

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITARIO DO RIO GRANDE DO NORTE
ENGENHARIA CIVIL

KLEYTON DE OLIVEIRA LIMA

**UTILIZAÇÃO DE PROTEÇÃO CATÓDICA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO LOCALIZADAS EM AMBIENTE MARINHO**

NATAL/RN

2019

KLEYTON DE OLIVEIRA LIMA

**UTILIZAÇÃO DE PROTEÇÃO CATÓDICA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO LOCALIZADAS EM AMBIENTE MARINHO**

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira.

NATAL/RN

2019

Catálogo na Publicação – Biblioteca do UNI-RN
Setor de Processos Técnicos

Lima, Kleyton de Oliveira.

Utilização de proteção catódica em estruturas de concreto armado localizadas em ambientes marinho. / Kleyton de Oliveira Lima. – Natal, 2019.

53f.

Orientador: Prof^o. PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira.

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário do Rio Grande do Norte.

1. Engenharia civil – Monografia. 2. Técnicas eletroquímicas – Monografia. 3. Proteção catódica – Monografia. 4. Concreto – Monografia. 5. Anodo de sacrifício – Monografia. 6. Corrosão – Monografia. I. Pereira, Fábio Sérgio da Costa. II. Título.

RN/UNI-RN/BC

CDU 624

KLEYTON DE OLIVEIRA LIMA

**UTILIZAÇÃO DE PROTEÇÃO CATÓDICA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO LOCALIZADAS EM AMBIENTE MARINHO**

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Fábio Sergio da Costa Pereira
Orientador – UNI-RN

Profa. Dra. Everlane Ferreira Moura
Avaliador Interno – UNI-RN

Profa. MSc. Anna Luiza Nobre Bezerra
Avaliador Externo - UFRN

Dedico este trabalho a meus pais, admiráveis em suas essências, que sempre me impulsionaram a buscar novas conquistas a cada dia. Minha gratidão por se privado de minha companhia em prol dos meus estudos, permitindo-me concluir mais esta etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me proporcionado, dentre tantas outras mais esta conquista.

A minha família, principalmente aos meus pais Kerginaldo Bezerra de Lima e Luiza de Oliveira Lima, por acreditarem e incentivarem as minhas escolhas, apoiando-me incondicionalmente e esforçando-se junto a mim para que eu chegasse a mais esta conquista.

Ao Professor e Coordenador do curso de Engenharia Civil Fábio Sérgio da Costa Pereira, por acreditar em meu potencial e me ajudar a desenvolver este trabalho.

As técnicas de Laboratório de Materiais e de Química Kamila Maia, por ter me ajudado a confeccionar e a colaborar com ideias para a criação dos moldes e amostras e a Ulana Tavares, por ter me ajudado na confecção da solução necessária para a pesquisa e por ser sempre prestativa.

Aos amigos que fiz na trajetória do Curso, que por muitas vezes nos motivam em tempos de dificuldade e compartilham momentos de felicidade, em especial a Carlos Frederico Bezerra Barreto, que acompanhou de perto toda a minha trajetória no curso, compartilhando felicidades, angústia, medo, frustrações e conquistas, além de ajudar no que fosse necessário para que eu não interrompesse o caminho que escolhi.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – O esquema do mecanismo de um ânodo de sacrifício	15
Figura 2 – Amostras de corpo de prova de concreto	17
Figura 3 – Corrosão eletroquímica em estruturas metálicas	20
Figura 4 – Corrosão química	21
Figura 5 – Corrosão total das armaduras	22
Figura 6 – Amostra submetida a solução de nitrato de prata a 1% com presença de cloretos.....	24
Figura 7 – Amostra submetida a solução de fenolftaleína a 1% com inexistência de carbonatação.....	25
Figura 8 – Lápis e Escala de pH	26
Figura 9 – Verificação de pH no concreto pelo papel peagâmetro	26
Figura 10 – Esquema da armadura protegida por pastilha.....	27
Figura 11 – Tela Galvânica.....	28
Figura 12 – Esquema de atuação da Vara Galvânica	29
Figura 13 – Aplicação de película de ZTP	30
Figura 14 – Pastilhas de proteção weber.guard galvashield XPT / XP2 / XP4.	33
Figura 15 – Pilar de Dali.....	34
Figura 16 – Cristo Redentor	35
Figura 17 – Recuperação de Colunas da Ponte San Leandro, Califórnia	36
Figura 18 – Detalhe da Aplicação de Ânodo de Sacrifício em pilar do J. J.Velodrome San Cristobal, Venezuela.....	36
Figura 19 – Detalhe da instalação de ânodos de sacrifício em pilares do Robert Moses Causeway Long Island, NY	37
Figura 20 – Instalação das fitas (A) e concretagem (B).....	37
Figura 21 – Aplicação da técnica de ZTP no reservatório de água da CAERN.....	38
Figura 22 – Vista do equipamento para aplicação da técnica de ZTP.....	39
Figura 23 – Molde para confecção do corpo de prova	40
Figura 24 – Amostras de concreto nos moldes secando	41
Figura 25 – Amostra de concreto com o envelopamento de alumínio.....	41
Figura 26 – Amostra de concreto sem o envelopamento de alumínio.....	42
Figura 27 – Amostras de concreto em solução de 2 mol/L.....	43
Figura 28 – Equipamento para aplicação da técnica de ZTP	43

Figura 29 – Amostras de concreto em solução de 2,0 mol/L.....	43
Figura 30 – Barras em ácido clorídrico a 0,05mol/L no início da análise.....	45
Figura 31 – Barras em ácido clorídrico a 0,05mol/L após dois meses.....	45
Figura 32 – Barras de aço logo depois de 1 mês em solução de 2,0 mol/L.....	46
Figura 33 – Amostras que apresentaram corrosão no interior do concreto.....	46
Quadro 1 – Exemplificação de custo para um pilar 40cm x 20cm com altura de 3 metros, com a utilização dos três tipos de protótipos.....	47
Quadro 2 – Exemplificação de custo para um Viga de 50cm x 20cm com altura de 5 metros, com a utilização dos três tipos de protótipos.....	48
Quadro 3 – Exemplificação de custo para uma laje 5m x 5m com espessura de 10cm, com a utilização dos três tipos de protótipos.....	48

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRACO	Associação Brasileira de Corrosão
CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
ENGEAL	Engenharia e Cálculos LTDA
HCl	Ácido Clorídrico
Mpa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
RN	Rio Grande do Norte
ZTP	Zinco Termo Projetado

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo mostrar a eficiência da utilização da proteção catódica na atenuação do efeito de contração causado pela corrosão por cloreto em armaduras de edificação utilizadas na construção civil. A preocupação com a corrosão é relevante quando se trata de proteção de armaduras em estruturas de concreto armado. As técnicas eletroquímicas são as mais recomendadas para este fim, tanto para evitar a corrosão prematura como para diminuir um processo corrosivo em curso. Tais técnicas são classificadas em proteção catódica galvânica por anodo de sacrifício e aquela feita por corrente impressa. As aplicações dessas técnicas já são uma realidade no que diz respeito às proteções em áreas náuticas e condutos para transporte de fluidos, no entanto na área da construção civil não se tem a cultura de execução destas técnicas. Mesmo edificações novas já deveriam contemplar em seus projetos esse tipo de prevenção, uma vez que o custo-benefício em longo prazo é muito mais vantajoso. A fim de provar tal afirmação, este trabalho realizou a verificação da proteção catódica em ensaios de laboratório. Foram submetidos a testes trinta corpos de prova contendo em seu interior uma barra de aço de 12,5mm de diâmetro. Todos foram expostos durante quinze meses a uma solução de ácido clorídrico, substância altamente agressiva ao concreto. Esta proteção garantiu um tempo de vida útil muito maior com inexistência de corrosão em contraste com aquelas estruturas que não a utilizaram. O custo final será um pouco mais elevado, mas não tão discrepante dos preços adotados pelo mercado. Assim, este trabalho vem demonstrar a eficácia da técnica aplicada em estruturas para a área da construção civil, bem como o seu melhor custo-benefício. Foram confeccionados protótipos de proteção catódica visando futuras aplicações em estruturas de concreto armado para o uso dos protótipos com custo em m² para utilização em pilares, vigas e lajes utilizando a pastilha galvânica respectivamente obteve-se o valor de 741,25 reais, 1008,10 reais e 28,44 reais, com a tela galvânica o valor do m² para pilares, vigas e lajes respectivamente de 2.668,40 reais, 2866,40 reais e 30,83reais e o do envelopamento o valor de 2,96 reais para barras com diâmetro de 12,5 com e 1 metro de comprimento.

Palavras-chave: Técnicas eletroquímicas. Proteção catódica. Concreto. Anodo de Sacrifício. Corrosão.

ABSTRACT

The present work aims to demonstrate the efficiency of using cathodic protection for contraction effects reduction due to chloride corrosion in building armors of construction industry. Concern with corrosion is relevant when it comes to armors protection of concrete structures. Eletrochemical structures are more recommended for this purpose both to prevent premature corrosion as to decrease an ongoing corrosive process. Such techniques are classified as galvanic cathodic protection and that one made by printed current. Application of cathodic protection is already seen in nautical industry and construction of conduits for fluid transportation. In construction industry, however, this technique still remains very little used. Even new buildings should already have in their projects such type of prevention, once long term cost benefit is much more effective. In order to prove these statements, this work performed the verification of cathodic protection in laboratory tests. Thirty specimens containing a 12,5mm steel bar inside each one have been submitted to tests for fifteen months. The specimens have been exposed to a hydrochloric acid solution, which is highly aggressive to concrete. This protection guaranteed a much longer lifespan whitout corrosion in contrast with those who do not use it. Final cost will be a little more high, but not so discrepant of prices adopted by the market. This work demonstrates the efficacy of the applied technique to construction industry structures, as well its better cost benefit, producing a maximum increase of about 0,5% up to 5% of the final total cost of the work. Prototypes of cathodic protection have been produced aiming future applications to reinforced concrete structures.

Keywords: Eletrochemical techniques. Cathodic protection. Anode of sacrifice Concrete. Corrosion.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 GERAL	15
2.2 ESPECÍFICO.....	15
3 JUSTIFICATIVA.....	16
4 METODOLOGIA	17
5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	18
6 CORROSÃO	19
6.1 TIPOS DE CORROSÃO.....	19
6.1.1 Corrosão eletroquímica.....	19
6.1.2 Corrosão Química.....	21
6.1.3 Corrosão eletrolítica.....	21
6.2 CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	22
7 AÇÕES AGRESSIVAS A ESTRUTURAS DE CONCRETO	23
7.1 IONS CLORETOS.....	23
7.2 CARBONATAÇÃO	24
7.3 POTENCIAL DE HIDROGÊNIO	26
8 PROTEÇÃO CATÓDICA GALVÂNICA E POR CORRENTE IMPRESSA.....	27
8.1 PASTILHA b h	27
8.2 TELA GALVÂNICA.....	28
8.3 VARA GALVÂNICA	28
8.4 ZINCO TERMO PROJETADO (ZTP)	29
8.5 POR CORRENTE IMPRESSA.....	30
9 INFORMAÇÕES SOBRE A PASTILHA GALVÂNICA DE ZINCO DE UM DOS FABRICANTES.....	31
10 APLICAÇÕES IN-LOCO DE PROTEÇÃO CATÓDICA.....	32
10.1 SEU PRIMEIRO RELATO DE USO	32
10.2 NO CRISTO REDENTOR	32
10.3 NO EXTERIOR.....	32
10.4 APLICAÇÕES NO RN	34
11 ESTUDO DE CASO: ENSAIOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO PARA A COMPROVAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA PROTEÇÃO CATÓDICA.....	42

12 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
13 CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS.....	47

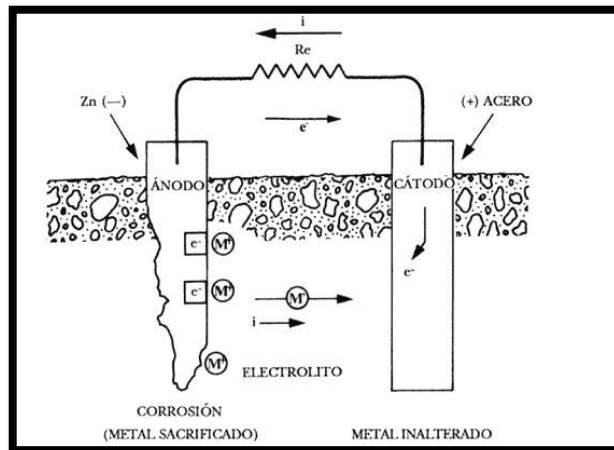
1 INTRODUÇÃO

Um fenômeno natural que ocorre aos metais quando são expostos ao meio ambiente é a corrosão, um processo eletroquímico que faz com que o metal tenda a voltar ao estado no qual se encontra em sua forma mais estável na natureza. O aço, indispensável na construção civil devido às suas propriedades, principalmente de grande resistência à tração, alia-se ao concreto compondo estruturas denominadas armaduras, utilizadas em lajes, pilares e vigas. Contudo mesmo com a proteção de recobrimento do concreto, o aço não está totalmente livre do processo químico de corrosão.

De acordo com Helene (2014, p. 1), no caso de armaduras em concreto, os efeitos degenerativos manifestam-se na forma de manchas superficiais causadas pelos produtos de corrosão, seguidas por fissuras, destacamento do concreto de cobrimento, redução da secção resistente das armaduras com frequente seccionamento de estribos, redução e eventual perda de aderência das armaduras principais, deteriorações estas que levam a um comprometimento da segurança estrutural ao longo do tempo.

A proteção Catódica, uma antiga técnica utilizada em séculos passados para retardar a corrosão das chapas de cobre que revestiam os cascos de madeira dos navios e hoje aplicada em tubulações enterradas, tais como oleodutos, plataformas de petróleo e tanques de armazenamento, também já é utilizada hoje na construção civil para a reabilitação de estruturas de concreto deterioradas pela corrosão. A proteção catódica controla a corrosão de uma superfície metálica, tornando-a o cátodo de uma célula eletroquímica. Um método simples de proteção aonde se conecta o metal a ser protegido a um “metal de sacrifício” mais facilmente corrosível para atuar como ânodo. O metal de sacrifício então é corroído no lugar do metal protegido, segundo a Figura 1.

Figura 1 – Esquema do mecanismo de um ânodo de sacrifício



Fonte: Biblioteca... (2018).

Há dois tipos de Proteção Catódica Galvânica: o ânodo de sacrifício que protege o aço através de uma corrente elétrica proveniente da força eletromotriz existente entre o metal a proteger e o metal escolhido para sacrifício, e a proteção catódica por corrente impressa, que se trata de uma corrente proveniente de uma fonte geradora de corrente contínua, tais como baterias, retificadores ou geradores.

Dentre as diversas formas de proteção catódica galvânica, a técnica utilizada nesse estudo é a tela galvânica, que promove a proteção do metal por corrente galvânica. Esta técnica permite a proteção de áreas metálicas maiores em relação às outras técnicas devido a utilização de chapas metálicas de tamanho variáveis revestindo a estrutura em sua totalidade. Nesta técnica o ativador eletroquímico ativará a argamassa do concreto de recuperação a ser aplicado sobre ela, favorecendo uma troca galvânica entre a tela e a armadura de forma constante e ininterrupta, impedindo assim o aço de ser corroído.

A aplicação desta técnica em novas construções implica em reduzir futuros custos, aumentando a vida útil das edificações. Neste trabalho a eficácia do sistema foi comprovada por testes acelerados em laboratório, submetendo amostras de concreto ao ácido clorídrico em uma concentração inicial de 0,02 mols e depois a 2 mols. Ao final têm-se como produto, um protótipo de ânodo de sacrifício de dimensões especificadas e custo adicional conhecido em obras para aplicação em estruturas de concreto armado como pilares, lajes e vigas.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Descrever a metodologia do sistema de proteção catódica para a realização de ensaio acelerado de íon cloreto e a sua utilização em estruturas de concreto armado, baseada em pesquisa bibliográfica especializada.

2.2 ESPECÍFICO

Apresentar as aplicações de proteção catódica executadas em estruturas de concreto armado no Rio Grande do Norte em reservatório na cidade de Macau, comprovar a eficiência da proteção em armaduras utilizadas na construção civil em exposição à concentração de íons cloretos em laboratório pelo período de quinze meses, confeccionar protótipos de ânodo de sacrifício de alumínio e apresentar um comparativo de custos das aplicações com e sem o sistema em pilares, vigas e lajes em estruturas de concreto armado.

3 JUSTIFICATIVA

Em virtude da problemática recorrente da corrosão nas estruturas de concreto armado mais observadas em cidades que possuem proximidade com áreas litorâneas, existe a necessidade de se aumentar a proteção contra os agentes agressivos que provocam a deterioração de tais estruturas de concreto, permitindo assim prolongar a sua vida útil. A proteção catódica se apresenta como o método mais viável devido à sua eficácia, no que concerne à proteção de armadura de aço.

O custo da corrosão em edificações é alarmante e tem sido uma preocupação frequente de todos os profissionais da área da construção civil, pelo que representa em termos de perdas de material, custos de manutenção e riscos de acidentes ocasionados por falhas de estrutura e equipamentos.

Em termos de investimento, se comparado ao preço total de uma obra, o custo da proteção catódica, quando devidamente projetado, ou seja, não acarretando perda de material por superdimensionamento, varia de 0,5 a 5% do investimento global, segundo técnicos de planejamento de fabricantes de proteção catódica, dependendo das premissas adotadas em seu dimensionamento, sua complexidade e sofisticação segundo técnicos do setor publicada na revista proteção e corrosão da ABRACO, por DIAS (2007).

Tal investimento em proteção aumenta consideravelmente a vida útil de uma edificação, além de diminuir a necessidade de manutenções feitas antes das habitualmente previstas, ou seja, antes dos cinco anos, assegurando desta forma que não existam gastos inesperados.

4 METODOLOGIA

Foi realizada inicialmente uma revisão bibliográfica a partir da análise de teses, artigos e monografias sobre o tema da proteção catódica na engenharia civil, com a finalidade de se obter o embasamento teórico para realização do ensaio do estudo de caso.

Para o referido ensaio foram confeccionados trinta corpos de prova semelhantes aos da imagem abaixo (Figura 2), com resistência de 20 Mpa para a averiguação da eficiência da proteção catódica. Foram feitos quinze corpos de prova de concreto com revestimento de alumínio em barras principais de 12.5 mm e outros quinze corpos de prova de concreto em barras principais de 12.5 mm sem a proteção de alumínio. Mensalmente foi analisada a ação da corrosão e a redução de diâmetro das armaduras com e sem revestimento de concreto após a ação de uma solução de HCl inicialmente de 0.05 Mol/L semelhante à concentração da água do mar durante nove meses. Posteriormente a concentração de HCl foi alterada para 2 Mol/L por seis meses para a obtenção de um resultado mais rápido.

Após verificações mensais da eficiência da proteção catódica, foi confeccionado protótipo de uma estrutura de concreto armado com ânodo de sacrifício composto de chapas de alumínio e realizada uma análise de custo da aplicação do ânodo de sacrifício de chapa de alumínio em pilares, vigas e lajes. Por ultimo foi calculado o aumento de custo para a execução de cada elemento estrutural com a adição da proteção catódica.

Figura 2 – Amostras de corpo de prova de concreto.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2018).

5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O documento está dividido em quatorze capítulos:

No primeiro capítulo, apresenta-se uma breve contextualização sobre o tema em discussão e em seguida é apresentado o projeto.

No segundo capítulo, são apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho.

No terceiro capítulo, são apresentadas as justificativas dos motivos para a escolha do tema a partir de uma problemática e a busca de uma solução possível e viável.

No quarto capítulo, é apresentada a metodologia, descrevendo-se de forma breve o método utilizado para a realização do trabalho.

No quinto capítulo, faz-se uma breve descrição de cada capítulo disposto no trabalho.

No sexto capítulo, faz-se uma revisão da literatura relacionada à área de corrosão, seus tipos e formas e como atuam no concreto armado, que é a base da problemática abordada no trabalho.

No sétimo capítulo, é feita uma revisão da literatura relacionada às ações de ensaios de patologia em concreto armado, tais como a presença de carbonatação, penetração de íons cloreto e a leitura do pH.

No oitavo capítulo, descreve-se uma revisão da literatura relacionada à proteção catódica e seus tipos.

No nono capítulo, são fornecidas as informações do fabricante sobre a pastilha de zinco.

No décimo capítulo, relatam-se algumas aplicações da proteção catódica no Brasil e no mundo.

No décimo primeiro capítulo, descreve todo processo do ensaio de comprovação da eficácia da proteção catódica.

No décimo segundo capítulo, relata os resultados obtidos do ensaio realizando em laboratório.

No décimo terceiro capítulo, explica-se projeto de confecção dos protótipos e os cálculos dos custos da chapa de alumínio e do excedente para aplicações em edificações novas.

No décimo quarto capítulo, são apresentadas as conclusões.

6 CORROSÃO

Corrosão é um termo químico bastante empregado no cotidiano para se referir ao processo de deterioração do material devido à ação química ou eletroquímica do meio ambiente, resultando na perda de massa do material.

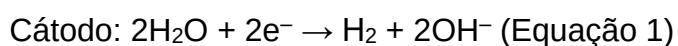
O processo de corrosão é espontâneo causado pela necessidade do material em atingir o seu estado de menor energia, que é o seu estado mais estável. A maioria dos metais são encontrados na natureza na forma de compostos, como óxidos e hidróxidos, já que nessa forma eles apresentam um estado mínimo de energia. Quando esses metais são processados, passam a adquirir o estado metálico, porém ao entrarem em contato com o meio ambiente, passam a reagir espontaneamente, se transformando em compostos, que apresenta um menos estado de energia, segundo GENTIL (2003)

6.1 TIPOS DE CORROSÃO

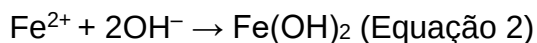
A corrosão pode ocorrer de três formas sobre o material, a química a eletroquímica, e a eletrolítica, as duas últimas são as que normalmente ocorrem nos metais segundo Fogaça (2018). Em seguida será mostrado o processo de como ocorre cada uma delas:

6.1.1 Corrosão eletroquímica:

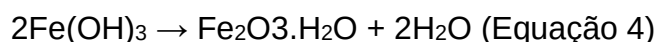
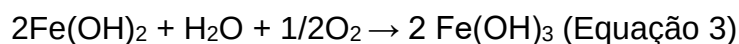
A corrosão eletroquímica (Figura 3) é o tipo de corrosão mais comum, pois é a que ocorre com os metais, geralmente na presença de um meio aquoso, ou seja, na presença de água (H₂O). Ela pode agir de duas formas principais: A primeira é quando o metal está em contato com um eletrólito (solução condutora ou condutor iônico, que envolve áreas anódicas e catódicas ao mesmo tempo), formando uma pilha de corrosão, Fogaça (2018). Abaixo apresenta uma exemplificação da equação química de como ocorre a reação, classificada como processo de redução:



Enquanto os cátions Fe^{2+} migram para o polo negativo (cátodo), os ânions OH^- migram para o polo positivo (Ânodo) e ocorre a formação do hidróxido ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$).



Na presença de oxigênio, esse composto é oxidado a hidróxido de ferro III ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), que depois perde água e se transforma no óxido de ferro (III) monohidratado ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), que é um composto que possui coloração castanho-avermelhada, isto é, a ferrugem que conhecemos:



Na equação quatro quando dois metais são ligados por um eletrólito, que por sua vez passa a formar uma pilha galvânica. Que pode ser feito quando é inserido uma placa de cobre e uma de ferro, ambas mergulhadas num eletrólito neutro aerado e postas em contato, formando um circuito elétrico, cada placa se tornará um eletrodo. O ferro (Fe) será o ânodo, oxidando-se e perdendo elétrons que migram para o cátodo (placa de cobre), que por sua vez, é reduzido. O ânodo sofrerá o desgaste com rompimento de suas ligações intermoleculares, precipitando a ferrugem no fundo do recipiente de acordo com Fogaça (2018).

Figura 3 – Corrosão eletroquímica em estruturas metálicas.



Fonte: Coutinho (2018).

6.1.2 Corrosão Química

É o ataque de algum agente químico diretamente sobre determinado material, que pode ou não ser um metal para sua reação não necessariamente é necessário a presença de água em sua forma líquida devido não haver a transferência de elétrons como na corrosão eletroquímica. Um exemplo claro desse tipo de corrosão é que os solventes ou agentes oxidantes podem quebrar as macromoléculas de polímeros (plásticos e borrachas), degradando-os. O ácido sulfúrico corrói o zinco metálico assim também como o revestimento do concreto armado de construções que podem sofrer corrosão com o passar do tempo devido a agentes poluentes como mostra logo abaixo na figura 4. Em sua constituição há silicatos, aluminatos de cálcio e óxido de ferro que são decompostos por ácidos, como mostrado na reação a seguir:



Figura 4 – Corrosão química.



Fonte: Fogaça (2018).

6.1.3 Corrosão eletrolítica

Esse processo não é espontâneo, ao contrário dos outros tipos de corrosão mencionados acima. Quando não há isolamento ou aterramento, ou estes estão com alguma deficiência, formam-se correntes de fuga, e quando elas escapam para o solo formam-se pequenos furos nas instalações. A seguir na (figura 5), mostra a corrosão que acontece em armaduras de concreto armado, que podem ser em vigas como no caso abaixo, assim como em pilares ou lajes.

Figura 5 – Corrosão total da armadura.



Fonte: Santos (2014).

6.2 COROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

A corrosão de armaduras em concreto, como lembra Cascudo (1997, p.39), é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, em que o eletrólito (concreto) apresenta características de resistividade elétrica consideravelmente mais altas do que as dos eletrólitos típicos, meio aquoso comum, não confinado em uma rede de poros, como é o caso do concreto.

“A armadura encontra-se no interior do concreto em meio altamente alcalino, pH em torno de 12.5. Esta alcalinidade provém da fase líquida constituinte dos poros do concreto, a qual, nas primeiras idades, basicamente é uma solução saturada de hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, chamado cimento Portland. Por outro lado, o concreto em idade avançada, permanece um composto alcalino, ao passo que neste caso a solução é composta de hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) originários dos álcalis do cimento.” (CASCUDO, 1997, p.39).

No interior do concreto o aço está protegido por uma camada passivadora que envolve o aço, esta camada é formada e mantida devido ao elevado pH na solução dos poros do concreto. Desta forma, para que haja corrosão é necessário que a camada passivadora seja destruída (despassivação). Agentes agressivos como os íons cloretos e a carbonatação podem promover a despassivação, deixando o aço susceptível ao processo corrosivo.

No concreto armado a corrosão é considerada eletroquímica, que ocorre em meio aquoso, necessita de um eletrólito, uma diferença de potencial, oxigênio e agentes agressivos. A corrosão afeta diretamente a durabilidade reduzindo desta forma a vida útil da estrutura. A deterioração de inúmeras obras devido à corrosão da armadura é um dos principais problemas associados à durabilidade do concreto e, tanto a gravidade do problema, como a frequência de ocorrência de corrosão da armadura, evidenciam a necessidade de buscar soluções que contribuam para minimizar a incidência e evolução do processo corrosivo nas estruturas de concreto Vieira (2003).

7 AÇÕES AGRESSIVAS A ESTRUTURAS DE CONCRETO

7.1 ÍONS CLORETOS

Segundo Silva (2018), a ação de íons cloretos nas estruturas de concreto. Além de severa, provoca a despassivação do aço muito mais rápido, bem como a corrosão localizada, com o surgimento de trincas e deslocamento do concreto. Nas regiões próximas ao mar as ações químicas dos cloretos são muito mais destrutivas do que a do sulfeto, embora igualmente provoquem a diminuição do pH do concreto.

Quanto à determinação da presença e inserção do íon Cloreto é comum fazer o uso do teste colorimétrico, que é identificada a partir da aspersão da solução de nitrato de prata sobre o testemunho de concreto, que revelará o grau de penetração de agentes deletérios ou produtos de reações nocivas, segundo Medeiros (2018). A coloração apresentada é de uma cor esbranquiçada para aquela que tiver a presença de cloretos e de cor marron para a região do concreto que não existir.

Logo abaixo na (Figura 6), mostra a realização de um exemplo desta identificação feita em um corpo de prova, na qual, claramente, percebe-se o grau de

penetração dos íons cloretos que agem da parte externa para interna chegando na região que se encontram as armaduras de aço.

Figura 6 – Amostra submetida à solução de nitrato de prata a 1% com presença de cloretos.



Fonte: Elaborado Pelo Autor (2018).

7.2 CARBONATAÇÃO

A carbonatação é um dos mecanismos mais correntes de deterioração do concreto armado. O dióxido de carbono presente no ar penetra nos poros do concreto e reage com o hidróxido de cálcio formando carbonato de cálcio e água. Este processo é acompanhado pela redução da alcalinidade do concreto, segundo REÚS (2015). Num concreto homogêneo, a carbonatação progride com a frente paralela à superfície quando a frente de carbonatação atravessa o recobrimento das armaduras, estas ficam despassivadas (devido à perda de alcalinidade), permitindo o início da sua corrosão (desde que existam água e oxigénio), comprometendo, deste modo, a durabilidade do concreto. A taxa de carbonatação depende de vários fatores, particularmente da permeabilidade do concreto (quanto mais permeável, maior será a taxa de carbonatação) e da umidade relativa (a carbonatação ocorre mais facilmente quando a umidade relativa se situa entre 55 e 75 por cento). Utilizando o indicador da fenolftaleína, é possível determinar in situ presença e a profundidade da frente de

carbonatação em superfícies recém-expostas segundo Polito (2006). Conhecendo a posição da frente de carbonatação em vários pontos de uma estrutura de concreto armado, é possível avaliar a sua durabilidade e estimar a extensão das zonas a reparar

O método para verificação consiste em evidenciar a diferença de pH entre o concreto e a frente de carbonatação por meio de aspersão de indicadores químicos. (Helene 1993). Pode-se verificar a profundidade, ou extensão, da carbonatação tratando-se, com solução aquosa-alcoólica de fenolftaleína a 1%, numa área recém-exposta do concreto (Figura 7). Quando não há carbonatação, aparece a coloração róseo-avermelhada, característica da fenolftaleína em meio fortemente alcalino; e se a área estiver carbonatada, permanecerá inalterada. Pode-se usar um algodão umedecido, com a solução de fenolftaleína, ou um frasco com spray, para contatar a área exposta em diferentes profundidades. A fenolftaleína apresenta coloração róseo-avermelhada com valores de pH iguais ou superiores a 9,5 aproximadamente e incolor abaixo desse valor. (GENTIL, 2003).

Figura 7 – Amostra submetida a solução de fenolftaleína a 1% com inexistência de carbonatação.



Fonte: Elaborado Pelo Autor (2018).

7.3 POTENCIAL DE HIDROGÊNIO

A leitura do pH pode ser feita por intermédio do Lápis Peagâmetro (Figura 8), sendo feitas verificações pontuais, exigindo apenas 0,001 mL de solução tamponada. O lápis pode ser usado em praticamente qualquer superfície, mesmo irregular, sendo eficaz em materiais porosos e sólidos impermeáveis.

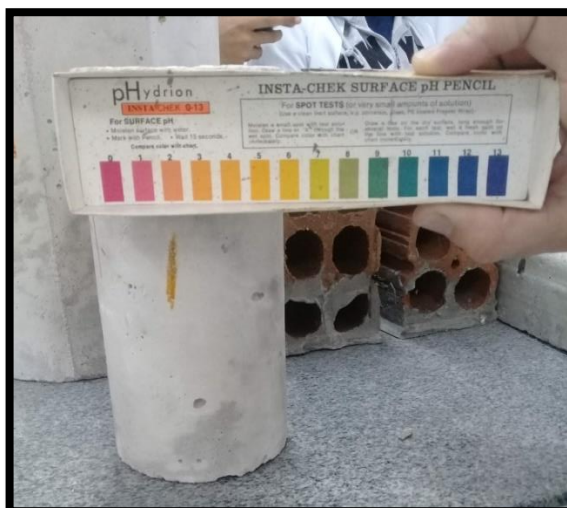
Para sua utilização a superfície molhada ou a área com água destilada e deve ser riscada com o lápis de pH. Após 30 segundos, compare a cor resultante com a tabela de cores. As marcações devem ser molhadas com água destilada para obter a cor correta no concreto em estudo (figura 9) e compara-se na escala de cores fornecida junto ao lápis que indica em uma escala de 0 a 13.

Figura 8 – Lápis e Escala de pH.



Fonte: Smallnhot (2018).

Figura 9 – Verificação de pH no concreto pelo papel peagâmetro.



Fonte: Elaborado Pelo Autor (2018).

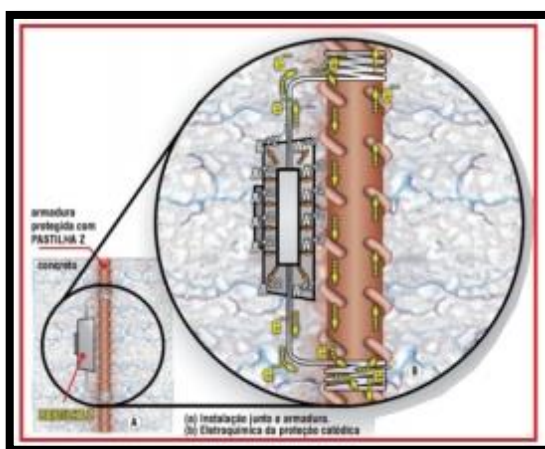
8 PROTEÇÃO CATÓDICA GALVÂNICA E POR CORRENTE IMPRESSA

Os anodos galvânicos, ou anodos de sacrifício, são normalmente os escolhidos quando se precisa de pouca quantidade de corrente para proteger a estrutura (revestimento de boa qualidade e estruturas de pequenas dimensões) e quando o solo possui baixa resistividade elétrica.

8.1 PASTILHA

A forma mais comum do anodo de sacrifício é a pastilha. Ela é composta por zinco, alumínio e índio ou só de zinco ou só de alumínio, ligada a dois fios para fixação no aço da estrutura e revestida por uma matriz cimentícia iônica condutiva. Para sua instalação é necessário apenas retirar a carepa de corrosão do aço através de limpeza com escova de aço ou com lixa de ferro número 100, analisando se o aço perdeu ou não 10% de sua seção, caso tenha perdido, será necessário fazer um reforço com nova(s) barra(s) com o mesmo diâmetro da barra inicial. O importante é fazer excelente limpeza nos pontos onde a pastilhas serão ligadas a armadura, pois necessita-se de um perfeito contato metálico para possibilitar a passagens de elétrons. Uma vez interligada, ocorrerá o processo de oxi-redução, onde a pastilha será o anodo e o aço o catodo (Figura 10), de acordo com Andrade (2014).

Figura 10 – Esquema da armadura protegida por pastilha.

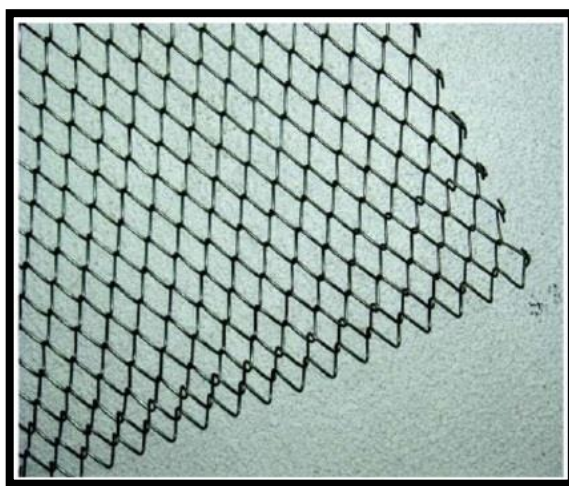


Fonte: Andrade, 2014

8.2 TELA GALVÂNICA

A melhor solução contra a corrosão de armaduras em grandes áreas de estruturas de concreto armado é a tela galvânica (Figura 11) sendo uma proteção catódica por corrente galvânica que lhe dá o melhor custo-benefício em uma obra de recuperação motivada por corrosão. Garante um tempo superior a dez anos contra qualquer processo de corrosão. Com uma semi-pilha comum faz-se teste dos potenciais de corrosão antes da instalação da tela e os potenciais de proteção (zona de imunidade) após sua instalação. O uso do ativador eletroquímico ativa a argamassa ou concreto de recuperação a ser aplicado sobre ela, favorecendo uma troca galvânica entre a tela e a armadura, de forma constante e ininterrupta, impedindo o aço de corroer, segundo a Rogetec (2017).

Figura 11 – Tela Galvânica



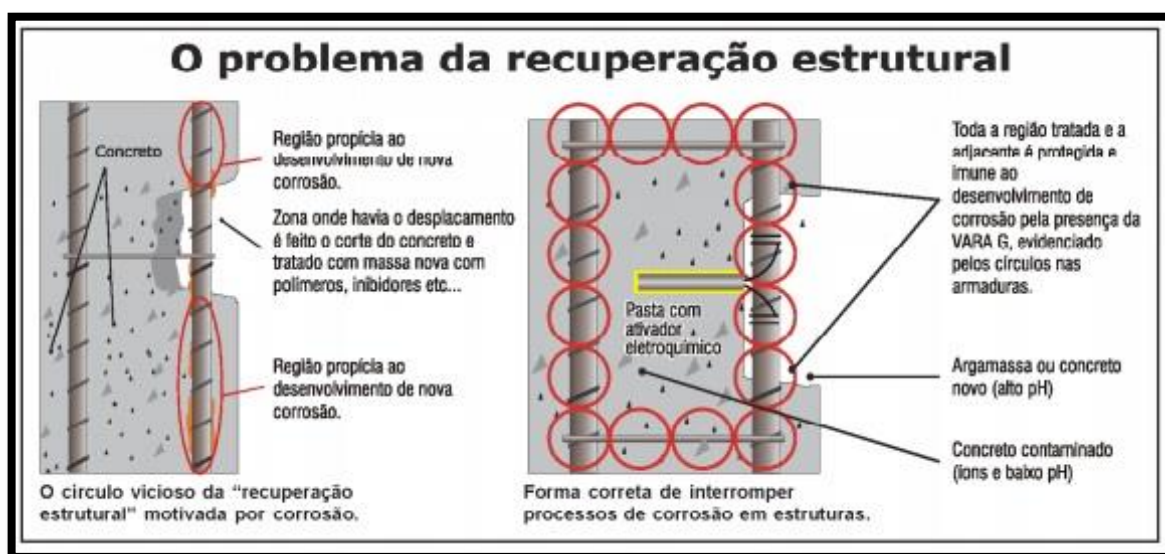
Fonte: Rogertec (2017).

8.3 VARA GALVÂNICA

A técnica da vara galvânica é utilizada quando ao realizar a medição de corrosão do aço com semi-pilha de cobre e sulfato de cobre e fazendo a ligação da linha equipotenciais, na qual podendo ver pontos do concreto que está em estado de corrosão, mas ainda não entrou em processo de deterioração. Na qual o processo para aplicação é perfurar o concreto de forma inclinada vertendo-o dentro com pasta de cimento contendo ativador eletroquímico para baixar a resistividade e facilitar a troca iônica com o aço estrutural para o anodo, inserindo a vara no concreto fazendo

a amarração na armação, e com essa técnica (Figura 12) estará prevenindo que o concreto entre em estado de ruína, pois mesmo que tenha iniciado o processo de corrosão mais não ao ponto de expandir suficiente para danificar o concreto, evitando deste modo, que exista a necessidade de recuperação de estrutura, segundo a Rogetec (2017).

Figura 12 – Esquema de atuação da Vara Galvânica

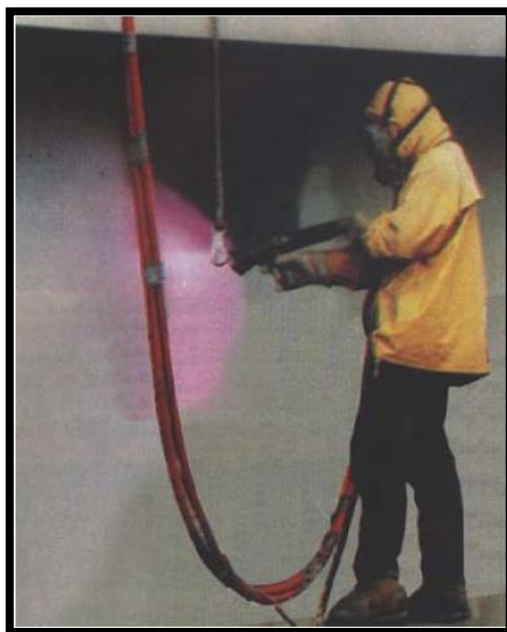


Fonte: Rogetec (2017).

8.4 ZINCO TERMO PROJETADO (ZTP)

O ZTP consiste na projeção térmica de zinco puro sobre a superfície do concreto em direção as armaduras (Figura 13) que necessitam de proteção contra a corrosão. Todo o serviço de recuperação da estrutura estará simplificado porque após a remoção do concreto deteriorado, e execução do reforço estrutural (se necessário), faz-se uma limpeza da área a ser recuperada e logo após aplica-se o zinco termo projetado com um gerador/retificador e uma pistola especial que provoca a fusão de dois fios de puro zinco ao mesmo tempo em que um jato de ar comprimido projeta o zinco derretido sobre a superfície do concreto. Então o zinco, funciona como anodo de sacrifício garantindo a proteção das armaduras.

Figura 13 – Aplicação de película de ZTP



Fonte: Rocha (2000, p. 15).

8.5 POR CORRENTE IMPRESSA

O sistema de proteção catódica por corrente impressa é aquele que utiliza uma força eletromotriz, proveniente de uma fonte de corrente contínua, para imprimir a corrente necessária à proteção da estrutura considerada. Esta força eletromotriz pode provir de baterias convencionais, baterias solares, termogeradores, conjuntos motor-gerador ou retificadores de corrente. Os retificadores constituem a fonte mais frequentemente utilizada, e através deles retifica-se uma corrente alternada, obtendo-se uma corrente contínua que é injetada no circuito de proteção.

Como a diferença de potência de saída da fonte pode ser estipulada em valores baixos ou elevados, a proteção catódica por corrente impressa aplica-se a estruturas situadas em eletrólitos de baixa, média e alta resistividade. Também ela é aplicada onde se exige maiores correntes, portanto, em estruturas de média para grande porte o que não impede o seu uso em estruturas pequenas, quando houver conveniência Segundo TRABALHO EXPERIMENTAL (2017).

Os equipamentos e materiais comumente empregados nos sistemas por corrente impressa são:

- Os retificadores, que podem ser de silício ou selênio, refrigeradores a ar ou a óleo, com alimentação monofásica ou trifásica;

- Como alternativas aos retificadores, podem ser usadas baterias solares, termogeradores, baterias convencionais, empregada onde não haja energia elétrica em corrente alternada. Esses geradores, em geral, são de baixa potência, sendo, portanto restritos a locais de pouca exigência de corrente.
- Os ânodos mais empregados são os de grafite, ferro-silício, ferro-silício-cromo, chumbo-antimônio-prata, titânio platinizado, nióbio platinizado e magnetita. Os ânodos de grafite, ferro-silício e magnetita são geralmente usados em solos e os demais usados em água do mar.
- Os cabos para interligação dos ânodos e ligação na estrutura devem ser cabos de cobre com capacidade de condução adequada ao sistema e com isolamento de boa qualidade, em geral de polietileno de alta densidade e alto peso molecular.

9 INFORMAÇÕES SOBRE A PASTILHA GALVÂNICA DE ZINCO DE UM DOS FABRICANTES

O produto utilizado como base de comparação para a elaboração e dimensionamento da pastilha de alumínio para este trabalho, que possui um alto desempenho na prevenção e/ou controle da corrosão em estruturas de concreto armado foi o da weber.guard galvashield XP4, que são unidades de proteção galvanicas que é feita por um ânodo de sacrificio de zinco puro, encapsulado num material alcalino de elevada condutividade elétrica com fios condutivos para a fixação e contato com as armaduras da estrutura.

Sua proteção contra a corrosão funciona a partir do zinco que possui uma maior eletronegatividade em relação ao aço, o zinco torna-se o material mais adequado dentre os elementos químicos. O zinco inicia o processo de óxido-redução antes do aço, evitando a inversão de polaridade pelos diferentes materiais utilizados no procedimento de recuperação estrutural. Desta forma, protege as armaduras e evita a deterioração dos elementos estruturais ampliando consideravelmente a vida útil das estruturas de concreto armado.

O produto apresenta diversas utilidades, o uso em obras novas, em reparos localizados ou generalizados, superficiais ou profundas para prevenção ou controle da corrosão, é extremamente eficiente para estruturas localizadas em ambientes cuja agressividade se caracteriza pela alta concentração de cloretos, sendo Ideal para ambientes sujeitos à agressividade característica pela presença de íons cloretos como em estruturas de concreto armado em ambientes marinhos, edifícios à beira-mar, píeres, cais e ancoradouros, indústrias de papel e celulose e indústrias químicas.

Possui vantagens como a maior durabilidade das estruturas de concreto armado ou protendido, fácil instalação, relação custo/benefício da intervenção, redução dos custos de manutenção, possibilidade de controle do desempenho, não necessitando de fonte externa de energia para o monitoramento, apresentando um aumento de 10 a 20 anos da vida útil da estrutura.

A Instalação os ânodos weber.guard galvashield XP4, segundo o fabricante imediatamente para a recuperação é feita após o preparo da área, Instalação dos ânodos a partir das extremidades do reparo para proteger não somente a área reparada mas também as áreas adjacentes. Deve-se evitar o efeito de inversão da

ilha de corrosão nestas regiões. Amarra-se as unidades diretamente nas armaduras utilizando seus arames de fixação. Garantindo o contato elétrico e a restrição ao movimento.

Constatando-se a necessidade, execute um trabalho adicional de escarificação durante o posicionamento da unidade. Assegurando ter espaço suficiente para o completo cobrimento do ânodo, o cobrimento mínimo deve ser de 20 mm sempre verificando a continuidade elétrica entre as armaduras da área exposta e, caso necessário, providenciar a continuidade com arames de aço. O valor da condutividade encontrada deve ser entre 0 e 1 ohm

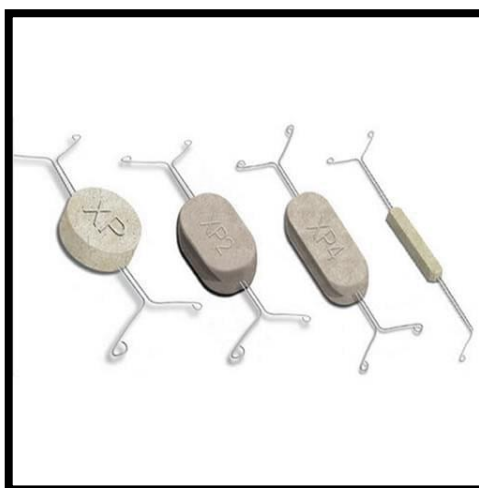
Figura 14 - Dimensionamento das pastilhas de proteção weber.guard galvashield

Produtos	Classe do ânodo*	Dimensão do ânodo (nominal)	Massa de zinco (g):
weber.guard galvashield XPT	Tipo AP	25mm x 125mm x 25mm	60
weber.guard galvashield XP2	Tipo AC	65mm x 80mm x 30mm	100
weber.guard galvashield XP4	Tipo AC	65mm x 120mm x 30mm	160

* AP: A - Método de ativação (álcali) / P: Prevenção de corrosão
AC: A - Método de ativação (álcali) / C: Controle de corrosão

Fonte: Weber (2015)

Figura 15 – Pastilhas de proteção weber.guard galvashield XPT / XP2 / XP4.



Fonte: Weber (2015)

10 APLICAÇÕES IN-LOCO DE PROTEÇÃO CATÓDICA

10.1 SEU PRIMEIRO RELATO DE USO

Antigas estruturas de ferro não tinham tanto problema com a corrosão, e isto é explicado pela quantidade da atmosfera nos últimos séculos, ocorrendo àquela conhecida película de óxido nas superfícies, que efetivamente, protegia contra o aumento da ferrugem. Uma antiga estrutura de Déli (Figura 16), conhecida como coluna sagrada, foi totalmente feita a mão a partir de um afloramento da rocha de minério de ferro, isto em 410D.C. A atmosfera limpa e pura dos séculos seguintes não causou qualquer problema nesta maravilha, muito embora pouco abaixo do nível do solo, mudando ao longo dos séculos haja presença de pites de corrosão. Uma amostra desta estrutura, feita com 99,7% de puro ferro foi enviada para Inglaterra e, resumindo pouco resta devido a quantidade do ar naquela ilha.

No século XVIII, efetivamente, chegou-se mais uma vez à conclusão de que o ferro e, principalmente o aço, deveriam ser protegidos contra a corrosão. Nesta época exatamente em 1822, surgem os primeiros relatórios técnicos modernos sobre a ferrugem e proteção catódica propondo-se a usar chumbo vermelho (Zarcão) para pintar as estruturas metálicas, a partir do ano de 1885, segundo Mundi (2019).

Figura 16 – Pilar de Déli.



Fonte: Magnus Mundi (2019),

10.2 NO CRISTO REDENTOR

Para garantir a melhor conservação do monumento, foi utilizada a tecnologia que é utilizada na extração de petróleo e na construção de navios. Uma tela de titânio doada pela empresa norte-americana Corpro Inc. revestiu todo o interior da estátua, trata-se da proteção catódica, fundamental para a conservação do monumento, pois combate um poderoso inimigo: o sal.

A argamassa que forma o Cristo (Figura 17) é uma eficiente mistura de areia, açúcar e óleo de baleia. Comum à época da sua construção, a composição carrega também um componente muito agressivo: o cloreto de sódio. Ao longo dos anos, o sal da argamassa estava oxidando a estrutura metálica que sustenta o concreto.

A proteção catódica entra em ação quando a tela é eletrificada. Ela ganha carga positiva e atrai as partículas de cloreto de sódio que são negativas. Dessa forma, a estrutura metálica que sustenta a estátua fica livre da ação desse agente corrosivo, que passa a se alojar em torno da proteção catódica, segundo VISIT RIO DE JANEIRO CITY (2017)

Figura 17 – Cristo Redentor



Fonte: Visit... (2017).

10.3 NO EXTERIOR

A aplicação das técnicas de proteção são bem mais utilizadas como no caso da ponte San Leandro na Califórnia (Figura 18), que foi realizada uma recuperação

dos pilares, assim como foi utilizada no velódromo San Cristóbal (Figura 19), aplicando ânodos galvânicos embutidos para reparação de concreto. Outra aplicação nos EUA foi a ponte de Long Island. (Figura 20) na qual foi utilizado o sistema de proteção galvânica para pilares de concreto em ambiente marinho e em Portugal no porto Aveiro foi instalado a proteção (Figura 21) nas zonas de maré e de respingos da viga frontal do cais, considerada de maior risco de corrosão devido a proximidade com a água.

Figura 18 – Recuperação de colunas da ponte San Leandro, Califórnia.



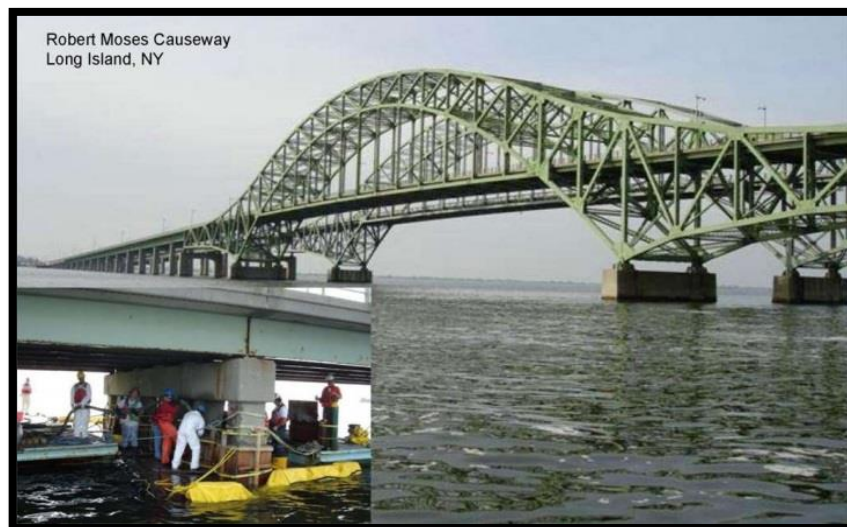
Fonte: Whitmore (2013).

Figura 19 – Detalhe da aplicação de ânodo de sacrifício em pilar do J. J. Velodrome San Cristobal, Venezuela



Fonte: Galvashield (2013).

Figura 20 – Detalhe da instalação de ânodos de sacrifício em pilares do Robert Moses Causeway Long Island, NY



Fonte: Galvanode (2013).

Figura 21 – Instalação das fitas e concretagem.



Fonte: Araújo, Panossian e Lourenço (2013).

Legenda: Em (A) Instalação das Fitas e (B) Concretagem.

10.4 APLICAÇÕES NO RN

A aplicação em estruturas de concreto armado no Rio Grande do Norte foi mais uma vez pioneira no Brasil. O caso onde foi aplicada a proteção catódica através do ZTP foi um reservatório apoiado com capacidade de 1.700 m³ e constituído de duas câmaras iguais, de propriedade da Companhia de Águas e Esgotos do RN (CAERN). O reservatório fica localizado na cidade de Macau-RN, que tem como característica estar situada numa região litorânea produtora de sal e, conseqüentemente, com alto grau de salinidade no meio ambiente. Internamente a agressividade na estrutura de cobertura era ainda mais intensa em decorrência da evaporação de ar com alto teor de cloretos proveniente do tratamento d'água por cloração diretamente no reservatório. Embora a proposição inicial da ENGEAL, fosse a recuperação pelo processo tradicional de hidro jateamento e aplicação de concreto projetado, houve posterior opção para executar os serviços com a aplicação de uma película de zinco termo projetado, seguida da aplicação de uma pintura protetora de epóxi, devido a agressividade do ambiente citada anteriormente segundo Pereira (2002).

Figura 22 – Aplicação da técnica de ZTP no reservatório de água da CAERN



Fonte: PEREIRA (2002).

Figura 23 – Vista do equipamento para aplicação da técnica de ZTP



Fonte: PEREIRA (2002).

Podendo concluir que as aplicações em estrutura de concreto armado e protendido são em sua maioria galvânica e ZPT, as aplicações de corrente impressa, remoção de cloreto e realcalinização de concreto inexistem no Brasil.

11 ESTUDO DE CASO: ENSAIOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO PARA A COMPROVAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA PROTEÇÃO CATÓDICA

Seguindo a NBR 6118:2014, que para a elaboração dos moldes com as medidas adequadas para a confecção da amostra do concreto (Figura 24), para resistir a uma classe de agressividade ambiental de exposição de grau II, elaborou-se o traço do concreto com as medidas de cimento, areia e brita em quilogramas e a água em litros, respectivamente com os valores 1: 3,01: 3,19: 0,85 multiplicados por 1,5 para aumentar o volume do traço de forma proporcional. Obtém-se assim os valores de 1,5: 4,515: 4,785: 1,275 para a confecção dos corpos de prova (Figura 26), com o intuito de averiguar a eficiência da proteção catódica. Foram confeccionados 30 corpos de prova de concreto, todos utilizando em seu interior barras de aço do tipo CA-50 com dimensões de 12,5 mm de diâmetro com 08 cm de comprimento, sendo que das 30 amostras produzidas, 15 delas foram confeccionadas com barras de ferro revestidas em sua totalidade com chapas de alumínio puro com espessura de 0,7mm (Figura 25) e 15 corpos de prova sem esse revestimento em seu interior. Posteriormente, foram submetidos à cura por 28 dias para não perder umidade e simular de forma equivalente ao método aplicado em obras.

Figura 24 – Molde para confecção do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 25 – Barra de ferro de 12,5 e chapa de alumínio 0,7 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 26 – Amostras de concreto nos moldes secando.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Todos os 30 corpos de prova foram colocados em dois recipientes, separando apenas entre 15 amostras que continha o ferro envelopado com o alumínio e 15 que não continha a barra com a proteção, sendo que todos foram submersos em solução de HCl na concentração de 0,05 mol/L, semelhante à concentração salina da água do mar tendo como base a informação segundo (Grauss, 2010 p. 51). Foram analisadas mensalmente a verificação de carbonatação, a penetração de íons cloreto e a existência de corrosão nas barras de aço. Uma amostra por mês era retirada de cada recipiente, rompidas e submetidas à verificação da existência ou não de

carbonatação, aplicando-se uma solução de fenolftaleína na área superficial da amostra, na qual apresenta uma coloração rósea em caso de ausência de carbonatação. A penetração de íon cloretos foi verificada de acordo com a variação de coloração depois de se aplicar solução de nitrato de prata, produzindo uma coloração esbranquiçada nos locais onde havia cloretos e marrom nas áreas onde não havia (Figuras 28 e 29). Na sequência se fez a remoção total da barra contida no concreto e foi analisado se havia sinais de corrosão em toda a sua superfície. Em seguida a barra foi submersa em um recipiente com solução de HCl na concentração de 0,05 mol/L, na qual a reação de corrosão é feita diretamente sobre o aço. Após nove meses não foi identificada nenhuma presença de corrosão nas barras de aço que estavam no interior do concreto, tanto naquelas cujo aço foi envelopado pela chapa, como naquelas que não a continham.

Figura 27 - Ensaio de carbonatação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 28 – Amostra de concreto com o envelopamento de alumínio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

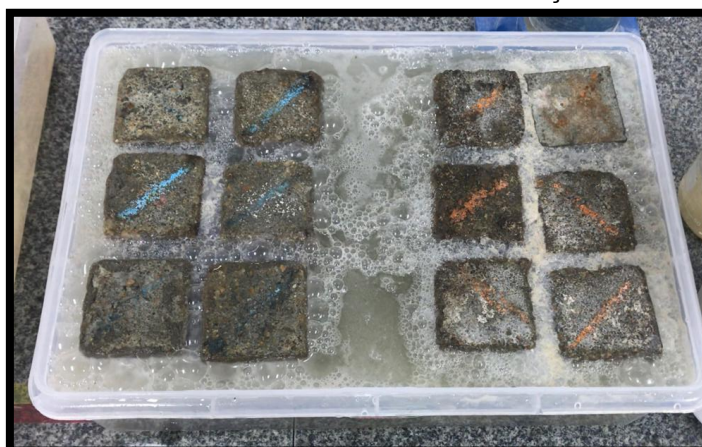
Figura 29 – Amostra de concreto sem o envelopamento de alumínio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Após o intervalo de nove meses sem identificar corrosão nas barras de aço que estavam inseridas no concreto, seis das quinze amostras ainda restantes de cada tipo foram submetidas novamente à submersão por um período de seis meses em solução de HCl, porém com uma mudança na concentração de 0,05 mol/L para 2 mol/L (Figura 30). Nesta etapa foi analisada apenas um par de amostras por mês no que diz respeito à presença ou não do processo corrosivo nas barras diante de uma concentração maior da solução.

Figura 30 – Amostras de concreto em solução de 2,0 mol/L.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

12 RESULTADOS

A partir das análises realizadas no laboratório de materiais, tais como a inserção do íon cloreto no concreto, a carbonatação e a ocorrência de corrosão nas barras de aço contidas no interior das amostras de concreto, foi verificado que as amostras de aço com o envelopamento de alumínio submetidas a uma solução de HCl a 0,05 mol/L não apresentaram ocorrência de corrosão. Entretanto, aquelas que não possuíam o envelopamento de alumínio quando foram submetidas ao recipiente com a solução de HCl a 0,05 mol/L já apresentavam sinais do processo corrosivo em toda a superfície das barras logo na segunda semana de testes, ao fim do segundo mês apresentando uma corrosão em toda sua superfície (Figura 31 e 32).

Figura 31 – Barras em ácido clorídrico a 0,05mol/L no início da análise.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

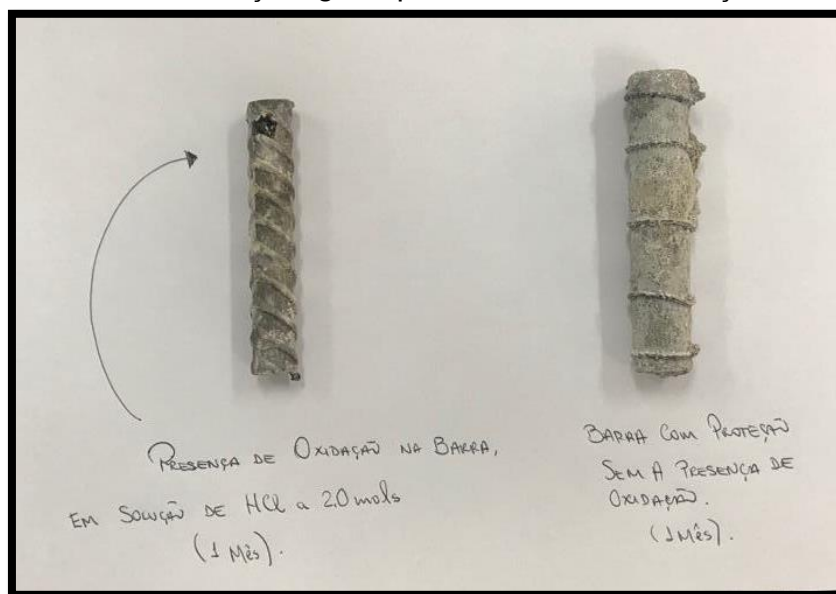
Figura 32 – Barras em ácido clorídrico a 0,05mol/L após dois meses.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

As últimas seis amostras de concreto que foram submetidas ao ácido à 2 mol/L em todas as suas barras que não estavam envelopadas com a proteção catódica que encontravam-se em seu interior apresentaram uma área superficial de corrosão (Figuras 32 e 33).

Figura 32 – Barras de aço logo depois de 1 mês em solução de 2,0 mol/L.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 33 – Amostras que apresentaram corrosão no interior do concreto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

13 PROTÓTIPOS DE ÂNODO DE SACRIFÍCIO

Ao fim do teste em laboratório com a comprovação da eficiência devido aos seus resultados, viu-se a possibilidade de elaboração de três produtos, todos por proteção galvânica nas armaduras: uma pastilha galvânica confeccionada de alumínio puro que é utilizada inserido nas armaduras de aço, que irá atuar protegendo uma área de trinta centímetros onde a pastilha for aplicada ao longo da armadura, uma tela galvânica totalmente de alumínio que é para proteção do pilar, viga ou laje onde sua ação é feita de forma exposta protegendo diretamente a ações químicas e a por envelopamento galvânico de barra de aço, que em sua composição, para assim como os outros, só contém alumínio em sua composição, para proteção por envelopamento do aço das armaduras principais com o intuito de agir como ânodo de sacrifício prolongando a vida útil do aço.

Figura 34 – Pastilha Galvânica de Alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 35 – Envelopamento Galvânico de Alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 36 – Tela Galvânica de Alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

À seguir nas tabelas abaixo há exemplos de dimensionamento utilizando os três produtos, para um pilar retangular de 40cm x 20cm com 3 metros de altura e que utilize quatro barras principais de aço com 12,5 de diâmetro, um para uma viga de 50 cm x 20 cm com o comprimento de 5 metros e uma laje de 6 metros de comprimento por 6 metros de largura em vão livre.

Quadro 01 – Exemplificação de custo para um pilar 40cm x 20cm com altura de 3 metros, com a utilização dos três tipos de protótipos.

Tipo	Dimensionamento (mm)	Área de Proteção	Unidades do produto	Valor unitário	Valor final (em reais)
Pastilha Galvânica	50mm x 50mm x 25mm	30 cm	10 unid.	5,93 R\$	59,30 R\$
Tela galvânica	400mm x 200 mm x 1000mm	Região de contato	3 unid.	71,16 R\$	213,50 R\$
Envelopament o Galvânico	50mm X 3000 mm x 0,7mm	Região de contato	4 unid.	8,90 R\$	35,60 R\$

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Quadro 02 – Exemplificação de custo para um Viga de 50cm x 20cm com altura de 5 metros, com a utilização dos três tipos de protótipos

Tipo	Dimensionamento (mm)	Área de Proteção	Unidades do produto	Valor unitário	Valor final (em reais)
Pastilha Galvânica	50mm x 50mm x 25mm	30 cm	17 unid.	5,93 R\$	100,81 R\$
Tela galvânica	400mm x 200 mm x 1000mm	Região de contato	4 unid.	71,16 R\$	286,64 R\$
Envelopamento Galvânico	50mm X 5000 mm x 0,7mm	Região de contato	4 unid.	14,85 R\$	59,40 R\$

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Quadro 03 – Exemplificação de custo para uma laje 5m x 5m com espessura de 10cm, com a utilização dos três tipos de protótipos

Tipo	Dimensionamento (mm)	Área de Proteção	Unidades do produto	Valor unitário	Valor final (em reais)
Pastilha Galvânica	50mm x 50mm x 25mm	30 cm	120 unid.	5,93 R\$	711,6 R\$
Tela galvânica	1000mm x 1000 mm x 0,7 mm	Região de contato	13 unid.	59,30 R\$	770,90 R\$
Envelopamento Galvânico	50mm X 3000 mm x 0,7mm	Região de contato	20 unid.	8,90 R\$	178,00 R\$

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A base de cálculo de custo para chegar a estes valores foi feita uma media a partir da pesquisa de mercado nacional e regional da chapa de alumínio bobina com espessura de 0,7 mm chegando ao valor de 1m² a 59,30 reais.

14 CONCLUSÕES

A técnica de proteção catódica pelo método galvânico, como podemos perceber pelos resultados apresentados são perfeitamente aplicáveis em obras da construção civil, atuando como uma forma de proteção e prevenção a fim de se evitar a deterioração prematura das estruturas de concreto armado e prolongar o seu tempo de vida útil. Assim, sua utilização também se justificaria em serviços de recuperação e reforço estrutural que necessitam de um aumento da durabilidade de seus componentes estruturais de 10 a 20 anos, principalmente em locais como as classes de agressividade III e IV prescritas na NBR 6118.

O consequente aumento da durabilidade destes materiais tornaria também assim extremamente vantajoso o seu uso do ponto de vista econômico devido aos benefícios proporcionados em longo prazo.

No Brasil estas técnicas infelizmente ainda não são vistas por muitos profissionais da construção civil como recursos viáveis, já que a princípio gerariam custos adicionais ao orçamento da obra em execução, pensamento adotado equivocadamente em nosso país por empresas privadas e órgãos públicos em geral.

Para o uso dos protótipos o custo em m² para utilização em pilares utilizando a pastilha galvânica obteve-se o valor de 741,25 reais , com a tela galvânica o valor do m² obtido foi de 2.668,75 reais e o do envelopamento o valor de 2,96 reais com barras com diâmetro de 12,5 com 1 metro de comprimento. Para vigas utilizando a pastilha galvânica tem o valor de 1008,10 reais, com a tela galvânica o valor do m² é de 2.668,40 reais e o do envelopamento o valor de 2,96 reais com barras com diâmetro de 12,5 com 1 metro de comprimento. E para Lajes utilizando a pastilha galvânica tem o valor de 28,44 reais, com a tela galvânica o valor do m² é de 30,83 reais e o do envelopamento o valor de 2,96 reais com barras com diâmetro de 12,5 com 1 metro de comprimento.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, S. **Você realmente sabe como atua a proteção catódica no concreto armado/protendido?**. São Paulo: IPT, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BIBLIOTECA DIGITAL DEL ILCE. Disponível em: <bibliotecadigital.ilce.edu.mx>. Acesso em: 24 set. 2018.

CASCUDO, O. **O controle da Corrosão de Armaduras de Concreto**. 1ª ed. Goiania: PINI e UFG, 1997.

DIAS, H. A. Proteção Catódica: Produção Aquecida. **Corrosão e Proteção**: Especial Proteção Catódica, p. 8-14, jan./fev. 201 n 7.

FOGAÇA, J. **"Tipos de Corrosão"; Brasil Escola**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/tipos-corrosao.htm>>. Acesso em 15 de novembro de 2018.

GALVASHIELD. **XP embedded galvanic anodes for concrete repair**. San Cristobal, 2013.

GALVANODE. **Galvanic potection system for concrete piles in marine environment**. New York, 2013.

GRAUSS, C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. Santa Maria, 2010.

GENTIL, V. **CORROSÃO**. Guanabara Dois, Rio de janeiro. 4ª. ed: 2003

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 231 f. 1993, São Paulo. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola

Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e método de análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

MEDEIROS, M. H. F.; RÉUS, G. C.; PONTES, C. V. **Nitrato de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica**. 3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (3º SPPC), artigo 3SPPC1017, pp. 186 – 197, 2018. DOI: 10.4322/2526-7248.017.

MAGNUS MUNDI. Disponível em: < <https://www.magnusmundi.com/pilar-de-ferro-de-deli-na-india/>>. Acesso em: 24 de mar. 2019.

PEREIRA, F.S.C. Aplicação de ZTP na recuperação e reforço de estruturas de concreto armado. In: 44º Congresso Brasileiro do concreto, Minas Gerais, 2002.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. 2016. 191 f. Monografia (Especialização - Avaliação e Perícia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RÉUS, G. C. et al. Aplicação de Soluções Alcalinas para Realcalinização de Concretos Carbonatados: Uma Alternativa para Pontes de Concreto Armado. **57º Congresso Brasileiro do Concreto**, Foz do Iguaçu, 2015.

ROCHA, Carlos Carvalho. ZTP Protege Barragens: Zinco termo projetado (ZTP) mostra ser a melhor barreira de proteção contra a surgência de corrosão nas comportas metálicas de barragens. **Recuperar: Patologia da construção**, p. 12-16, jan./fev. 2000.

ROGERTEC. **Tela Galvânica G**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017.

ROSEMARY COUTINHO. Disponível em: <<https://opintorconsultoria.com/o-que-e-corrosao-eletroquimica/>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

SILVA, P. N. R. Disponível em: < <https://www.axfiber.com.br/single-post/2017/01/12/Ataque-em-estruturas-de-concreto-por-a%C3%A7%C3%A3o-de-cloretos>> acesso em: 10 out. 2018.

SANTOS, T. **Corrosão das Armaduras do Betão Armado Causas, Consequências, Prevenção e Projeto de Durabilidade.** Lisboa, 2014.

SMALLNHOT. Disponível em: <<http://www.smallnhot.com/2014/11/how-to-use-ph-pen-for-ph-test-ft-dettol-ph-balanced-bodywash.html>> acesso em: 11 nov. 2018.

TRABALHO EXPERIMENTAL: Proteção Catódica. Disponível em: <www.dfq.pucminas.br/apostilas/eng_quimica/quimica_pratica15.doc>. Acesso em: 10 jul. 2017.

VISIT RIO DE JANEIRO CITY. **Uma cidade com tantas atrações.** Disponível em: <<http://www.visitriodejaneiro.city/pt-br/>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa. Tese de doutorado.** Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2003, 242 p.

WEBER. **Ânodo de proteção galvânica para estruturas de concreto armado.** Jandira, 2015.

WHITMORE, D. **Proteção galvânica contra corrosão em estruturas de concreto.** São Paulo, 2013.