados na figura 2.

Figura 2 – Elementos principais das fôrmas de pilares.



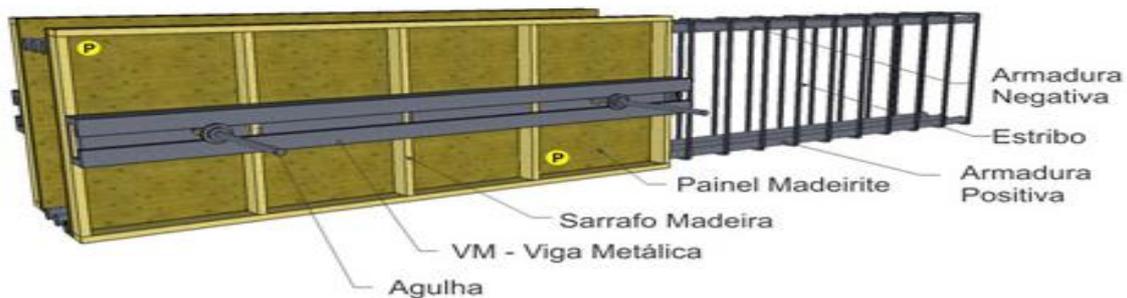
Fonte: <https://www.meiacolher.com/2014/04/aprenda-como-fazer-um-pilar-ou-coluna.html>

Já as formas de viga, de acordo com Yazigi (2014), as fôrmas de vigas são compostas por painéis laterais e outro painel que deve ser colocado na base da viga, unidos por gravatas. Segundo Gomes (2020):

A montagem desse elemento inicia-se pela fôrma de fundo, que é posicionada sobre o topo dos pilares e apoiada sobre pontaletes. Os pontaletes seguintes são posicionados e nivelados com os anteriores, para então montar o restante das fôrmas de fundo da viga. Em seguida, os painéis laterais de fôrmas são posicionados e alinhados, garantindo-se o prumo e nivelamento por toda a viga por meio das gravatas e tensores.

A figura 3 ilustra os principais elementos de uma fôrma de viga:

Figura 3 - Modelo de forma para viga de concreto armado.



Fonte: <https://www.meiacolher.com/2014/04/aprenda-como-fazer-um-pilar-ou-coluna.html>

Quanto às formas de laje, conforme Yazigi (2014), são preparadas a partir do lançamento de compensado do assoalho da laje sobre longarinas horizontais, metálicas ou de madeira, suportadas por escoras que permitam regular sua altura e cunhas destinadas a nivelar seu formato (ver figura 4).

Figura 4 - Forma para laje de concreto armado.



Fonte: <https://www.atex.com.br/pt/>

Importante ressaltar que a desforma só deve ser realizada quando o concreto se apresentar rígido o bastante para suportar os esforços demandados. O prazo para remover as fôrmas varia segundo o tipo de cimento utilizado, como apresentado no quadro 4 abaixo. (MARANHÃO, 2000).

Quadro 4 – Prazo para desforma.

Tipos	Cimento Portland CP-IV	Cimento Portland CP- V
Paredes, pilares e faces laterais de vigas.	3 dias	2 dias
Lajes com até 10 cm de espessura.	7 dias	3 dias
Faces inferiores de vigas com reescoramento.	14 dias	7 dias
Lajes com mais de 10 cm de espessura e faces inferiores de vigas com menos de 10 m de vão.	21 dias	7 dias
Arcos e faces inferiores de vigas com mais de 10 m de vão.	28 dias	10 dias

Fonte: Maranhão (2000).

4.2.2 Armaduras

De acordo com NBR 14.931 (ABNT, 2004), as armaduras devem ser estocadas de forma a manterem inalteradas suas características geométricas e suas propriedades, desde o recebimento na obra até seu posicionamento final na estrutura e sua estocagem deve ser feita de modo a impedir o contato com qualquer tipo de contaminante. Os produtos não podem ser estocados em contato direto com o solo.

A referida norma complementa que os procedimentos para preparação, montagem e corte da armadura devem acatar ao que se exige no projeto da estrutura. Os dobramentos das barras, inclusive ganchos, devem ser feitos de maneira que os diâmetros internos de curvatura sejam respeitados e serem feitos sempre a frio. Na confecção das armaduras é recomendado que se utilize uma bancada feita com marcação de gabaritos, para auxiliar o armador na execução de serviços de corte e dobra do aço.

Milito (2004) versa que para o armazenamento do aço deve ser observada a agressividade do ambiente para saber se o tratamento do aço vai ser simples ou

mais rigoroso. Para meios altamente agressivos recomenda-se um armazenamento de pouca duração, em galpões fechados cobrindo o aço com lonas plásticas, receber as barras de aço já cortadas, dobradas e montadas, em pequenas quantidades, e também pintar as barras com pasta de cimento de baixa consistência. Em ambientes de agressividade média é recomendado um armazenamento sobre travessas de madeira com 30 cm de espessura, apoiadas em um solo com uma camada de brita como proteção, pintando as barras com pasta de cimento de baixa consistência. Já em ambientes de baixa agressividade, o armazenamento pode ser feito sobre travessas de madeira de 20 cm de espessura, protegida com uma camada de brita.

A superfície da armadura deve estar livre de ferrugem e substâncias deletérias que possam interferir de maneira adversa o aço, o concreto ou a aderência entre eles. Armaduras que apresentem produtos destacáveis na sua superfície devido ao processo de corrosão devem passar por limpeza superficial (NBR 14.931, ABNT, 2004). Milito (2004) comenta que essa limpeza pode ser feita com jateamento de areia, escova de aço ou saco de estopa úmido, dependendo do estado da barra.

Segundo a NBR 14.931 (ABNT, 2004), as armaduras levemente oxidadas por exposição ao tempo, por períodos de até três meses, em ambientes de agressividade fraca à moderada, sem produtos destacáveis e sem redução de seção, podem ser utilizados em estruturas de concreto. Esta norma também discorre que a armadura deve ser posicionada e fixada no interior das formas de acordo com as especificações de projeto, de modo que durante o lançamento do concreto se mantenha na posição estabelecida, mantendo inalteradas as distâncias das barras entre si e com relação às faces internas das fôrmas.

Yazigi (2014) ressalta que se a ferragem não estiver bem posicionada, a estrutura terá sua resistência diminuída. Após a fixação, é imprescindível a verificação se as armações se deslocaram antes ou durante a concretagem. A montagem da armadura pode ser feita por amarração, utilizando arames recozidos ou em caso de aços que a solda não altere suas características de resistência, a montagem pode ser feita por pontos de solda.

Diferentes fatores mecânicos, biológicos, físicos e químicos podem acelerar o fenômeno da corrosão das armaduras. São considerados fatores mecânicos a vibração e as erosões sofridas ao longo da sua vida útil. Os fatores biológicos são as bactérias, enquanto os fatores físicos e químicos são representados

pelas variações de temperaturas e as reações químicas como as que ocorrem entre os ácidos e sais. O fenômeno da corrosão será melhor analisado a seguir.

5 CORROSÃO

De acordo com Dutra e Nunes (2011), os conceitos modernos definem a corrosão como a deterioração dos materiais devido à ação do meio. Por causa dessa preocupação mais ampla, esse fenômeno é chamado de "corrosão de metal" quando se trata de metais. Nesse caso, conceitua-se como a destruição de materiais metálicos por meio de efeitos químicos ou por meio de efeitos eletroquímicos ambientais, que podem ou não estar relacionados a efeitos físicos.

Conforme Jones (1996), a corrosão é o resultado destrutivo de uma reação química ou reação eletroquímica entre um metal ou liga metálica e seu ambiente. Para Furtado (1981), a corrosão geralmente atua sobre superfícies metálicas e rapidamente estabelece uma relação entre os agentes corrosivos. Esta reação consome o metal e pode causar danos devido à sua perda de tamanho ou alteração da estrutura química.

Jones (1996) também destaca que a maioria dos metais existe como uma combinação de óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfetos, sulfatos e silicatos. Extrair metais do minério requer muita energia, razão pela qual metais isolados são considerados como tendo estados de energia mais elevados do que os minerais correspondentes, então os metais tendem a retornar à sua energia mais baixa (estado fundamental) para reagir com o meio ambiente e sofrer corrosão. A figura 5 nos mostra o potencial de alguns elementos. Pode-se concluir que, por se tratar de um processo de degradação, a corrosão é caracterizada pela dissipação de energia.

Figura 5: potenciais dos elementos em referencia ao Eletrodo Padrão de H

Potenciais Padrão de Eletrodos*	
Reação	E^0 a 25 °C, V
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	+1,359
$\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	+1,229
$\text{Br}_2(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Br}^-$	+1,087
$\text{Br}_2(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Br}^-$	+1,065
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s})$	+ 0,799
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	+ 0,771
$\text{I}_3^- + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 3\text{I}^-$	+ 0,536
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{s})$	+ 0,337
$\text{UO}_2^{2+} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{U}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+ 0,334
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Hg}(\text{l}) + 2\text{Cl}^-$	+ 0,268
$\text{AgCl}(\text{s}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + \text{Cl}^-$	+ 0,222
$\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^- + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	+ 0,017
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g})$	0,000
$\text{AgI}(\text{s}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + \text{I}^-$	- 0,151
$\text{PbSO}_4 + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{s}) + \text{SO}_4^{2-}$	- 0,350
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{s})$	- 0,403
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}(\text{s})$	- 0,763

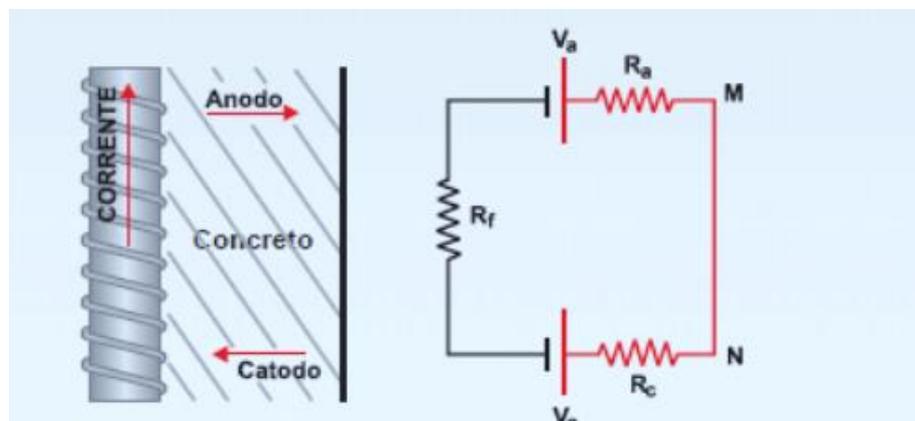
Fonte: Skoog(2008)

Em alguns casos, o processo de corrosão pode ser permitido pelo processo reverso do processo metalúrgico, onde há extração de metais do minério. Esse é um produto de corrosão semelhante ao minério do qual o minério foi originalmente extraído. Dessa forma, a corrosão é um fenômeno que ocorre ao mesmo tempo em que um ocorre um processo de oxidação.

Para Rodrigues (2005), os componentes de uma pilha eletroquímica são: o ânodo (onde ocorre a oxidação e corrosão com a corrente elétrica na forma de íons metálicos entrando no eletrólito; cátodo, onde ocorre a redução de carga negativa e sai a corrente elétrica; o eletrólito, conduzindo líquido dos íons até a corrente elétrica de ânodos ao cátodo. E o circuito metálico, ligando o fluxo de elétrons ao sentido ânodo-cátodo.

Nos metais de concreto armado há uma variação de potencial que é causada por vários fatores em propriedades do aço. Um exemplo disso, é que nas barras compondo a armadura, se tornam grandes áreas catódicas e anódicas, como uma pilha de corrosão, como na figura 6 a seguir:

Figura 6: Circuito elétrico da pilha simples



Fonte: MONGE, (2000).

A representação da pilha é feita pela diferença de potencial por seus eletrodos no circuito aberto.

No concreto, tem-se a proteção das armaduras dada pelo pH básico funcionando como uma barreira física, porém, há uma característica pseudo-sólida, com material poroso que depende das condições climáticas, invariavelmente deverá ter umidade e depende do nível de agressividade do ambiente inserido. Quando em

contato com água, ocorre o fluxo de elétrons definindo a corrente elétrica e alimentando as reações.

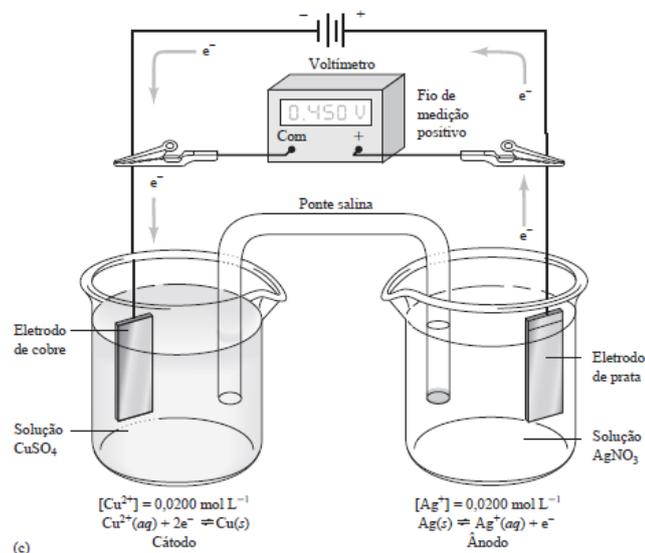
Nessas reações há uma simultaneidade e ambos carregam cargas negativas, pois o íon ferroso se desloca do ânodo ao cátodo, enquanto o íon hidroxila vai no sentido contrário. Dessa forma, o concreto armado conta com riscos patológicos diante da corrosão iniciada por contaminação de íon cloro, em processo de carbonatação (GENTIL, 2003).

Para Nepomuceno (1992), a influência da área catódica se conectada à área anódica, deve ser feita através de intensidade galvânica de corrosão, pois o sistema de proteção catódica galvânica tem a formação de correntes por elétrons, no componente anódico, recebido pela armadura protegida pelo contato entre os materiais. E com a determinação do sentido de valor e intensidade pode-se ter os componentes anódicos e catódicos, sua velocidade de corrosão e estimativa da vida útil do ânodo de sacrifício, de acordo com a lei de Faraday. Já a Lei de Fick determina que a difusão constante ao longo do tempo admite o meio estacionário, ocorrendo distribuição por igual em determinada seção, tratando-se de difusão (movimentação de substâncias devido a diferença de concentração).

5.1 CÉLULAS ELETROQUÍMICAS

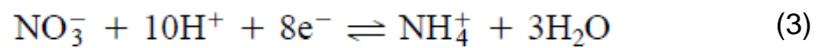
Para entender melhor o mecanismo de proteção catódica é necessário analisar o funcionamento das células eletroquímicas (figura 7). Uma célula eletroquímica, conforme Skoog *et al.* (2015), consiste em dois eletrodos imersos em uma solução eletrolítica. Para os propósitos deste estudo são interessantes apenas as células que possuem eletrodos distintos, separados para evitar a reação direta entre os diferentes reagentes. Tal separação comumente é conseguida pela introdução de uma solução salina entre as soluções.

Figura 7 – Célula eletrolítica.



Fonte: Skoog *et al.* (2015).

No exemplo acima (figura 6) a eletricidade é conduzida de uma solução para a outra pela movimentação dos íons potássio presentes na ponte salina para uma direção e íons cloreto para outra direção, evitando-se o contato direto entre o cobre metálico e os íons prata. Ainda conforme Skoog *et al.* (2015), em uma célula eletroquímica o cátodo é o eletrodo no qual acontece a redução (ganho de elétrons), enquanto o ânodo é o eletrodo que vem a sofrer oxidação (perda de elétrons). São exemplos de reações catódicas as seguintes formulações (1)(2)(3):



As células eletroquímicas dividem-se em galvânicas ou eletrolíticas.

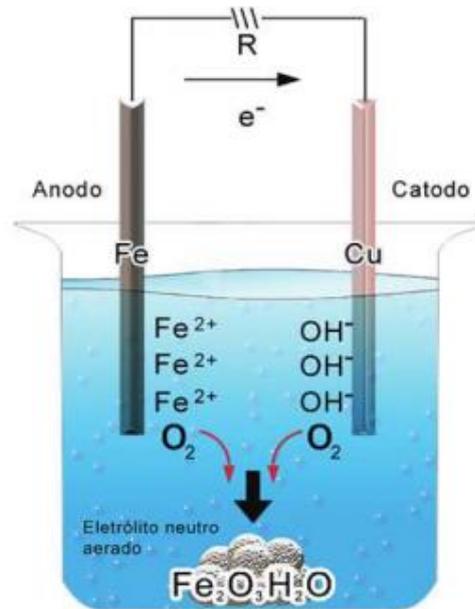
As células galvânicas ou voltaicas armazenam energia elétrica. As baterias são geralmente feitas de várias dessas células conectadas em série para produzir voltagens mais elevadas que aquelas produzidas por uma única célula. Nessas células, as reações que ocorrem nos eletrodos tendem a prosseguir espontaneamente e produzem um fluxo de elétrons do ânodo para o cátodo através de um condutor externo (Skoog *et al.*, 2015).

A célula eletrolítica necessita de uma fonte externa de energia elétrica para ser operada. A proteção catódica, para ocorrer, necessita de reações catódicas e anódicas, como será visto adiante.

5.2 CORROSÃO ELETROQUÍMICA

Para que ocorra a corrosão eletroquímica é necessária uma estrutura metálica em contato com o eletrólito, na qual irão aparecer regiões de corrosão (áreas anódicas e catódicas). Independentemente das razões inerentes ou relacionadas ao metal, tais regiões de ânodo e cátodo sempre existirão. As principais razões são a heterogeneidade dos materiais, estresse interno, impurezas, diferenças no gás e diferenças na composição do eletrólito. Pelo aparecimento dessas regiões anódicas e catódicas, na presença de eletrólito, surgirá a corrente necessária para proteger o metal, conforme mostrado na figura 8.

Figura 8 - Pilha de corrosão galvânica.



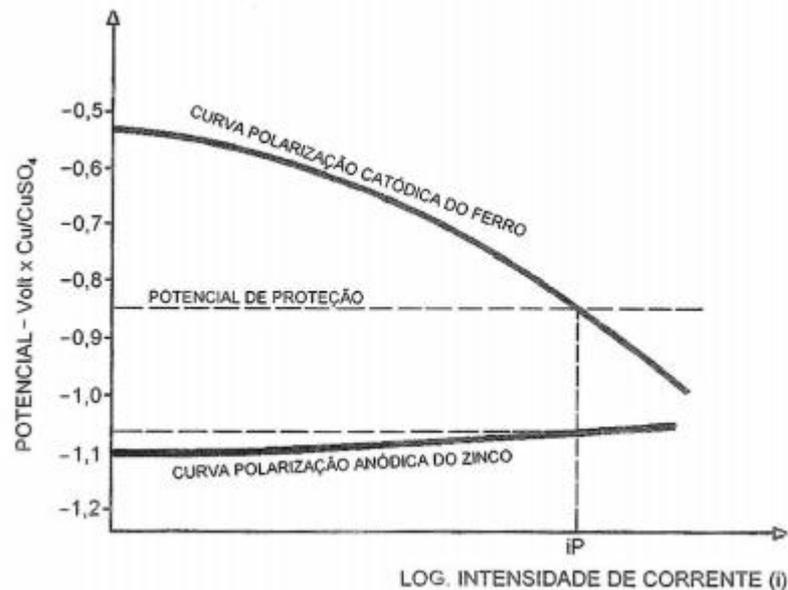
Fonte: Alves, 2018.

Observa-se que, no reator, o cobre serve apenas como portador da reação de redução permanente, não participando dela. Desde que os elétrons atinjam cobre suficiente, ele não sofrerá corrosão. Portanto, esta é a essência do mecanismo de proteção catódica. É importante notar que a direção da corrente usada na figura 7 é real e não convencional. Se as barras de Fe e Cu forem transformadas na área do cátodo por um processo artificial e a área do ânodo for transportada para outra superfície criada para esse fim, o fluxo de elétrons da área do ânodo inicial (Cu) não existirá mais, eliminando assim o processo de corrosão (ALVES, 2018). Para Rizério (2020, pg. 11 apud Araújo, Panossian e Lourenço, 2013):

O fundamento da proteção catódica, de forma simples, é definido pela redução ou supressão do processo corrosivo pela conversão das armaduras em áreas catódicas. Isso é feito por imposição de uma corrente galvânica ou impressa para que o potencial da interface aço/concreto caia para valores mais negativos que seu potencial natural de corrosão.

Segundo Dutra e Nunes (2011), o mecanismo de proteção catódica pode ser melhor entendido por meio da análise do diagrama de polarização, que representa a curva de polarização anódica do ânodo elétrico e a curva de polarização catódica do ferro, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Mecanismo de proteção catódica dado pelas curvas de polarização



Fonte: Dutra e Nunes, 2011.

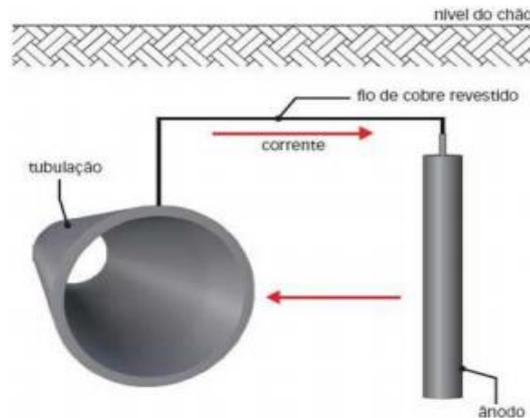
Quando o ânodo elétrico é conectado à estrutura de aço, sua capacidade de descarregar corrente suficiente para polarizar o aço a um valor maior do que o necessário para sua proteção geral pode ser realizada. Obviamente é necessário manter uma relação adequada entre a área do ânodo e a área da estrutura a ser protegida e fazer com que ambas entrem em contato com o meio eletrolítico de interesse simultaneamente. Na figura acima é exibido esse mecanismo de proteção catódica dado pelas curvas de polarização.

Dois sistemas diferentes podem ser usados para a proteção catódica, ambos baseados no mesmo princípio de inserir corrente no material a ser protegido por meio eletrolítico. Esses sistemas são chamados de: proteção catódica de corrente espontânea e proteção catódica de corrente impressa. Ambos são baseados em levar o potencial de corrosão do material a ser protegido para um valor correspondente à imunidade do material (DUTRA, NUNES, 2011).

Na proteção catódica galvânica, a corrente necessária para o funcionamento do sistema é acionada pela força eletromotriz entre o metal a ser protegido (cátodo) e outros metais selecionados como ânodos. Os elétrons que compõem a corrente do sistema fluem do material selecionado como ânodo, ou seja, são elétrons oxidados. Esse processo de oxidação pode ser interpretado como o

sacrifício desse material para "salvar" outro material. A direção real da corrente é indicada pela seta na Figura 10.

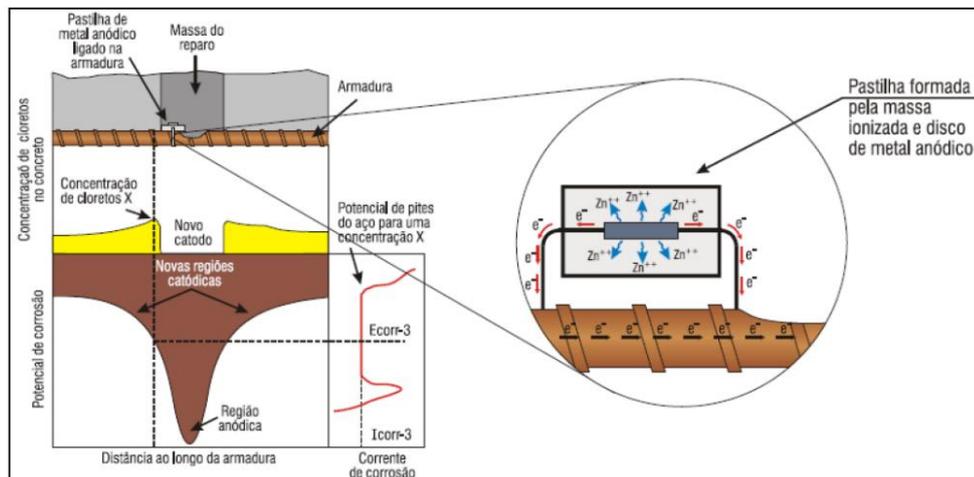
Figura 10 - Sistema de proteção galvânica.



Fonte: Dutra; Nunes, 2011.

A finalidade da proteção catódica é criar uma corrente galvânica superior à corrosiva, redirecionando-a para um metal mais ativo protegendo, desta forma, a área afetada. A Figura 11 ilustra uma estrutura recuperada com a utilização de um disco de zinco (metal anódico) para redirecionar o fluxo iônico.

Figura 11 – Estrutura de concreto armado recuperada com o uso de uma pastilha galvânica.



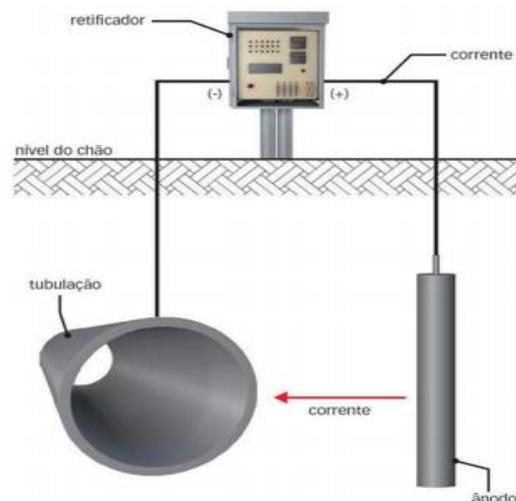
Fonte: Rizério (2020).

Os materiais metálicos mais utilizados como ânodos são as ligas de zinco (Zn), magnésio (Mg) e alumínio (Al) por apresentarem uma maior diferença de potencial em relação aos materiais metálicos mais comumente utilizados na estrutura a ser protegida, principalmente o aço. Como a diferença no potencial de corrente geralmente não é superior a 1,2 V, para ter uma injeção de corrente que possa

proteger a estrutura, a resistência total do circuito deve ser baixa. Esse fato prova que a proteção catódica eletroquímica só é eficaz em eletrólitos de baixa resistividade, como água do mar e solos de até 6.000 ohm.cm em ânodos de magnésio. Para ânodos de alumínio e zinco, o limite é muito menor e não deve ultrapassar 1.500 ohm.cm (DUTRA; NUNES, 2011).

A principal desvantagem deste sistema de proteção é que o ânodo de sacrifício precisa ser substituído após o consumo. Por outro lado, uma vez que nenhuma fonte de alimentação é necessária para a operação, há a vantagem de menos interrupção da operação. O sistema de proteção catódica eletroquímica também apresenta limitações, não sendo adequado para estruturas sujeitas a fortes correntes de interferência e, de fato, não permite o ajuste da corrente que flui no sistema (DUTRA; NUNES, 2011).

Figura 12 - Sistema de proteção catódica usando corrente impressa.



Fonte: Dutra; Nunes, (2011).

No sistema de proteção catódica de corrente impressa (figura 12), a polarização do metal a ser protegido é alcançada pela aplicação de uma corrente conduzida pela força eletromotriz (fem) de um gerador DC (por exemplo, um retificador, bateria ou gerador), como mostrado na Figura 8. Para fechar o loop, deve haver também um meio eletrolítico e um leito anódico, situação em que o leito anódico é inerte (DUTRA; NUNES, 2011).

A existência de uma fonte de alimentação externa que gere corrente é uma grande diferença entre os dois sistemas. Devido ao contato entre dois metais com

potenciais diferentes, a polarização da corrente ocorre espontaneamente. O efeito protetor da corrente de impressão no cátodo é adequado para estruturas localizadas em eletrólitos de baixa, média, alta e muito alta resistividade. No entanto, considerando o longo tempo de projeto de outros componentes, são necessárias inspeção e manutenção especiais do retificador. (DUTRA; NUNES, 2011).

Outra vantagem desses sistemas é que eles são adequados para estruturas suscetíveis as correntes de interferência e permitem amplos ajustes por meio de retificadores. No entanto, eles são mais suscetíveis a interferências e operação descontrolada, o que é característico da natureza dos equipamentos elétricos (DUTRA; NUNES, 2011).

Rodrigues (2000) esclarece que, além das condições gerais do concreto e sua armadura, um dos fatores mais relevantes para dimensionar o mecanismo de proteção catódica é a densidade (mA/m^2), o que exige conhecimento prévio da resistividade do concreto (eletrólito). Esta densidade pode variar entre $4 \text{ mA}/\text{m}^2$ e $90 \text{ mA}/\text{m}^2$, dependendo da taxa de corrosão no ponto de aplicação.

5.3 CORROSÃO ELETROQUÍMICAS

Dependendo da natureza do meio corrosivo, do tipo de metal e até mesmo do aspecto da corrosão, diferentes tipos de corrosão podem ocorrer. A seguir são apresentados alguns dos principais tipos de corrosão.

Na corrosão galvânica há um processo eletroquímico no qual dois metais estão em contato elétrico e imersos em um meio eletrolítico, um metal é corroído preferencialmente em relação ao outro. Este tipo de corrosão considera que quanto mais distante o material está do potencial eletroquímico no eletrólito e mais distantes os materiais da tabela estão, maior será a diferença de potencial entre eles e, portanto, maior será a corrente no processo (PORTAL CIMM, 2018).

Na corrosão de fendas, o metal será corroído porque a concentração de oxigênio é menor do que a concentração de oxigênio na área adjacente (aeração diferencial). A corrosão atmosférica é chamada de processo de corrosão em estruturas de ar. A intensidade da corrosão atmosférica depende da umidade relativa do ar, do teor de sais em suspensão e gases poluentes (como o gás sulfuroso). Outros fatores também afetam a corrosividade da atmosfera, como o regime de chuvas

relacionado aos poluentes trazidos pela água de lavagem da chuva ou partículas sólidas em suspensão (PORTAL CIMM, 2018).

A corrosão atmosférica é chamada de processo de corrosão em estruturas de ar. A intensidade da corrosão atmosférica depende da umidade relativa do ar, do teor de sais em suspensão e gases poluentes (como o gás sulfuroso). Outros fatores também afetam a corrosividade da atmosfera, como o regime de chuvas relacionado aos poluentes trazidos pela água de lavagem da chuva, partículas sólidas em suspensão: podem se depositar na superfície do metal, além de uma série de fenômenos de aeração.

Alguns fatores ajudam a manter a umidade no local como, por exemplo, o estado do vento, que auxilia na difusão de poluentes na estrutura metálica. O efeito do vento causará corrosão ao revestimento protetor e aos materiais metálicos. Outro fator é a temperatura: se a temperatura for alta, a possibilidade de condensação de vapor será reduzida. Assim, quanto menor for o tempo de residência do eletrólito, menor será o processo de corrosão.

A corrosão do solo é um processo observado em estruturas enterradas. Essas estruturas são geralmente tubos, pilhas de metal, cabos de energia e telecomunicações e tanques de armazenamento subterrâneos. De acordo com o estudo de Dutra e Nunes (2011), a intensidade da corrosão do solo depende da umidade, composição química e valor do pH do próprio solo. Na prática da corrosão, o valor da resistividade do solo é geralmente usado como um índice de resistividade. Dessa forma, um solo que possua baixa resistividade é mais agressivo, pois possui umidade permanente e sais inorgânicos dissolvidos.

Outros fatores podem afetar a corrosão do solo, como: a permeabilidade do solo: solos mais permeáveis podem aerar a estrutura, então a taxa de corrosão é maior; a presença de bactérias: certos tipos de bactérias podem acelerar o processo de corrosão, especialmente sob certas condições e na presença de poluentes que podem tornar o solo mais corrosivo.

A corrosão por água é um processo observado em estruturas em contato com meios aquosos. Estruturas corroídas incluem estacas, tubos de afundamento, instalação de água de resfriamento, geração de vapor e instalação de tratamento e distribuição de água (DUTRA; NUNES, 2011). Para estruturas imersas em água doce,

a taxa de corrosão depende da concentração de sal, ácido ou álcali dissolvido, pois a presença dessas substâncias acelera o processo de corrosão.

Segundo Dutra e Nunes (2011), estruturas imersas em água salgada sempre sofrerão altas taxas de corrosão, principalmente em meios aerados, que será ainda mais agravada se houver presença de contaminantes. Devido à presença de água do mar, sendo o sal um excelente eletrólito, e a presença de outros componentes (como gases dissolvidos) também pode ocorrer potencialização do processo de corrosão. A taxa de corrosão pode ser reduzida ou aumentada de acordo com o teor de oxigênio dissolvido. Mesmo na presença de água salgada, se o teor de oxigênio dissolvido for praticamente zero, a taxa de corrosão da estrutura de aço pode ser ignorada.

A menos que o concreto esteja contaminado e deteriorado, as barras de aço existentes no concreto armado não são fáceis de corroer. A camada de cobertura de cimento e seus componentes atuam na inibição da corrosão da armadura e atuam como barreira mecânica para a entrada de poluentes. Pode-se concluir que, quanto melhor for a qualidade do cobrimento, maior será a proteção mecânica contra a corrosão.

Outro fator que inibe a corrosão do aço no concreto é a sua alcalinidade, que se deve ao hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento, mantendo um meio alcalino (pH em torno de 12) que favorece a passivação do aço. Na maioria dos casos, o aço presente no concreto armado ou protendido será resistente aos agentes de corrosão por muito tempo, embora em alguns casos o processo de corrosão pode ocorrer de forma gradual e em altas velocidades.

A corrosão causará a quebra do aço, afetando o uso e a estabilidade da estrutura. Portanto, para evitar o processo de corrosão do aço, deve-se prevenir a formação de células eletroquímicas. Por este motivo, atenção especial deve ser dada ao concreto. Considerando que a oxidação ocorre nas áreas mais aeradas, formando óxido de ferro hidratado $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, fissuras ou defeitos na superfície do concreto irão produzir aerações que favorecem a corrosão.

O contato entre diferentes materiais metálicos produzirá uma célula galvânica, que é propícia à corrosão do ferro, que atua como ânodo da célula formada. Gentil (1982) apontou que para áreas com diferentes graus de deformação ou tensão, a corrosão é intensificada na área de concentração de tensões, pois esta posição

desempenha o papel de uma área de ânodo menor em relação a uma área de cátodo maior, e se o mecanismo for eletroquímico a densidade de corrente é muito alta, o que acelera o processo de corrosão.

Devido à heterogeneidade do próprio material ou do meio corrosivo, a corrente se origina da pilha eletroquímica. De acordo com Gentil (1982), certos fatores externos podem acelerar o processo de corrosão, dando destaque quanto à porosidade e permeabilidade. A porosidade do concreto o torna mais suscetível à penetração de soluções eletrolíticas e de oxigênio (por exemplo, oxigênio), o que reduz a resistividade do concreto e facilita a formação de pilhas eletroquímicas, acelerando o processo de corrosão.

Quanto à condutividade elétrica, os sais (como cloreto, sulfato e nitrato) são eletrólitos fortes que reduzem a resistividade do meio e facilitam o fluxo de elétrons. Portanto, é importante controlar a quantidade de cloreto adicionado ao concreto e evitar o uso de aditivos à base dessas substâncias.

A água do mar é muito corrosiva para o concreto, pela abundância de sais dissolvidos, o que aumenta a condutividade e, conseqüentemente, a corrente entre o ânodo e o cátodo. Segundo Jones (1996), para uma concentração de 3% de cloreto de sódio, a taxa de corrosão das barras de aço é a mais alta.

A grande variedade de materiais de promoção de reparos traz alternativas que dificultam a classificação de forma padronizada. Mas de acordo com Andrade e González (1988), pode-se dividir os sistemas de reparo quanto à extensão, profundidade e metodologia de reparo. No grupo I, os produtos reduzem o processo corrosivo por eliminação de acesso de agressivos que participam do processo de corrosão, como CO_2 , O_2 , H_2O , Cl . Podendo utilizar como exemplo as argamassas, base apóxi, poliuretânica, pinturas e primers, bloqueadores de poros, hidrofugantes. (SILVA, 2011).

Já no grupo II, composto por produtos e sistemas que tem como objetivo restabelecer condições de estabilidade repassivação e tem como exemplo as argamassas, grautes de base com cimento Portland, realcalinização e extração de cloretos. No grupo III, tem-se os sistemas por inibição e no grupo IV, tem-se os sistemas de proteção catódica por ânodo de sacrifício e corrente impressa.

No grupo VI, os sistemas que atuam mesclam formas de dois ou mais grupos, como argamassas de cimento Portland, juntamente à adição de polímeros,

formando a repassivação de alta alcalinidade e efeito barreira por polímero incorporado.

5.4 ATAQUES DE CLORETOS

De acordo com Bonadeu (2016), a corrosão de armaduras é uma das principais patologias que afetam o concreto armado, sendo que uma das mais graves manifestações desta patologia ocorre a partir da penetração de íons cloreto na camada de cobrimento.

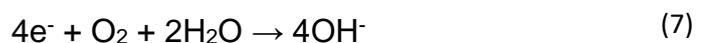
A esse respeito, Nepomuceno (2005) pontua que o concreto possui alguns mecanismos de transporte de agentes agressivos que favorecem a ação nociva de íons cloreto, a saber: absorção capilar (a tensão superficial do líquido origina uma pressão negativa que possibilita à água desafiar a gravidade e penetrar na estrutura), permeabilidade (ocorre com íons dissolvidos em água), difusão iônica (movimento de íons por conta de um gradiente de concentração) e migração iônica (transporte levado a efeito por ação de campos elétricos).

Abbas *et al.* (2014), explicam que a corrosão do aço por cloretos envolve uma reação de oxidação e uma reação de redução através da circulação de íons em meio aquoso. Se dá através de reações nas zonas anódicas que culminam com a dissolução do aço, posteriormente balanceadas nas zonas catódicas, gerando ânions hidroxilas. Finalmente os íons Fe^{2+} migram para o ânodo, gerando hidróxido ferroso, ou hidróxido de ferro II de acordo com as equações (4),(5),(6) e (7) abaixo.

Reações anódicas:



Reações catódica:

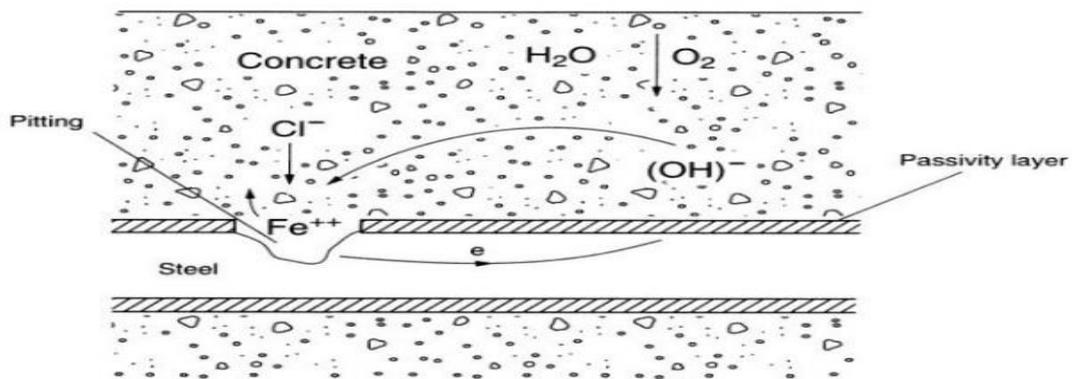


Fonte: Abbas *et al.* (2014).

Gentil (2003) explica que o primeiro produto resultante da corrosão é o hidróxido de ferro II, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, que a seguir pode se transformar em Fe_3O_4 , (magnetita de cor preta ou esverdeada) ou hidróxido de ferro III, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, de tom castanho-alaranjado. Esta coloração indica que a armadura encontra-se em processo de corrosão. Constata-se, assim, que para que ocorra a corrosão é imprescindível a presença de água e oxigênio, necessários para a continuidade do processo, não existindo, portanto, corrosão em concretos com umidade inferior a 60% (NEVILLE, BROOKS, 2016).

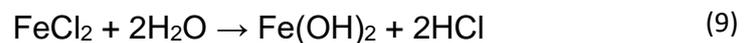
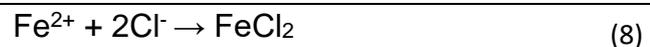
A Figura 13 mostra o esquema da corrosão eletroquímica na presença de cloretos.

Figura 13 - Corrosão eletroquímica na presença de cloretos.



Fonte: Neville, 2016.

A reação química que representa o ataque dos íons cloretos possui as seguintes formulações (8) e (9):



No caso de penetração de cloreto em estruturas de concreto armado é possível determinar a concentração crítica de cloreto que leva à despassivação (destruição da camada passivadora que protege o aço no interior do concreto) da estrutura através da equação (10) reproduzida abaixo, em que $C_{(x,t)}$ é a concentração

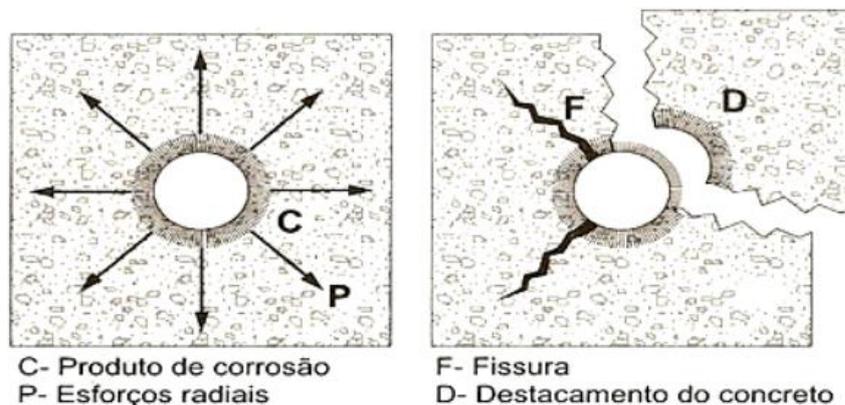
crítica de cloreto à distância x por um tempo t ; C_s é a concentração superficial ou externa de cloreto e D_{ap} é o coeficiente de difusão aparente.

$$C(x,t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}}\right) \quad (10)$$

$\operatorname{erf}(x)$ – função erro de gauss

Embora a corrosão seja um processo natural, podem ser tomadas medidas para proteger as estruturas de aço, sejam elas de concreto armado, concreto protendido ou estruturas metálicas. A Associação Brasileira de Corrosão estima que a importância da proteção de edificações seja muito importante, pois, no Brasil, o processo de recuperação de estruturas corroídas representa 3% do PIB, e o uso de técnicas preventivas pode economizar 2% do PIB.

Figura 14 – Efeitos da corrosão no concreto



Fonte: Neville, 2016.

Conforme a figura 14, listamos alguns efeitos da corrosão no concreto:

- surgimento localizado de esforços de tração devido aos produtos da corrosão.
- trincas e deslocamento do concreto, causando enfraquecimento do elemento estrutural.

- facilita a penetração de agentes nocivos como CO₂, Cl, O₂, SO₄
- redução da área de aço, causando redução da capacidade de tração do elemento.
- reação de corrosão em cadeia da armadura como toda.
- redução da aderência aço/concreto
- estético
- segurança e confiabilidade
- colapso estrutural

Quadro 5 - Características das estações atmosféricas da cidade de Fortaleza.

Estação	Localização	Cloretos (mg / m ² .dia)	Sulfatos (mg / 100cm ² .dia)	Partículas Sedimentáveis (g/m ² .mês)
Cofeco (Sabiaguaba)	15 m da praia (marinha)	3502	-	6,3
SDV (praia do Futuro)	15 m da praia (marinha / industrial / urbana)	1832	0,706	5,73
RFSA	1 km da praia (urbana / industrial)	23,6	0,047	0,63
NUTEC	4 km da praia (urbana)	31,5	0,03	0,25

Fonte: Albuquerque, 2005.

A agressividade do meio é a responsável pela velocidade e intensidade da corrosão do concreto e da armadura, em função desta agressividade é que as novas exigências serão impostas à estrutura de concreto. A exemplo disso a agressividade ambiental da cidade de Fortaleza devido à salinidade do mar do Ceará apresentar valores acima da média, principalmente na região da Praia do Futuro (ver quadro 5), aliada aos ventos alíseos incidentes normais à costa que levam as gotículas de água salgada a vários quilômetros do litoral (Albuquerque, 2005). Segundo a Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), a umidade média de Fortaleza é acima de 70%, o que torna o ambiente mais propício para a carbonatação do concreto facilitando a corrosão eletroquímica nas armaduras. Tem-se ainda um baixo índice pluviométrico na cidade, o que aumenta o tempo de permanência do filme de eletrólito nas estruturas.

6 PROTEÇÃO CATÓDICA

Segundo Dutra e Nunes (2011), a proteção catódica remonta ao início do século XIX, quando a eletroquímica dava seus primeiros passos. Sir Humphrey Davy foi o primeiro cientista a tentar retardar a corrosão das placas de cobre que cobriam os cascos de madeira de navios fixando pequenas peças de outros materiais como ferro, estanho e zinco nessas estruturas.

Na década de 1920, com o desenvolvimento da indústria do petróleo, surgiram aços longos e dutos de petróleo usados para transportar esses produtos. Logo em seguida, com o aumento do soterramento, o problema de corrosão tornou-se grave, e o número de furos nessas tubulações também aumentou. O problema foi minimizado com o uso de tinta, e logo se seguiu a proteção catódica, primeiro com ânodos de eletrodeposição e, em seguida, com o desenvolvimento de um sistema de corrente de impressão (DUTRA; NUNES, 2011).

No Brasil, seu uso efetivo teve início por volta de 1964, com a conclusão do gasoduto Rio-Belo Horizonte (ORBEL) da Petrobras. Atualmente segmentos da mineração, energia, gás natural, petróleo, empresas de distribuição de derivados, produtos petroquímicos e indústria em geral utilizam a tecnologia da proteção catódica para resolver problemas de corrosão causada pelo solo ou água em suas instalações metálicas subterrâneas ou subaquáticas (GOMES, 1990).

Dentre as instalações que aplicam proteção catódica destacam-se: dutos subterrâneos ou submersos: dutos, dutos de gás natural, oleodutos, minerodutos; tanques de armazenamento de petróleo; estruturas offshore: plataformas, dutos, bóias e outras instalações portuárias; fundações de estacas metálicas; Pontes e torres metálicas; estruturas enterradas em unidades industriais; equipamentos de abastecimento de água e estações de tratamento de esgoto; invólucros metálicos usados em poços artesianos e poços de petróleo, tanques de armazenamento de combustível em postos de gasolina e reforço metálico de estruturas de concreto (DUTRA; NUNES, 2011).

Araújo, Panossian e Lourenço (2013) pontuam que, embora tradicionalmente o método seja utilizado para proteger estruturas metálicas submersas ou enterradas, também a construção civil vem empregando esta técnica contra a corrosão de estruturas de concreto armado, o que demonstra que sua aplicação se expandiu para as mais diversas aplicações profissionais do mercado. De

acordo com estes autores a proteção catódica é, na maioria das vezes, aplicada a estruturas de concreto suscetíveis à ação de íons cloreto, como as localizadas próximas de ambientes industriais ou marinhos. Trata-se, portanto, de uma técnica recomendada diante do receio do surgimento de processos corrosivos em armaduras de aço seja por carbonatação, ataque de íons cloreto ou corrosão localizada. Seu princípio é bem simples, sendo largamente utilizado para proteger navios, podendo a tecnologia ser facilmente adaptada para proteger estruturas de concreto armado em ambiente aéreo. Sobre este princípio Rizério (2020) explana:

O circuito de ânodos de sacrifício incita uma corrente galvânica dimensionada a fim de se inibir as reações de oxidação nas armaduras, revertendo as reações em curso ao transformar as armaduras das áreas corrosivas em cátodos, evitando-se, assim, o processo eletroquímico da corrosão. A liga metálica do ânodo de sacrifício adotado para proteção da estrutura estudada neste trabalho é composta de zinco e alumínio e protegida por uma massa álcali-ativada importante ao desempenho e longevidade do sistema.

Ainda sobre o assunto em destaque, Rizério (2020) discorre que o uso desta técnica para a proteção de estruturas de concreto, se comparado com outros serviços disponíveis no mercado nacional, apresenta como vantagem maior durabilidade (ver quadro 6).

Para usar este importante método anticorrosivo, uma característica básica deve ser observada: a presença de um meio eletrolítico. O leito do ânodo deve ser instalado no ambiente de eletrólise e a corrente necessária para a proteção é fornecida através deste leito (DUTRA; NUNES, 2011).

A norma SHRP-S-359 – “Criteria for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Elements” chama atenção para o fato de que os valores de potencial mínimo para proteção do metal variam segundo o eletrólito existente (RODRIGUES, 2005). O quadro 6 apresenta um comparativo entre os serviços de recuperação estrutural o qual indica a proteção catódica como técnica de relevância e destaque. O quadro 7 nos mostra as principais vantagens e desvantagens dos dois sistemas de proteção catódica.

Quadro 6 - Quadro comparativo de serviços de recuperação para corrosão.

1. Recuperação estrutural convencional	2. Utilização de revestimentos (normalmente epóxicos)
<ul style="list-style-type: none"> - Não interrompe corrosão; - Acarreta barulho, entulho e paralizações; - É comum cobrar-se de R\$ 1.000,00 a R\$ 2.000,00/m³; - Usualmente, requer novos serviços após 5 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Revestimentos não interrompem a corrosão, apenas impedem a penetração de agentes contaminantes e água; - É comum cobrar-se de R\$ 20,00 a R\$ 50,00/m³.
3. Inibidores de corrosão (migração)	4. Proteção catódica com malha de titânio
<ul style="list-style-type: none"> - Não oferecem qualquer garantia; - Não há como comprovar que o material aplicado adentra no concreto em direção à armadura, interrompendo a corrosão; - É comum cobrar-se de R\$ 20,00 a 50,00/m³. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proteção catódica com malha de titânio; - Durabilidade de 20 a 30 anos; - Não é aplicada em locais onde há apenas corrosão localizada; - Requer manutenção e monitoramento constantes; - Requer revestimento e proteção; - Custo em torno de R\$ 520,00/m² para pontes e R\$ 750,00/m² em estruturas marítimas.
5. Proteção catódica com Jaqueta G (RECUPERAR nº 25)	6. Proteção catódica com Pastilha Galvânica (RECUPERAR nº33)
<ul style="list-style-type: none"> - Usada apenas em estacas marítimas, na zona de variação da maré; - Durabilidade superior a 30 anos; - Aplicação rápida, tendo comprimento em cerca de 2m; - Custo em torno de R\$ 4.500,00/estaca. 	<ul style="list-style-type: none"> - Durabilidade em torno de 15 anos; - Aplicada em qualquer estrutura, principalmente marítima; - Custo em torno de R\$ 15,00/unidade.

Fonte: Rizério (2020).

Quadro 7 - Quadro comparativo de vantagens e desvantagens das proteções por corrente impressa e galvânica.

Corrente	Vantagens	Desvantagens
Impressa	Requisitos de corrente acima de 5v Vida longa Vasta resistividade de eletrólitos Admite regulagem Grande vida útil do anodo, pois utiliza materiais nobres Aumenta a alcalinidade do concreto por provocar reações eletroquímicas no seu interior e, em alguns casos, reduzir o conteúdo de cloretos por migração iônica.	Necessita de fonte geradora Maior manutenção Acompanhamento operacional Sofre interferências vizinhas Alto custo de instalação Desprendimento de H
Galvânica	Não necessita de fonte geradora Requisitos de corrente até 5v Fácil manutenção Não sofre interferências vizinhas Investimento inicial baixo	Vida útil limitada Eletrólitos de baixa resistividade Não admite regulagem

Fonte: Próprio autor.

Proteção Catódica com pastilhas galvânica: dimensionamento

Considerado o fator mais importante para o dimensionamento do sistema, o cálculo para obtenção da corrente requerida para proteção pode ser utilizado tanto no dimensionamento do sistema de proteção catódica galvânica quanto no por corrente impressa.

A densidade de corrente de proteção [mA/m^2] (equação 11) tem seu valor dependente, dentre outros fatores, da resistividade do eletrólito bem como do tipo do material a proteger (DUTRA; NUNES, 2011).

$$d = 73,73 - 13,35 \cdot \log \rho \quad (11)$$

d - densidade de corrente de proteção
 ρ – resistividade do eletrólito

Pode se completar a proteção catódica com um revestimento protetor na estrutura, caracterizando assim um sistema composto, pois se reduz a área exposta. Este atua reduzindo consideravelmente a intensidade da corrente requerida na proteção, visto que irá atuar apenas em falhas deste revestimento. Podemos tomar como exemplo desta aplicação as tubulações utilizadas na rede de Gás canalizado. A eficiência desse revestimento é definida pela equação 12.

$$E = (1 - I_{\text{empregada}} / S \cdot d) \times 100 \quad (12)$$

E – Eficiência do revestimento

$I_{\text{empregada}}$ - Intensidade da corrente empregada

S - Área da superfície correspondente ao trecho protegido

d - Densidade de corrente de proteção

Quando sucede movimento relativo entre o elemento a proteger e o meio eletrólito (estruturas submersas no mar), Dutra e Nunes (2011) afirmam que ocorre uma alteração na energia cinética das reações, aumentando sua velocidade de ocorrência. Isso ocorre, pois, a alta da velocidade do eletrólito aumenta a difusão dos íons produzidos pelas reações anódicas, reduzindo a concentração ao redor da superfície anódica, despolarizando-a. Também em meios arejados, a alta da velocidade do eletrólito gera acréscimo no suprimento de oxigênio à superfície catódica, contribuindo ainda mais para sua despolarização. Estas manifestações se agregam, e para compensar seu efeito é necessário aumentar, através de um fator, a intensidade da corrente de proteção.

A área total da superfície influencia proporcionalmente na corrente requerida para a proteção (equação 13), sendo um importante elemento para o dimensionamento do sistema. Vale ressaltar que seu formato geométrico tem grande relevância. Dutra e Nunes (2011) também aconselham adotar um coeficiente de segurança em função da aeração e movimento relativo, o qual é estipulado pelo projetista devido à natureza e complexidade da estrutura a ser protegida.

$$I_{\text{requerida}} = S \cdot d \cdot f \cdot (1 - E) \cdot K \quad (13)$$

f - fator de velocidade

K - coeficiente de segurança

$I_{\text{requerida}}$ - Intensidade da corrente requerida

Portanto, a intensidade da corrente equivale ao produto da área a proteger, da densidade de corrente de proteção, do fator de velocidade, da eficiência do revestimento (se houver) e de um coeficiente de segurança. De posse da corrente requerida, basta selecionar o material anódico conveniente para o material a proteger e sua massa apropriada através da equação 14 que relaciona a massa do ânodo requerida, em kg; vida útil desejada, em ano; intensidade da corrente requerida, em ampère; capacidade de corrente do material do ânodo, em A.h/kg; fator de utilização (adimensional) (Pires e Jr, 2018).

$$M = \frac{8760 \cdot V \cdot I_{requerida}}{F \cdot C} \quad (14)$$

M - massa do anodo requerida

C - capacidade de corrente do material do anodo

F - fator de utilização

V - vida útil desejada

De acordo com Pires e Jr (2018), o número de ânodos é encontrado dividindo a massa do material a proteger pela massa do ânodo a ser utilizado. A razão entre a intensidade da corrente requerida de proteção e o numero de ânodos equivale a corrente em cada ânodo. Isso nos mostra que para proteger uma determinada área de um determinado material é requerido uma determinada massa de outro material de sacrifício. É evidente que para sistemas estacionários não se deve aplicar o fator de movimento relativo, nem seu fator de eficiência para sistemas com cobertura.

O experimento de Pires e Jr (2018) comprova a alta eficiência do sistema de proteção catódica. Neste experimento foi aplicado o sistema de proteção catódica galvânica a corpos de prova sem revestimento e isentas de oxidação inicial. O experimento foi conduzido por 40 dias com os corpos de provas imerso em água salgada a 3% de cloreto de sódio sem nenhum movimento relativo. As barras de aço da armadura possuem formato cilíndrico, e foram concretadas em formas de madeira causando propositalmente patologias da concretagem tais como bicheiras assim como mostradas na figura 15. Vale ressaltar que após a desforma, o aço aparente das bicheiras apresentava a camada de passivação, e para a homogeneidade do experimento foram removidas.

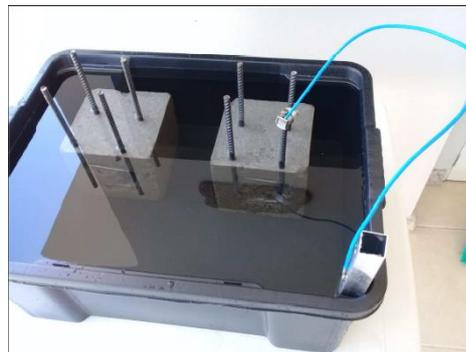
Figura 15 – armadura, concretagem e corpo de prova



Fonte: Pires e Jr (2018)

Pires e Jr (2018) utilizaram como ânodo de sacrifício uma barra de alumínio de massa previamente calculada ligada eletricamente, por meio de fio de cobre, a armadura de um dos dois corpos de prova, enquanto que o outro permaneceu sem conforme a figura 16.

Figura 16 – corpo de prova imerso em eletrólito.

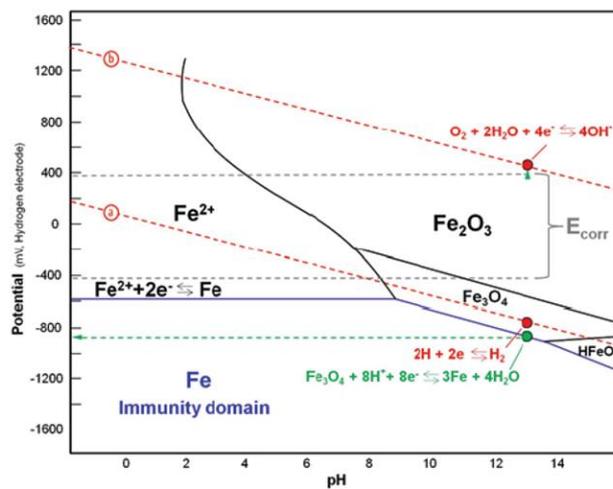


Fonte: Pires e Jr (2018)

O experimento de pires e jr(2018) consiste em reduzir o potencial de aço em uma das amostras para valores mais eletronegativos do que seu potencial natural de corrosão (e_{corr}). Isso é conseguido através da circulação de uma corrente, capaz

de polarizar negativamente o aço que se deseja proteger, trazendo o potencial do ferro para muito próximo ou no domínio de imunidade é a forma de protegê-lo da corrosão natural. Essa corrente surge ao ligar o anodo de alumínio ao ferro da armadura, devido a seus potenciais naturais serem diferentes. O diagrama de PourBaix (potencial e pH do aço) na figura 17 mostra as fronteiras do domínio de passividade do ferro em zona de altos valores de potencial (eletronegatividade) e altos níveis de pH (para o concreto sólido o normal é 13) (Araújo *et al*(2013)).

Figura 17 – Diagrama de PourBaix.



Fonte: Araújo *et al*(2013)

A figura 18 mostra, como já era de se esperar, que após decorrido 1 hora de experimento, o corpo de prova sem o ânodo de sacrifício apresentou início de oxidação, enquanto que o corpo provido do ânodo permaneceu sem nenhuma alteração .

Figura 18 – Detalhe após 1hr de experimento



Fonte: Pires e Jr (2018)

Também constataram que o meio eletrólito é muito importante na eficiência dessa técnica de combate a corrosão. Na figura 19 podemos observar que no corpo provido de ânodo de sacrifício, a parte imersa no eletrólito (água salgada) se manteve inalterada. Já a parte imersa em outro eletrólito (o ar), manifestou corrosão em ambos os casos sendo mais acentuada no corpo sem proteção catódica.

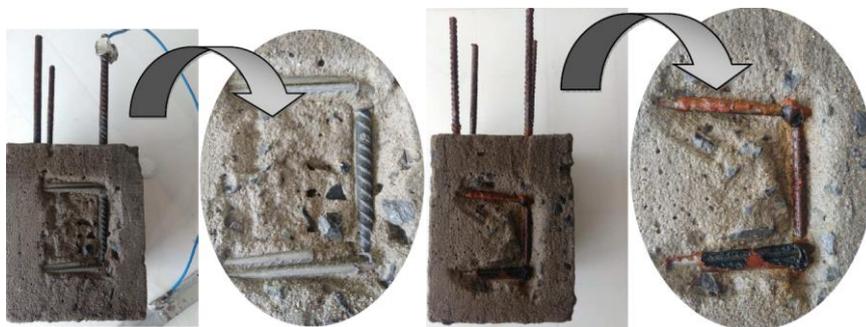
Figura 19 – corrosão da armadura



Fonte: Pires e Jr (2018)

Decorrido o tempo do experimento, ficou claro o nível de eficiência do sistema de proteção catódica por corrente galvânica de um sistema corretamente dimensionado para os materiais apropriados (figura 20). Além disso, a influência do eletrólito na eficácia do método também ficou bem evidente.

Figura 20 – Detalhe dos corpos de prova ao término do experimento.



Fonte: Pires e Jr (2018)

Conforme já demonstrado por Pires e Jr (2018), o meio em que a estrutura a ser protegida se encontra é muito importante. Não só em estruturas novas, mas também na recuperação estrutural, pequenas áreas de aço normalmente são protegidas com pastilhas galvânicas de zinco ou alumínio conforme exemplificado na figura 21.

Rizério apresentou a revitalização de uma estrutura em concreto armado tipo torre de resfriamento com diversas patologias, dentre elas a corrosão, por meio de sistema de proteção catódica por corrente galvânica. A revitalização foi feita em 3 etapas : perícia e ensaios (2018); cálculos e dimensionamento (2018) e executiva (2019). Após perícias e ensaios de níveis de carbonatação, resistividade elétrica, e potencial de corrosão, foi feito o dimensionamento do sistema de proteção catódica por corrente galvânica para proteção da armadura. Rizério também ressaltou que poucos são os fornecedores do material empregado, bem como o dimensionamento ter sido feito por um escritório especializado, assim como a instalação foi feita por técnicos experientes, demonstrando que esta técnica é pouco disseminada na indústria da construção civil.

Para grandes áreas usualmente se utiliza uma tela galvânica (figura 22). A ligação entre os elementos (ânodo e cátodo) deve estar isenta de impurezas garantindo boa condutibilidade entre eles. Em fundações armadas também é muito viável, na fase de projeto, a implementações de proteção catódica galvânica.

Figura 21 - Aplicação de pastilha galvânica em reparo de borda de piso industrial



Fonte: REFORMA FACIL.

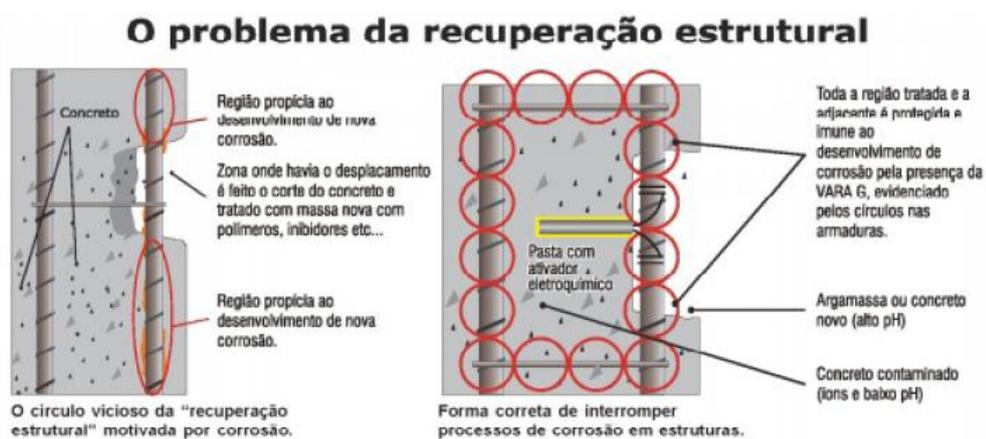
Figura 22 - Tela galvânica.



Fonte: ROGERTEC

Geralmente a Vara Galvânica (figura 23) é utilizada para pontos do concreto que está em estado de corrosão, mas ainda não entrou em processo de deterioração. Esta medição de corrosão do aço é efetuada com semi-pilha de cobre e sulfato de cobre, fazendo a ligação da linha equipotencial. Sua aplicação consiste em furar o concreto inclinadamente, introduzir o ânodo ligado por um fio a armação, e recomposição do espaço com pasta de cimento com ativador eletroquímico (baixar a resistividade). Essa técnica previne que o concreto seja danificado pela deterioração do aço.

Figura 23 - Vara galvânica



Fonte: ROGERTEC

O ZTP consiste na projeção térmica de zinco puro sobre a superfície do concreto em direção as armaduras. Aplica-se o zinco através de um gerador e uma pistola, que fundi dois fios de zinco ao mesmo tempo, e com o impulso de um jato de ar comprimido com material derretido, a proteção é depositada na superfície do concreto. O zinco trabalha como ânodo de sacrifício dando uma proteção as armaduras. A figura 24 ilustra bem essa técnica.

Figura 24 - Zinco Termo projetado ZTP



Fonte: ROCHA 2000.

A galvanização a frio atualmente é muito utilizada na recuperação estrutural em armaduras em processo de corrosão. Após a remoção do concreto deslocado, é efetuada medição da seção do aço para confirmar que a perda de diâmetro ainda está dentro dos parâmetros aceitáveis. Após efetuada limpeza da corrosão sobre o aço é aplicada, manualmente, camada de um prime a base de zinco conforme mostrado na figura 25.

Figura 25 - Galvanização a frio



Fonte: INFORME SINDICO

Algumas aplicações são mostradas nas figuras 26 e 27 a seguir:

Figura 26 - Cristo Redentor – utiliza a técnica de proteção catódica por corrente impressa com ânodo em tela de titânio.



Fonte: RIO CITY

Figura 27 - Ponte San Leandro e velódromo San Cristobal – utiliza a técnica de proteção catódica por corrente galvânica com ânodo embutidos.



Fonte: Pires e Jr (2018)

7 CONCLUSÕES

A corrosão é, indubitavelmente, uma das mais severas patologias que afetam a construção civil em função de seu volume e frequência. Neste sentido, a utilização de mecanismos de proteção catódica é um importante instrumento para aumentar a vida útil de estruturas de concreto armado, reduzindo custos de manutenção. O objetivo geral deste estudo foi, precisamente, analisar a proteção catódica como instrumento de controle dos diversos tipos de corrosão do aço existentes.

A consulta à literatura disponível sobre o tema possibilitou uma melhor compreensão do funcionamento da proteção catódica, tanto acerca do sistema galvânico quanto acerca do sistema levado a efeito por corrente impressa, bem como sobre o fenômeno da corrosão de armaduras de aço em estruturas de concreto. Constatou-se que fatores ambientais são importantes catalisadores de processos corrosivos, como o ataque de íons cloreto que acarretam a despassivação das armaduras.

Comprovou-se que a resistividade elétrica do concreto é importante para que se possa dimensionar adequadamente os mecanismos de proteção catódica, razão pela qual a realização de testes para determinar com precisão esta resistividade é obrigatória. Comprovou-se também a necessidade de um meio eletrolítico, pois a proteção catódica não funciona para estruturas metálicas na ausência deste, já que é necessária a migração de elétrons do ânodo para o cátodo.

Concluiu-se que o sistema de proteção catódica é bastante útil para prevenir a corrosão precoce ou minimizar a evolução de um processo corrosivo já em andamento, além de apresentar vantagens referentes à durabilidade em comparação com outros métodos, revelando-se uma técnica de efetiva eficiência para guarnecer estruturas de concreto armado, onde a manutenção preventiva é inexequível. Considerando sua importância é preciso aprimorar sua disseminação na indústria da construção civil, pois a falta de conhecimentos mais aprofundados sobre o seu funcionamento e a falta de sistemas para sua aplicação reduzem consideravelmente a utilização da proteção catódica.

REFERÊNCIAS

ABBAS, Saffer; SOLIMAN, Ahmed M.; NEHDI, Moncef L. Chloride Ion Penetration in Reinforced Concrete and Steel Fiber-Reinforced Concrete Precast Tunnel Lining Segments. **International Concrete Abstracts Portal. Publication:** Materials Journal. v. 111. p. 613-622. 2014

ALBUQUERQUE, A. T. ; OTOCH, S. Proposta de classificação da agressividade do ambiente na cidade de Fortaleza. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. Anais... Olinda: IBRACON, 2005. p. 743-748.

ALMEIDA, S. L. M., LUZ, A. B. (Eds.). **Manual de agregados para a construção civil**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 432p.

ALVES, Flávia. InfoQuimica: **Corrosão**: um fenômeno químico. 2018. Disponível em:http://infoquimica2c.blogspot.com/2014/07/corrosao-um-fenomeno-quimico-de-ummodo_99.html. Acesso em: 17 mai. 2021.

ANDRADE, Maria Margarida de. **Introdução à Metodologia do Trabalho Científico**. 10ª ed. São Paulo: Atlas, 2010.

ARAUJO, A.; LOURENÇO, Z.; PANOSSIAN, Z. **Proteção catódica de estruturas de concreto**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, v.6, n.2, p. 178-193, abr. 2013.

ASSAHI, Paulo Nobuyoshi. **Sistema de Fôrma para Estruturas de Concreto**. Boletim Técnico. São Paulo: 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto** - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR 6.118 **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. NBR 14.931. **Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento**. 2004

BONADEU, Jefferson R. **Análise da penetração de cloretos no concreto armado expostos em ambiente natural e simulado**. 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

BRANDÃO, A. M. S; PINHEIRO, L. M. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado**: aspectos relativos ao projeto. Dissertação de Mestrado em Estruturas. n.8. EESC. USP. São Carlos. 1998.

CERVO, A. L. BERVIAN, P. A. **Metodologia científica**. 5.ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de concreto Armado**: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação. 2a Edição. Brasília - DF: UNB, 2008.

Controle da corrosão em estruturas de concreto armado. REFORMA FACIL, 2010. Disponível em: <<http://reforma Facil.com.br/produtos/concreto-produtos/controle-de-corrosao-em-estruturas-de-concreto-armado/>> Acesso em: 20/04/2021.

DUTRA, Aldo Cordeiro; NUNES, Laerce de Paula. **Proteção Catódica**: Técnica de Combate a Corrosão. 5. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 344 p.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UECE, 2002. Apostila.

FREITAS JUNIOR, José de Almendra. **Materiais de Construção**: Aditivos para concreto. 2013.

FURTADO, Paulo. **Introdução à corrosão e proteção das superfícies metálicas**. Belo Horizonte: UFMG, 1981.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1982. 453 p.

_____. **Corrosão**. LTC, 4º. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2003

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

_____. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GOMES, E.A. **Análise Comparativa da Resistência à Corrosão de Aços Carbono em Ensaios de Campo e Testes Eletroquímicos**. 2013.

informe síndico, Recuperação de estruturas de concreto. Disponível em: <informesindicoonline.com.br>. Acesso em: 31/10/2016.

INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION. Disponível em: www.zinc.org/. Acessado em 15 MAI. 2021.

JONES, Denny A. **Principles and prevention of corrosion**. 2. ed. Upeer Saddle River: Prentice-hall, 1996.

JÚNIOR, N. S.; PIRES, D. R. **Proteção Catódica: Uso no Concreto Armado**. 2018. 72 f. Trabalho (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, SC, 2018.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARANHÃO, George M. **Fôrmas para concreto**: subsídios para a otimização do projeto segundo a NBR 7190/97. São Carlos: USP, 2000.

MATIAS-PEREIRA, José. Manual de metodologia da pesquisa científica. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto**. Microestrutura, propriedades e materiais. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

MILITO, J. **Técnicas de construção civil e construção de edifícios**. Nota de aula. Faculdade de Ciências Tecnológicas da PU Campinas, 2004.

MINAYO, M. C. S. **O desafio do conhecimento**. Pesquisa qualitativa em saúde. São Paulo: HUCITEC, 2007.

MONGE, C.A. **Detectando a corrosão no concreto armado e protendido**. Revista Recuperar, Rio de Janeiro, ed.37, p. 12-17, set.- out. 2000.

MUNDO DA CONSTRUÇÃO: Cristo Redentor. Disponível em: <http://www.visitriodejaneiro.city/pt-br/>; <http://mundodaconstrucao.blogspot.com.br/2019/8/cristo-redentor.html>. com . Acesso em: 16 maio 2021.

NEPOMUCENO, A A.; **Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatacion y a la penetracion de cloruros em estructuras de hormigón armado danadas por corrosion de armaduras**. Estudio mediante la técnica de resistência de polarizacion. Madrid, 1992, 371, p. Universidad Politécnica de Madrid.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 450 p

NORMA SHRP. S 359. **“Strategic Highway Research Program - Criteria for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Elements”**, 1994.

OLIVEIRA, S. L. de. **Tratado de metodologia científica**: projetos de pesquisas, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses. 2. ed. São Paulo: Pioneira, 1999.

POLIT, D.F.; BECK, C.T.; HUNGLER, B.P. Fundamentos de **Pesquisa em Enfermagem**: métodos, avaliação e utilização. 5 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

PORTAL CIMM. O mecanismo de corrosão nos aços. 2018. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6346. Acesso em: 18 mai. 2021.

RODRIGUES, Joaquim Correia. **Ânodos de sacrifício para proteção catódica em estruturas de concreto armado**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

_____. A proteção catódica no concreto armado. **Revista Recuperar**, Rio de Janeiro, ed.37, p. 4-11, set.- out. 2000.

SKOOG, Douglas A. et al. **Fundamentos da química analítica**. [Fundamentals of analytical chemistry (Inglês)]. Tradução de Robson Mendes Matos, Revisão técnica de Celio Pasquini. 9 ed. São Paulo: 2015.

TARTUCE, T. J. A. **Métodos de pesquisa**. Fortaleza: UNICE – Ensino Superior, 2006. Apostila.

TRIVIÑOS, Augusto N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais**: a pesquisa qualitativa em educação. São Paulo: Atlas, 1987

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 2000.

VINÍCIUS ABBATE (São Paulo). **Téchne**: Proteção catódica contra a corrosão. 2003. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/77/artigo2852781.aspx>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

YAZIGI, W. **A técnica de edificar**. São Paulo. [S.I]: Editora Pini, 2004