



André Luiz Rech Mota

**Modelo Computacional para Dimensionamento
de Sistemas de Proteção Catódica Galvânico
para Combate da Corrosão em Estruturas de
Concreto Armado**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Luiz Carlos Wrobel

Rio de Janeiro
Abril de 2022



André Luiz Rech Mota

**Modelo Computacional para Dimensionamento
de Sistemas de Proteção Catódica Galvânico
para Combate da Corrosão em Estruturas de
Concreto Armado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Luiz Carlos Wrobel

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC – Rio

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC – Rio

Prof. Simone Louise Delarue Cezar Brasil

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e dos orientadores.

André Luiz Rech Mota

Graduou-se em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Geraldo di Biase (2018). Durante a graduação foi monitor da disciplina de Isostática. Autor do livro Descomplicando a Isostática, ISBN 978-85-54815-48-6 Ingressou na pós-graduação no ano de 2020.

Ficha Catalográfica

Mota, André Luiz Rech

Modelo computacional para dimensionamento de sistema de proteção catódica galvânico para combate da corrosão em estruturas de concreto armado / André Luiz Rech Mota ; orientador: Luiz Carlos Wrobel. – 2022.

75 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2022.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Proteção catódica. 3. Corrosão. 4. Corrente impressa. 5. Anodo de sacrifício. I. Wrobel, Luiz Carlos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD:

624

Aos meus queridos pais Fernando e Tania,
meu irmão Antonio e minha esposa Camila.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as oportunidades que Ele me deu para que eu pudesse ingressar no curso de mestrado da PUC, pelas pessoas que colocou em meu caminho, e por nunca me abandonar.

Agradeço ao meu orientador e professor Luiz Carlos Wrobel, que é a minha maior referência no tema desta pesquisa e a quem eu tive a oportunidade de conhecer mais, aprender muito e me inspirar. Os anos em que escrevi essa dissertação foram repletos de dificuldades e limitações acadêmicas, mas o professor Wrobel jamais deixou que isso prejudicasse o andamento de nossa pesquisa.

Agradeço ao professor Luiz Fernando Martha, que é minha inspiração desde a graduação e que foi um dos maiores motivos para meu ingresso no curso de mestrado da PUC.

Agradeço a minha noiva Camila Dias, que aceitou o desafio e as restrições que um curso de mestrado exige, e foi a minha fortaleza e porto seguro durante todo o curso.

Agradeço aos meus pais Fernando Mota e Tania Rech, ao meu irmão Antonio Mota, todo esforço e dedicação, a educação e sabedoria que me deram, as quais me permitiram chegar até aqui. Obrigado a todos os meus familiares, meus avós, tios e tias e amigos pelo apoio.

Agradeço em especial a secretária da pós-graduação Luana, e os meus amigos do curso de mestrado Ana Waldila, Osmar Amaral, Carlos Castro, Felipe Bacelar, Mohara Nascimento, Gabrielle Martins, que me deram um apoio irrestrito, e que sem eles não seria possível a minha conclusão.

Agradeço também ao professor Marco Antonio da Silva e a engenheira Patrícia Carla da Cunha por acreditarem em mim e darem as cartas de recomendação. Ao engenheiro Gustavo Lacerda pela apresentação do tema e apoio total à pesquisa.

Agradeço ao Engenheiro Luiz Paulo Gomes e a IEC Engenharia e Instalações por todo apoio prestado durante a pesquisa e por todo o conhecimento repassado em diversas trocas de e-mails.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de formação e fomento à pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Mota, André Luiz Rech; Wrobel, Luiz Carlos (Orientador); Modelo Computacional para Dimensionamento de Sistemas de Proteção Catódica Galvânico para Combate da Corrosão em Estruturas de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 2022. 75 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A corrosão é a patologia mais recorrente no concreto armado, responsável por custos elevados na recuperação das estruturas afetadas. Além dos custos diretos como os materiais utilizados na recuperação, a mão de obra especializada, substituição de peças ou equipamentos afetados, existem os custos indiretos como a paralização da utilização da estrutura, mobilização de moradores em caso de edificações residenciais, perda de produção em caso de edificação industriais, entre outros. Encontrar e apresentar meios para o combate e a prevenção da corrosão é de extrema importância. A proteção catódica tem se apresentado nas últimas décadas como uma forma eficaz de combate a corrosão, não só paralisando o processo corrosivo totalmente, mas também prevenindo o surgimento de novos pontos. Seu uso vem sendo aplicado cada vez mais em estruturas de concreto armado, como pontes, cais, edifícios industriais e residenciais e túneis. Diversos materiais vêm sendo testados e aprovados, possibilitando a flexibilização e a adaptação do melhor sistema para cada estrutura. Relatos de casos com uso da proteção catódica tem mostrado a sua eficácia mesmo depois de anos de instalação. Essa dissertação apresenta a proteção catódica, seus sistemas de uso, casos em que foi instalada, um experimento com proteção catódica por corrente impressa para a restauração de uma ferramenta de aço, além de um modelo computacional desenvolvido para o dimensionamento de anodos galvânicos para estruturas de concreto armado.

Palavras-chave:

Proteção Catódica; Corrosão; Corrente Impressa; Anodo de Sacrifício.

Abstract

Mota, André Luiz Rech; Wrobel, Luiz Carlos (Advisor); Computer System for Dimensioning and Verification of Galvanic Cathodic Protection Systems to Combat Corrosion in Reinforced Concrete Structures. Rio de Janeiro, 2022. 75 p. Master Thesis – Department of Civil and Environmental Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

Corrosion is the most recurrent pathology in reinforced concrete, responsible for high costs in the recovery of affected structures. In addition to direct costs such as materials used in the recovery, specialized labor, replacement of affected parts or equipment, there are indirect costs such as the interruption of use of the structure, mobilization of residents in case of residential buildings, loss of production in case of industrial buildings, among others. Finding and introducing means to combat and prevent corrosion is extremely important. Cathodic protection has been presented in the last decades as an effective way to combat the corrosion, as it not only paralyzes the corrosive process completely, but also preventing the combat to new points. Its use has been increasingly applied in structures such as bridges, industrial and residential buildings, and tunnels. Various materials have been tested and approved, adaptation system for flexibility and adaptation to better each structure. Case reports with the use of cathodic protection have had attention even after years of installation. This dissertation presents cathodic protection, its systems of use, cases in which it was installed, an experiment with cathodic protection by impressed current for the restoration of a steel tool, as well as a computational model developed for the design of galvanic anodes for reinforced concrete structures.

Keywords:

Cathodic Protection; Corrosion; Impressed Current; Sacrificial anode.

Sumário

1. Introdução	13
2. Proteção Catódica	15
2.1 Princípios básicos da proteção catódica	15
2.2 Aplicação da proteção catódica	17
2.2.1 Proteção catódica por corrente impressa (PCCI)	19
2.2.2 Proteção catódica por anodo de sacrifício (PCAS)	21
2.3 Critérios para o uso e escolha da proteção catódica	24
2.3.1 O uso da proteção catódica como prevenção	24
2.3.2 O uso de proteção catódica como recuperação	29
2.4 Pesquisa feita com estudantes e profissionais da área da construção civil sobre corrosão e proteção catódica	30
3 Experimento de recuperação de uma talhadeira usando proteção catódica por corrente impressa	34
3.1 Materiais e Métodos	34
3.2 Resultados	36
3.3 Conclusões	38
4. Dimensionamento dos sistemas de proteção catódica	39
4.1 Dimensionamento da proteção catódica por anodos galvânicos	39
4.1.1 Cálculo de corrente elétrica de proteção	39
4.1.2 Cálculos de resistência por anodo galvânico	42
4.1.3 Cálculo de vida dos anodo galvânico	44
4.1.4 Cálculo da vida dos anodos inertes	45
4.2 Dimensionamento da proteção catódica por corrente impressa	46
4.3 Dimensionamento usando o Método dos Elementos de Contorno (MEC)	47
4.3.1 Condições de contorno	48
4.3.2 Aplicações do MEC	49
5 Estudo de casos sobre o uso de proteção catódica na recuperação estrutural de estruturas de concreto armado	51

5.1 Levantamento de dados da estrutura a ser protegida	51
5.2 Material da estrutura a ser protegida	51
5.3 Dimensões, geometria e características da estrutura em análise	52
5.4 Detalhamento da armadura (em cm)	53
5.5 Medições e testes de campo	53
5.6 Os métodos de resistividade elétrica	54
5.7 Cálculo da corrente elétrica de proteção	55
5.8 Cálculo da massa dos anodos galvânicos	55
5.9 Número de anodos	56
5.10 Verificação da corrente liberada pelos anodos	58
5.11 Distribuição dos anodos na estrutura	58
5.12 Análise dos resultados	59
5.13 Exemplo prático de cálculo de proteção catódica por corrente impressa	60
6 Sistema Computacional GCPCalculator	62
6.1 Layout e funcionalidades	62
6.2 Discussão	67
6.2.1 Dimensionamento de um pilar usando o GCPCalculator	67
6.3 Conclusão	70
7. Conclusões e sugestões de novos estudos	72
8. Referências	74

Lista de Figuras

Figura 1 – Princípio da proteção catódica do aço em concreto [7].	16
Figura 2 – Curva de polarização para reações anódicas e catódicas [6].	18
Figura 3 – Proteção catódica por corrente impressa	20
Figura 4 – “Pastilhas Z” de Zinco (Dimensões 80 mm x 90 mm x 30 mm)	21
Figura 5 – Condutividade <i>versus</i> teor de fibra de carbono para sistemas de argamassa	25
Figura 6 – (a) Recipiente de plástico e pilhas em série; (b) Talhadeira enferrujada (Cátodo) e Palha de aço (anodo); (c) Sistema instalado; (d) Esquema de instalação do Sistema de PC.	35
Figura 7 - (a) Início do processo; (b) Tempo percorrido: 10 minutos; (c) Tempo percorrido: 30 minutos (d) Tempo percorrido: 60 minutos; Tempo percorrido: 1 hora e 30 minutos; (f) Tempo percorrido: 3 horas e 30 minutos	35
Figura 8 – (a) Final do processo;(b) Retirada do material recuperado do recipiente; (c) e (d) Limpeza com água corrente e escova de aço	36
Figura 9 – Talhadeira após o experimento usando a proteção catódica por corrente impressa.	36
Figura 10 – Antes e depois da talhadeira.	37
Figura 11 – Talhadeira 1 ano após o experimento.	37
Figura 12 – Fotos do pilar P6 em estudo.	51
Figura 13 – Foto da localização do pilar em estudo.	52
Figura 14 – Detalhamento na armadura do pilar em estudo.	53
Figura 15 – Layout do GCPCalculator para o cálculo da corrente elétrica necessária (I_{req}) e quantidade de anodos galvânicos em kg.	63

Figura 16 – Layout da calculadora auxiliar para dimensionamento da área de aço a ser protegida.	64
Figura 17 – Layout do informativo sobre Resistividade Elétrica e Densidade de Corrente de Proteção.	65
Figura 18 – Layout do informativo sobre Fator de Correção de Velocidade (F).	65
Figura 19 – Layout do informativo sobre Eficiência do Revestimento (E).	66
Figura 20 – Layout do informativo sobre Tempo de Vida Útil.	66
Figura 21 – Pilar em estudo.	67
Figura 22 – Cálculo da área na calculadora auxiliar do GCPCalculator	68
Figura 23 – Resultados obtidos no GCPCalculator	68

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Série galvânica prática.	22
Tabela 2 – Composição química típica para anodos galvânicos (% em peso).	23
Tabela 3 – Aplicações típicas dos anodos galvânicos.	23
Tabela 4 – Propriedades das fibras de carbono.	26
Tabela 5 – Fator de correção da velocidade (F)	41
Tabela 6 – Eficiência médias de diversos tipos de revestimentos	41
Tabela 7 – Principais características dos anodos galvânicos	43
Tabela 8 – Características dos anodos inertes	45
Tabela 9 – Resistividade do Concreto / Indicação de Probabilidade de Corrosão	54

1

Introdução

A corrosão no concreto armado é reconhecida como a principal causa da deterioração prematura neste tipo de estrutura [1, 2], responsável por cerca de US\$ 2,5 trilhões de dólares em prejuízo global no ano de 2013 [3, 4]. Um relatório do Governo dos Estados Unidos, de 1993, afirmou que 44% das mais de 500.000 pontes eram estruturalmente deficientes, tendo assim, um custo inevitável com manutenção, reabilitação e substituição de pontes [5]. Por isso estudar formas para combater e prevenir a corrosão torna-se um assunto relevante.

A corrosão é definida como a destruição ou deterioração do material devido à reação eletroquímica com seu ambiente [6]. A corrosão no concreto armado ocorre pelo processo da *carbonatação*, quando o gás carbônico (CO_2) penetra no concreto e entra em contato com a água, formando o ácido carbônico (H_2CO_3) que por sua vez, reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), formando o carbonato de cálcio (CaCO_3), ou pelo processo de *contaminação por íons de cloretos (Cl^-)*, que ocorre principalmente quando a estrutura está exposta à névoa salina ou à água do mar e seus respingos. Nesse caso, os íons de cloreto (Cl^-) penetram a camada de cobrimento de concreto e a concentração atinge um nível crítico, desencadeando o processo corrosivo. Como efeito da corrosão há uma expansão no aço, causando tensões de tração na cobertura de concreto circundante ocorrendo rachaduras, lascas ou delaminações [5]. Normalmente, o concreto fissurado é reparado com concreto novo, sem alcalinos e sem cloretos. No entanto, se os íons cloreto permanecerem, a corrosão poderá recomeçar, o que pode, em um curto espaço de tempo, causar novos danos ao concreto. Além disso, é importante ressaltar que o diâmetro da barra de aço pode diminuir abaixo dos valores estruturalmente aceitáveis, afetando o comportamento e a resistência da estrutura. [7].

Em diversos lugares do mundo, como o Reino Unido [8] e, sobretudo na América do Norte [3], a proteção catódica (PC) tem sido adotada para reparo em estruturas de concreto armado afetadas pela corrosão e como prevenção em novas estruturas [8]. Na Itália, esta técnica encontrou sua aplicação principal em novas construções protendidas submetidas à contaminação por cloretos [9].

A proteção catódica é uma técnica de reparo eletroquímico, que funciona através da passagem de uma pequena corrente elétrica para o aço, por meio de um anodo de sacrifício ou por corrente impressa, protegendo-o de uma maior deterioração e aumentando os íons hidroxila localmente [2]. A proteção catódica utiliza as propriedades eletroquímicas dos metais para garantir que a superfície a ser protegida se torne o cátodo de uma pilha eletroquímica[6].

Diversos fatores influenciam na decisão do sistema a ser utilizado (por anodo de sacrifício ou por corrente impressa), como a condição da estrutura (nível de deterioração), o custo, a expectativa de vida útil da estrutura após o reparo, a qualidade do concreto, grau de carbonatação e quantidade de cloreto. Diversos materiais são testados e empregados, como chapa de malha de titânio com óxidos de metais nobres, ligas de zinco, alumínio, e recentemente, devido a boa estabilidade química [2][6].

A aplicação de uma densidade de corrente adequada para garantir a proteção suficiente nas áreas críticas a serem protegidas é essencial para um custo eficiente de consumo de energia, e sem superproteção para evitar despesas desnecessárias e o potencial efeito negativo da produção de hidrogênio devido às reações catódicas ativas no vergalhão [2].

Nessa dissertação, serão apresentados os sistemas de proteção catódica, casos em que foram utilizados diferentes tipos de anodos e sistemas de corrente impressa para proteção de diversos tipos de estruturas, seus resultados e dados sobre a opinião de estudantes e profissionais da área da construção civil através de uma revisão bibliográfica e entrevistas, além de uma experimento realizado para recuperação de uma ferramenta de aço utilizando proteção catódica por corrente impressa e o desenvolvimento de um modelo computacional para o dimensionamento de anodos galvânicos para estruturas de concreto armado.

2

Proteção Catódica

2.1

Princípios básicos da proteção catódica

A proteção catódica (PC), começou a ser empregada pela indústria naval, protegendo chapas de cobre que revestiam os cascos de madeira dos navios da época, por Sir Humphry Davy, na Inglaterra, em 1824 [6]. Já em estruturas de concreto armado, os primeiros relatos de seu uso são nos Estados Unidos na década de 70, em decks de pontes que sofriam corrosão devido à penetração do sal por degelo. Na década seguinte, novos materiais foram disponibilizados como anodos e a PC foi aplicada em outras estruturas, como edifícios, túneis e subestruturas de pontes. As experiências mundiais mostram que este sistema previne mais danos de maneira viável e econômica por um longo tempo [7]. No Brasil, o início efetivo da utilização proteção catódica se deu por volta de 1966, em estrutura metálica na construção do Terminal de São Sebastião – SP, da Petrobras [6][10].

A proteção catódica é baseada na alteração do potencial do aço para valores mais negativos, que reduz a diferença de potencial entre os locais anódicos e catódicos, essa redução de potencial é chamada de polarização, fenômeno que tende a reduzir a atividade das pilhas de corrosão [7]. No sistema de proteção catódica por anodos galvânicos, o fluxo de corrente se dá através do eletrólito, da área anódica para a área catódica, o retorno da corrente se processa por intermédio do circuito externo, constituído do metal e o eletrólito, que nesse estudo será considerado o concreto armado. Essa reação envolve íons positivos do metal nas áreas anódicas e consequentemente, íons negativos existentes na superfície metálica, resultando no produto de corrosão [10]. Já no sistema de proteção catódica por corrente impressa, o fluxo de corrente se dá através de uma fonte externa.

O sistema de proteção catódica é aplicado para fazer com que toda a superfície de instalação metálica, enterrada ou submersa, adquira um comportamento catódico, não sofrendo ataque corrosivo, ficando completamente protegida. O valor

da diferença do potencial na interface depende da natureza da solução e do eletrodo [6].

Em alguns casos, também pode ser realizado adicionando um eletrodo externo, o anodo, na superfície do concreto, conectando-o ao terminal positivo de uma fonte de corrente contínua de baixa tensão, enquanto conecta o terminal negativo à armadura, conforme a Figura 1 [7].

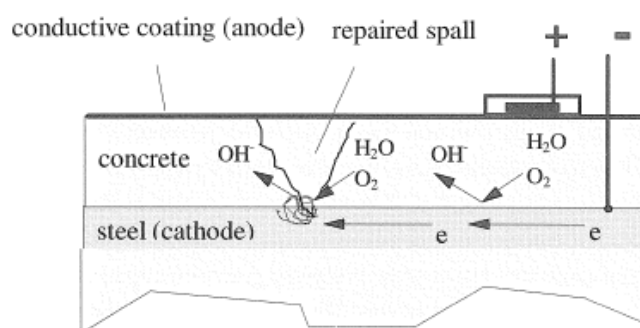


Figura 1- Princípio da proteção catódica do aço em concreto (com ânodo de revestimento condutor). [7].

Através da armadura, os elétrons fluem para a interface aço/concreto, aumentando a reação catódica, que produz íons hidroxila de oxigênio e água, e os íons hidroxila migram através da cobertura de concreto para o anodo, onde são oxidados. Os elétrons fluem para a fonte de corrente, que fecha o circuito elétrico. Como resultado dessa circulação, as reações catódicas no aço são ativas e a reação anódica é suprimida [7].

Densidades de corrente relativamente moderadas são capazes de restaurar a passivação e tem vários efeitos químicos benéficos: a produção de íons hidróxila no aço o que aumenta o pH; migração de íons cloreto para o anodo, longe do aço carregado negativamente. A polarização requerida faz da PC um método permanente, pois a corrente deve fluir durante a vida útil da estrutura.

Os possíveis efeitos negativos da PC são: degradação do concreto ao redor do anodo, que é significativo apenas em altas densidades de corrente; e polarização negativa muito forte do aço[7].

A proteção catódica foi incorporada principalmente para reparos em concretos como forma de reabilitar a deterioração das estruturas com níveis variados de contaminação, no entanto, tem sido implementada como prevenção

para combater os efeitos da corrosão como em túneis, portos, cais, edifícios industriais e residenciais e estruturas marinhas [8].

Os dois principais sistemas de tipos de proteção catódica são: Proteção Catódica por Corrente Impressa (PCCI), e a Proteção Catódica por Anodo de Sacrifício (PCAS). A decisão sobre qual é o melhor sistema é influenciado por vários fatores, como a condição da estrutura, custo, expectativa de vida útil para a estrutura, local onde se encontra, entre outros.

2.2

Aplicação da Proteção catódica

O projeto de um sistema prático de proteção catódica deve ser realizado de estrutura a estrutura. Cada uma apresenta suas particularidades como a composição do concreto, sua geometria, seu cobrimento, exposição à umidade e teor de cloretos. É feito um projeto básico, especificando cada um desses elementos, além da geometria do anodo a ser aplicado, a configuração elétrica, os eletrodos de referência e procedimentos de monitoramento. Os tipos de anodos mais utilizados são revestimentos de superfície, eletrodos de titânio ativado, magnésio, zinco, e alumínio [6] [7] [10].

Um sistema de PC pode ser dividido em zonas, cada uma com sua própria fonte de corrente (transformador / retificador), se a resistividade do concreto diferir significativamente da estrutura devido a diferenças na composição do concreto ou na exposição à umidade e cloreto. Pode ser necessário um número de camadas e divisão em zonas para obter uma distribuição de corrente suficientemente uniforme. Os eletrodos de referência são colocados em locais típicos. Os procedimentos de monitoramento incluem a frequência das medições e testes adicionais, como medições de distribuição de corrente.

Na fase de execução, são verificados os resultados da investigação preliminar. A superfície do concreto é preparada para fornecer uma adesão durável a revestimentos ou sobreposições. O anodo é aplicado e conexões elétricas, fios, eletrodos de referência e transformadores/retificadores são instalados. Se ocorrer curto-circuito, eles devem ser corrigidos. Após todo o processo, a corrente é ligada e observada para ajustar aos valores que fornecem proteção, se os resultados forem

satisfatórios, a manutenção habitual começa. Atualmente é possível adotar sistemas de controle remoto que fornecem dados aos registradores. No entanto, todo sistema deve ser inspecionado visualmente uma vez por ano para verificar a integridade das peças e para garantir que não haja danos por corrosão no concreto. Um relatório é feito para provar ao cliente que seu investimento em um sistema de PC mantém a estrutura em boas condições [7].

Wrobel (2002) [6], apresenta que a relação entre densidade de potencial e corrente é geralmente descrita por uma curva não linear, conhecida como curva de polarização. A Figura 2 representa esquematicamente a curva de polarização para reações anódicas e catódicas. A curva A caracteriza a relação potencial eletroquímico (U) - densidade de corrente (J) da reação de oxidação do metal no eletrólito dado, com o potencial de equilíbrio relacionado U_a . A curva C representa uma relação semelhante para a equação de redução, com o potencial de equilíbrio relacionado U_c . A curva global G é a soma das reações elementares (anódicas e catódicas) que surgem no metal. O potencial de corrosão U_{corr} está relacionado à corrosão natural do metal em determinada corrente J_{corr} . Este potencial é alcançado quando todas as zonas anódicas e catódicas estão em curto-circuito. A Figura 2 também mostra que se o potencial for menor que U_a , por exemplo U_p , a reação anódica é proibida e o metal atua como cátodo sob uma corrente protetora J_p .

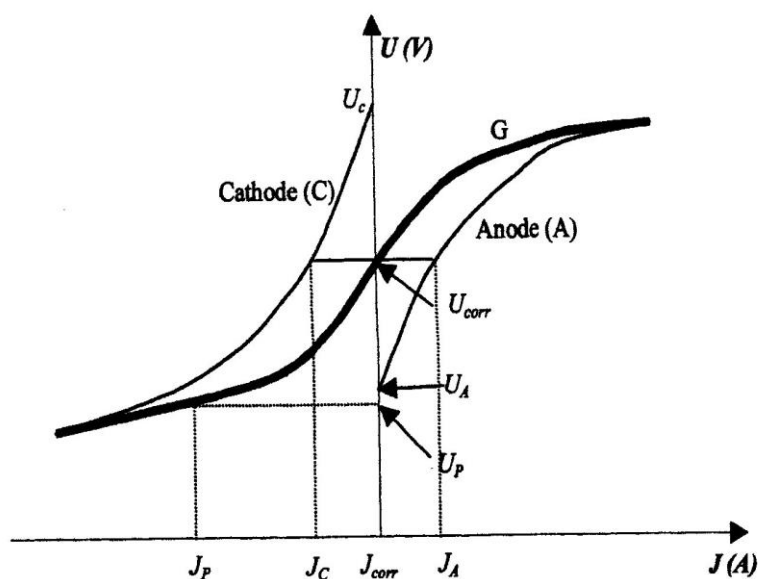


Figura 2 - Curva de polarização para reações anódicas e catódicas [6].

O potencial real usado em sistemas de proteção catódica depende da aplicação. Por exemplo, para aço enterrado, o critério de potencial de proteção estabelecido é - 0,85 V em relação a um eletrodo de cobre/sulfato de cobre. Em solos anaeróbios ou águas contendo bactérias redutoras de sulfato, o potencial de proteção é diminuído por um suplemento de 100 mV. Na água do mar, isso se torna - 0,80 V para uma célula de prata/cloreto de prata [6].

2.2.1

Proteção catódica de corrente impressa (PCCI)

A maioria dos sistemas de proteção catódica aplicados a sistemas reforçados de estruturas de concreto armado internacionalmente, e particularmente no Reino Unido, são sistemas de Proteção Catódica de Corrente Impressa (PCCI) [8]. Este sistema paralisa o processo de corrosão fornecendo corrente elétrica de uma fonte externa para superar a processo de corrosão na estrutura.

O PCCI envolve a instalação permanente de uma tensão controlada por sistema elétrico que passa corrente contínua para a armadura, assim todo o aço é transformado em catodo, impedindo o processo corrosivo. O anodo pode ser aplicado na superfície ou perfurado em pequenos orifícios na estrutura. É o principal tratamento eletroquímico que fornece proteção que pode ser efetivamente monitorado e controlado a longo prazo.

A ideia principal é colocar a estrutura a ser protegida em um potencial U_p menor ou igual ao potencial de equilíbrio U_a (Figura 2). Isto é conseguido, neste caso, por um fornecedor externo que é necessário para sustentar o potencial de proteção U_p . A corrente impressa é introduzida no eletrólito em virtude de um ânodo. Titânio revestido com MMO e grafite são os materiais mais utilizados para ânodos de corrente impressa, e o titânio platinado encontrando aplicações crescentes em ambientes marinhos [6].

Os principais componentes de um sistema PCCI típico incluem o anodo, a armadura, eletrólito (no concreto), cabeamento, dispositivos de monitoramento, como por exemplo: eletrodos de referência e corrente contínua. A proteção é fornecida conectando ao anodo atual para o terminal positivo e o reforço aço ao terminal negativo de uma fonte de alimentação. A corrente contínua normalmente é fornecida por um transformador alimentado ou fonte de alimentação equivalente.

As saídas típicas da fonte de alimentação são na região de 1–5 A e 2–24 V a cada um controlado independentemente zona anódica [10]. O principal benefício do PCCI é sua flexibilidade e durabilidade.

A durabilidade dos sistemas PCCI é amplamente determinada pela escolha do anodo. Isso ocorre porque as reações prejudiciais são movidas do aço ao anodo instalado[8].

Os anodos mais usuais para esse sistema são os seguintes: polímero condutor, revestimento metalizado, tinta contendo partículas de carbono condutor e outros materiais condutivos na forma de malhas, fitas e sondas [11].

Segundo Gentil (2020) [12], a grande vantagem do método por corrente impressa consiste no fato de a fonte geradora poder ter a potência e a tensão de saída de que se necessite, em função da resistividade elétrica do eletrólito, o que leva a concluir que esse método se aplica à proteção de estruturas em contato com eletrólitos de baixa (3.000 a 10.000 $\Omega\cdot\text{cm}$), média (10.000 a 50.000 $\Omega\cdot\text{cm}$), alta (50.000 a 100.000 $\Omega\cdot\text{cm}$) e altíssima (acima de 100.000 $\Omega\cdot\text{cm}$) resistividade elétrica.

A Figura 3 mostra de forma simplificada, uma aplicação do sistema por corrente impressa.

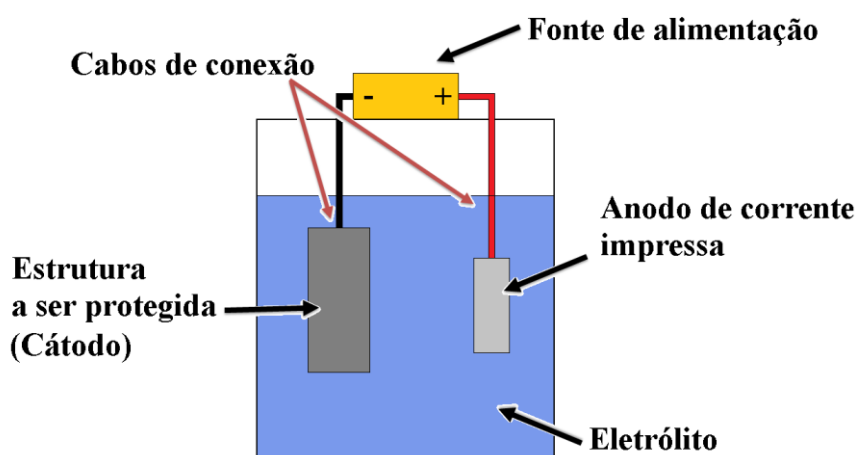


Figura 3 - Proteção Catódica Por Corrente Impressa.

Quando os anodos inertes são enterrados no solo há necessidade, na maioria das vezes, de envolvê-los com um enchimento condutor de coque metalúrgico moído, com resistividade elétrica máxima de 100 $\Omega\cdot\text{cm}$, que possui as seguintes finalidades:

- Diminuir a resistência de aterramento, facilitando a passagem da corrente elétrica do anodo para o solo;
- Diminuir o desgaste do anodo, uma vez que, em um enchimento condutor bem compactado, a maior parte da corrente é descarregada diretamente do coque metalúrgico para o solo.

2.2.2

Proteção catódica por anodo de sacrifício (PCAS)

O sistema de proteção catódica por anodo de sacrifício é feito a partir de uma liga metálica da série galvânica que tem um potencial eletroquímico mais negativo do que o do aço da estrutura [8]. Isso funciona porque a diferença de potencial entre o anodo e o aço fazem com que uma corrente positiva aconteça, tornando o aço mais carregado negativamente, virando assim o cátodo. Os metais comumente usados como anodos de sacrifício são zinco e magnésio. Esse sistema é mais recomendado, tanto técnica como economicamente, para estruturas metálicas que requeiram pequenas quantidade de correntes em geral 5 amperes [8].



Figura 4 - "Pastilha Z" de Zinco (Dimensões 80 mm x 80 mm x 30 mm)

A tabela a seguir apresenta os potenciais de alguns materiais:

Tabela 1- Série Galvânica Prática

Material	Volt*
Magnésio comercialmente puro	-1,75
Liga de magnésio (6% Al. 3% Zn 0,15% Mn)	-1,60
Zinco	-1,10
Liga de alumínio (5% Zn)	-1,05
Alumínio comercialmente puro	-0,80
Aço (limpo)	-0,50 a -0,80
Aço enferrujado	-0,20 a -0,50
Ferro fundido (não-grafitizado)	-0,50
Chumbo	-0,50
Aço em concreto	-0,20
Cobre, bronze, latão	-0,20
Ferro fundido com alto teor de silício	-0,20
Aço com carepa de laminação	-0,20
Carbono, grafite, coque	+0,30

Fonte: Vicente Gentil (2020) [12].

*Potenciais típicos normalmente observados em solos neutros e água, medidos em relação ao eletrodo de Cu/CuSO₄. Valores um pouco diferentes podem ser encontrados em diferentes tipos de solos.

Gentil (2020)[12], ainda apresenta certas exigências que esses anodos devem satisfazer, tais como:

- Bom rendimento teórico da corrente em relação às massas consumidas;
- A corrente não deve diminuir com o tempo (formação de películas passivantes)
- O rendimento prático da corrente não deve ser muito inferior ao teórico.

A tabela 2 a seguir, mostra as composições químicas recomendadas para os anodos de zinco (segundo a especificação americana MIL-A-18001 H), magnésio e alumínio.

Tabela 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA PARA ANODOS GAVÂNICOS (% EM PESO).

Metal	Liga de Zn	Liga de Mg	Ligas de Al	
Alumínio	0,1-0,5	5,3-6,7	Balanço	Balanço
Cádmio	0,005-0,15	-	-	-
Chumbo	0,006 (máx)	0,02 (máx)	-	-
Cobre	0,005 (máx)	0,02 (máx)	0,006 (máx)	0,01
Ferro	0,005 (máx)	0,003 (máx)	0,08 (máx)	-
Índio	-	-	-	0,02
Magnésio	0	Balanço	-	0,80
Manganês	-	0,15 (mín)	-	-
Mercúrio	-	-	0,035-0,50	0
Níquel	-	0,002 (máx)	-	-
Silício	0,135 (máx)	0,10 (máx)	0,11-0,21	0,10 (máx)
Zinco	Balanço	2,5-3,5	0,35-0,50	5,0

Fonte: Vicente Gentil (2020) [12], Pág. 272.

A utilização dos anodos se dá em função das características da estrutura a ser protegida e do tipo de eletrólito em contato com o material, a tabela 3 a seguir apresenta as aplicações típicas dos anodos galvânicos:

Tabela 3 - APLICAÇÕES TÍPICAS DOS ANODOS GALVÂNICOS

Anodos	Aplicações
Alumínio	Estruturas metálicas imersas em água do mar
Magnésio	Estruturas metálicas imersas em água doce, de baixa resistividade, ou enterradas em solos com resistividade elétrica até 3.000 Ω .cm
Zinco	Estruturas metálicas imersas em água do mar ou enterradas em solos com resistividade elétrica até 1.000 Ω .cm

Fonte: Vicente Gentil (2020) [12].

A taxa de consumo dependerá da dissolução do metal, conforme determinado pelas leis de Faraday, e da eficiência com que esse processo ocorre.

Um fator importante na determinação da vida útil de um anodo é sua taxa de consumo de volume, pois é a forma e o tamanho do anodo, e não sua massa, que afeta sua resistência no eletrólito. Em um metal em particular, a relação entre a resistência do ânodo e o peso do ânodo determinará sua vida útil [6].

2.3

Crítérios para a uso e escolha da proteção catódica

2.3.1

O uso da proteção catódica como prevenção

A proteção catódica é reconhecida como a técnica capaz de interromper o processo corrosivo em estruturas de concreto, pode ser aplicada para prevenir a corrosão e prolongar a vida útil de estruturas novas [11].

É altamente recomendado o uso em estruturas que ficaram expostas à atmosfera marinha, regiões mais úmidas e com maior contaminação com o cloreto, zonas de maré e as sujeitas a respingos e marolas.

A aplicação dos anodos galvânicos gera uma proteção por muitos anos, quando bem dimensionada, aumentando assim a durabilidade e prevenindo gastos dos reparos que possam surgir durante sua vida útil.

Diversos estudos vêm confirmando esses resultados em estruturas reais que foram aplicadas proteção catódica e estudos em laboratório. Alguns desses resultado são apresentados a seguir.

Jing Xu, Wu Yao [13], apresentam um procedimento experimental utilizando fibras de carbono à base de poliacrilonitrila isotrópica (PAN) e argamassa condutora. O comportamento anódico da argamassa condutora foi estudado com técnicas galvanostáticas.

De acordo com a expectativa, pode-se afirmar que, com o aumento do teor de fibras, a resistividade diminui. Quando caminhos condutores são formados como resultado do contato direto de fibras de carbono em um aglutinante de baixa condução, um aumento significativo de condutividade é observado. De acordo com a Figura 5, a zona de transição de percolação é encontrada aproximadamente no intervalo de 0,3 a 0,6% em volume e o limiar de percolação é cerca de 0,6% em volume. Para garantir uma distribuição uniforme e atual baixa queda ôhmica ao

longo do ânodo, alta condutividade eletrônica deve ser alcançada dentro do material do ânodo. Assim, é importante que o teor de fibras seja maior que a percolação limite. Nesse caso, deve-se levar também em consideração fatores relacionados ao uso de maior potência da proteção catódica e um consumo mais rápido do material do anodo, bem como o risco de aumento da temperatura local.

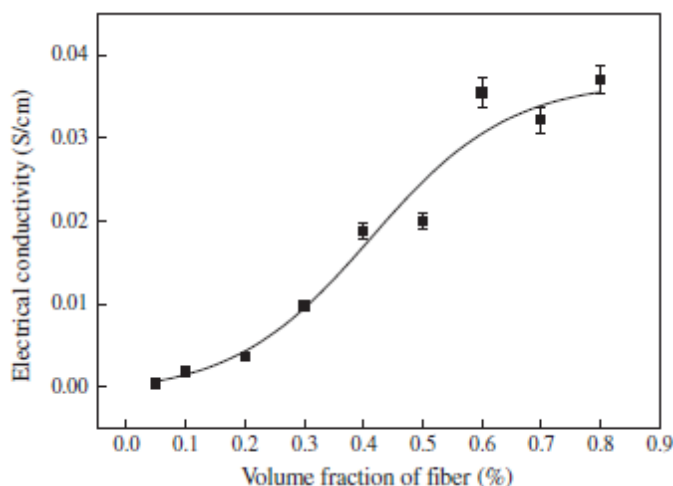


Figura 5 - Condutividade *versus* teor de fibra de carbono para sistemas de argamassa [13].

A adição de fibras de carbono aumenta a resistência compressiva e a resistência à flexão da argamassa. Além disso, a tenacidade do material do ânodo é aprimorada. A relação entre condutividade e conteúdo de fibra está de acordo com a teoria da percolação. Somente quando a fibra conteúdo está acima do limiar de percolação, o requisito da propriedade elétrica é satisfeito, não apenas o teor de fibras, mas também a composição da solução influencia o comportamento eletroquímico da argamassa condutora.

Os resultados experimentais confirmam que a argamassa condutora com 0,8% em volume de fibra é caracterizada por uma quantidade excessiva de fibras.

Segundo Jing Xu, Wu Yao [13], os resultados obtidos confirmam a possibilidade de utilização deste tipo de sobreposição condutiva como ânodos em sistemas de proteção catódica de estruturas de concreto armado.

No estudo realizado por Wang et al.[14], apresenta um experimento comparativo, usando como base uma laje de concreto com malha de aço, com dimensões de 1,0 m x 1,0 m x 0,06 m com relação água/cimento de 0,5 e relação areia/cimento de 2,5. Antes do teste foram adicionados 5% de cloreto de sódio (NaCl) em peso de cimento. Foi usado cimento Portland comum, areia de rio com

um módulo de finura de 2,6. Aço carbono cilíndrico de 0,01 m de diâmetro. Depois de polidas por uma série de lixas de carboneto de silício, as barras de aço foram fixadas com fios de ferro na malha de aço. A conectividade elétrica da malha de aço foi verificada com um multímetro. Além disso, cada extremidade da barra de aço foi soldada com fio elétrico e o local da união selado com resina epóxi. A malha de aço foi colocada no centro da laje de concreto.

Como anodos de sacrifício foram usadas ligas de zinco, ligas de magnésio e ligas de alumínio e suas composições são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição do anodo de sacrifício (% w/w) [10].

Anode type	Al	Zn	Fe	Cu	Mg	In	Mn	Si
Zinc alloy	4.80	Bal	0.095	0.025	/	0.005	/	/
Magnesium alloy	2.96	0.52	0.003	0.006	Bal	/	0.31	/
Aluminum alloy	Bal	3.45	0.22	/	0.20	0.13	/	0.65

Essas ligas foram processadas em anodos em forma de bastonetes com diâmetro de 0,016 m e um comprimento de 0,13 m. Após a limpeza e secagem, os fios elétricos foram retirados em uma extremidade e selados com fita isolante. Um espaço foi deixado no centro da laje, para conectar o anodo e os materiais de enchimento ativos (75% gesso, 20% bentonita argila e 5% de sulfato de sódio) é embalados nesse espaço e depois coberto com uma camada de argamassa. Além disso, uma laje de concreto sem anodo de sacrifício foi usada como amostra de controle.

Algumas conclusões foram obtidas durante o experimento [14]:

- I) As ligas de zinco, de magnésio e de alumínio, podem atender aos requisitos básicos de anodo de sacrifício para proteção catódica em um curto período de tempo. A longo prazo, as ligas de zinco e de magnésio tem um boa atividade eletroquímica e estabilidade. Em comparação com a liga de zinco, o anodo de magnésio tem a melhor capacidade de proteção catódica para a armadura, Figura 9. Por outro lado, o anodo da liga de alumínio não pode fornecer PC suficiente para o aço devido à perda de atividade.

- II) Após a aplicação da PC, o potencial do aço aumenta com o aumento da distância do anodo. Além disso, a corrente no circuito diminui com o aumento do tempo, Figura 9.
- III) Entre os três anodos, a magnitude da mudança de frequência característica para o anodo de liga de magnésio é maior.
- IV) A aplicação da Proteção Catódica causa a migração de íons cloreto para o anodo. A quantidade de íons cloreto próximo a armadura diminuiu com o passar do tempo. Além disso, o conteúdo de íons cloreto próximo ao anodo é mais alto que os dos outros locais. A migração do cloreto contribui para o efeito de proteção catódica.

Polder [7] apresenta um estudo de três casos na Holanda do uso de proteção catódica e seus efeitos durante o tempo.

O primeiro caso refere-se a 2448 vigas em balanço de concreto pré-moldado que suportam lajes de sacadas em dois blocos de 17 andares em Tilburg, Holanda, construído em 1972 onde muitas vigas sofreram graves danos por corrosão devido ao cloreto de cálcio adicionado ao concreto fresco como acelerador fixo.

Foi então instalado um sistema de proteção catódica feitas leituras de despolarização em relação aos eletrodos de referência de dióxido de manganês pelo menos duas vezes ao ano, desde o final de 1990.

As tensões de direção mostram alguma variação com a estação, de 1,3 V no verão a 2,5 V no inverno. Todos os conjuntos de dados de inverno têm desvios padrão mais altos do que os conjuntos de dados anteriores ou posteriores ao verão.

Os resultados mostram que a PC em ambos os edifícios teve desempenho satisfatório. A alta estabilidade dos resultados elétricos em decorrência do tempo pode ser causada pela relativa ausência de influências ambientais.

No segundo caso [7] refere-se à lajes e estruturas de galerias de um edifício em Groningen, que haviam sido construído em 1957 e era composto por galerias e estruturas de suporte, que foram pré-fabricadas no local, o concreto estava revestido desde a década de 1960. No início dos anos 80, ocorreram rachaduras devido à corrosão, que foram reparadas com argamassa de polímero. Rachaduras e lascas reapareceram em cerca de 5 anos. O cobrimento das lajes eram de 20 a 30 mm e a carbonatação de 0 a 20 mm. O teor total de cloreto estava entre 0,3 e 0,8% (média 0,6%) em massa de cimento, aparentemente adicionado à mistura de concreto. O

cimento era o cimento Portland. A continuidade elétrica do aço era baixa. A corrosão ainda estava ativa e o dano deveria aumentar ao longo do tempo. A proteção catódica foi escolhida como a opção mais favorável.

A operação elétrica do sistema foi avaliada durante quatro meses após o comissionamento em setembro de 1994. A despolarização média em 24 horas foi de 150 mV, o que é satisfatório em relação ao critério (> 100 mV). o desvio padrão ($n = 14$) foi de 72 mV. A densidade de corrente é relativamente baixa: 600 mA flui através da superfície de concreto de 600 m² (contendo possivelmente 300 m² de superfície de aço). Quanto à presença do sistema de revestimento e à exposição moderada à chuva, isso foi considerado razoável. Concluiu-se que o sistema opera satisfatoriamente. As medições tardias (3 a 4 por ano) até dois anos após o comissionamento confirmaram isso. De 1993 a 1996, a CP foi aplicada a quatro edifícios desse tipo com resultados semelhantes.

No terceiro caso [7] é apresentado de pilares de uma ponte protendida sobre o Rio Dommel. Em 1996, foi aplicada a proteção catódica em duas pontes paralelas pós-tensionadas de 14 m de largura, que sofria corrosão local nas articulações dos pilares devido ao degelo. O cloreto havia penetrado profundamente na parte inferior do convés da ponte, a cerca de meio metro da junta. O reparo convencional, removendo o concreto contaminado e substituindo por um concreto novo era tecnicamente possível, no entanto, o espaço de trabalho era limitado a menos de meio metro de altura, dificultando assim uma correta aplicação do concreto projetado.. Considerando todas as possibilidades, a proteção catódica foi escolhida como método menos perturbador, e com boa expectativa de durabilidade.

A área da superfície do reforço nos pilares era igual à superfície do concreto. A profundidade da cobertura era de cerca de 30 mm e a profundidade da carbonatação era praticamente zero. Nos pilares, o aço protendido estava deitado a uma profundidade da parte inferior de pelo menos 250 mm. Um ânodo de revestimento condutor foi aplicado a uma zona de um metro de largura da junta e um ânodo primário de fio de prata foi instalado paralelamente à junta.

O sistema foi energizado em outubro de 1996. O desempenho durante cinco meses é resumido da seguinte forma: A despolarização média ao longo de 24 h foi de > 100 mV desde cerca de três meses desde o início, em tensões de condução relativamente leves, apesar das baixas temperaturas (cerca de 0 ° C). Em março de 1997 (+ 8 ° C) a despolarização média foi de 120 mV; o desvio padrão foi de 37

mV ($n = 16$). A despolarização ao longo de 4 h foi menor em todos os casos (80 mV em março de 1997).

Em junho de 1997, a despolarização de 24 horas do aço de reforço estava abaixo de 100 mV (média de cerca de 90 mV). A fim de melhorar o nível de despolarização, a tensão de acionamento foi deliberadamente aumentada para 2,5 e por um curto período de tempo para 3,0 V. A despolarização melhorou. Entretanto, em agosto de 1997, durante um longo período quente e seco com temperaturas próximas a 30 ° C, a densidade de corrente era muito baixa (inferior a 1 mA m⁻²), devido ao aumento da resistividade do concreto; a despolarização média ficou bem abaixo de 50 mV. Em outubro, a despolarização média foi novamente superior a 100 mV (a 2,5 V com uma densidade de corrente de cerca de 3 mA m⁻²). Em todos os casos, houve dispersão significativa nas medidas. Após um ano de operação, apesar dos desvios de curto prazo do critério predefinido (despolarização de 100 mV), o sistema foi julgado como operando satisfatoriamente. Espera-se que, ao longo dos anos, a despolarização melhore sistematicamente [7].

2.3.2

O uso da proteção catódica como recuperação

Mesmo com a remoção da camada de concreto de cobertura, limpeza de toda área da armadura afetada pela corrosão, pequenas áreas ficam ativas fazendo com que em pouco tempo o processo volte a ocorrer. Por isso, a instalação da proteção catódica se faz importante pois inibe esse processo e retarda o ressurgimento da patologia.

A aplicação da corrente impressa também proporciona a recuperação da estrutura, eliminando o hidróxido e óxidos de ferro, conhecido como ferrugem, produto das reações químicas da corrosão.

Para demonstrar isso, será apresentado um experimento realizado pelo autor, na restauração de uma talhadeira de aço usando corrente impressa, sendo a fonte pilhas alcalinas.

2.4

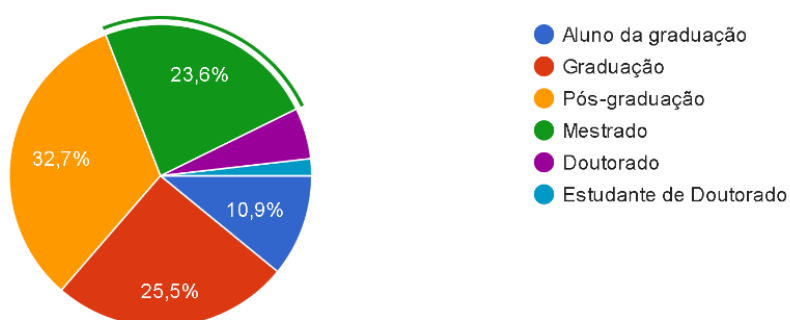
Pesquisa feita com estudantes e profissionais da área da construção civil sobre corrosão e proteção catódica.

Foi realizado uma pesquisa com 55 profissionais da área da construção civil, entre eles: 43 engenheiros civis, 6 arquitetos e urbanistas, 6 estudantes da graduação de engenharia sobre o **Estudo da Corrosão e Sistemas de Proteção Catódica em Estruturas de Concreto Armado**, através de um formulário online com 15 perguntas.

O grau de formação dos entrevistados é:

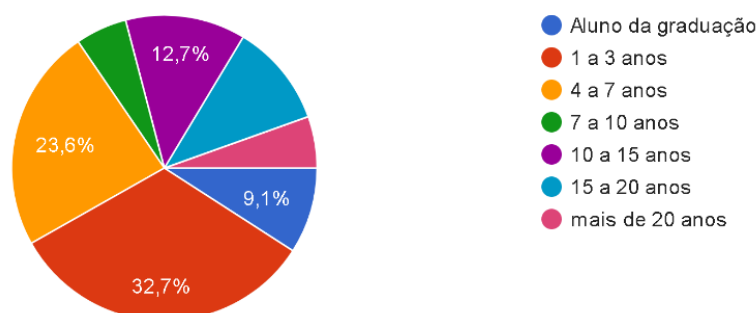
Qual o grau da sua formação

55 respostas



Qual seu tempo de atuação na profissão?

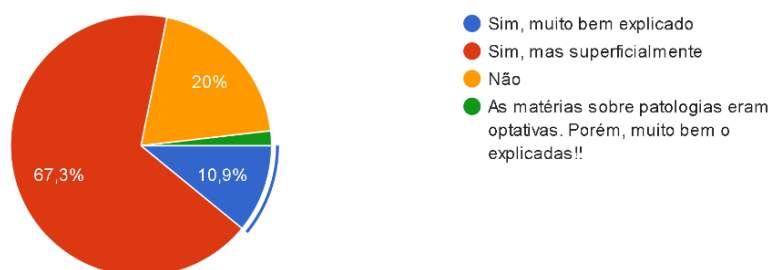
55 respostas



Foi perguntado se “Durante a sua graduação foram apresentadas matérias sobre patologias no concreto armado?” 67,3 % dos entrevistados responderam que “sim, mas superficialmente” e 20% responderam que “não” e apenas 10,9%

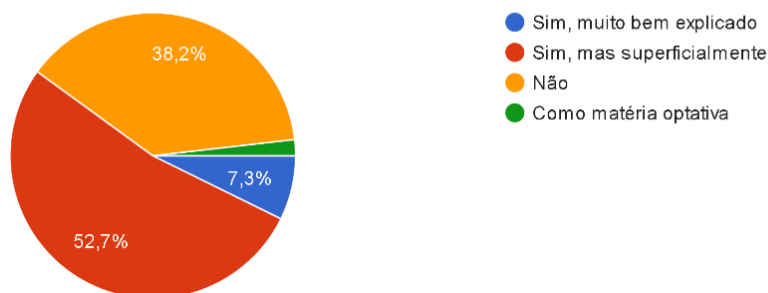
responderam “Sim, muito bem explicado”, conforme apresentado no gráfico a seguir.

Durante a sua graduação foram apresentadas matérias sobre patologias no concreto armado?
55 respostas



Ao serem questionados se “Durante a sua graduação foi apresentado estudos sobre corrosão nas armaduras, seus problemas, como combater e prevenir essa patologia?”, 52,7% responderam que “sim, mas superficialmente”, 38,2% não tiveram nenhum ensinamento sobre corrosão na graduação, e apenas 7,3% responderam que tiveram o conteúdo apresentado e muito bem explicado.

Durante a sua graduação foi apresentado estudos sobre corrosão nas armaduras, seus problemas, como combater e prevenir essa patologia?
55 respostas



Essas duas perguntas demonstram a necessidade de desenvolver ferramentas que auxiliem no ensino sobre corrosão e seu combate, possibilitando ao professor da graduação e o aluno uma troca de experiência interativa e participativa, como acontece em outras áreas de estudo como a de análise das estruturas com o programa FTOOL¹.

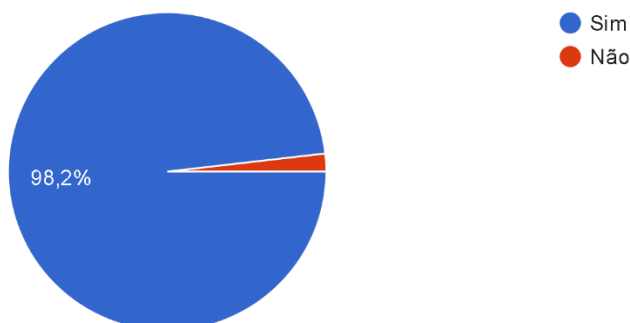
Para 98,2% dos entrevistados há pouco ensino sobre patologias nas graduações de engenharia civil e arquitetura, 100% deles acreditam que o estudo

¹ FTOOL – Two-Dimensional Frame Analysis Tool, PUC-Rio, Desenvolvido por: Luiz Fernando Martha, 2018.

sobre patologias no concreto armado deveria ser abordado de forma mais detalhada e com mais atenção, e 89,1% deram nota 5, em uma escala de 1 a 5, onde 5 é a maior, sobre qual a importância do combate a corrosão em estruturas de concreto armado.

Na sua opinião, há pouco ensino voltado a área de patologias nas faculdade?

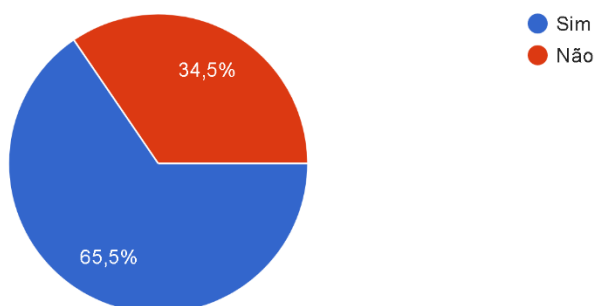
55 respostas



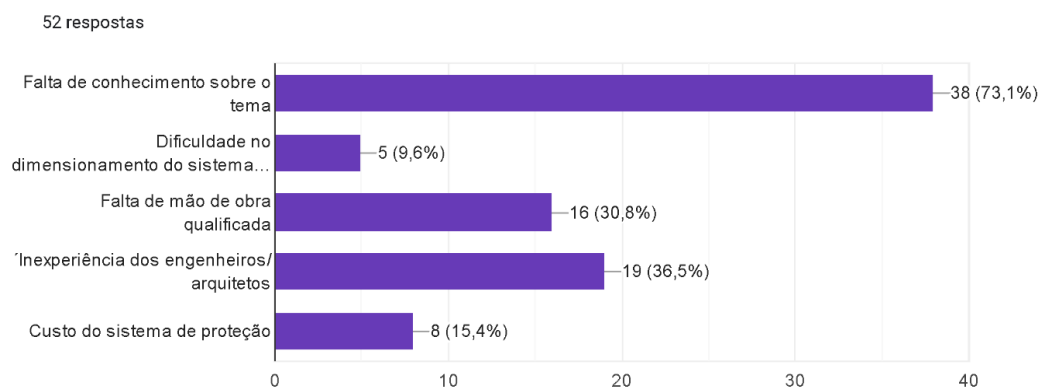
Os entrevistados também foram questionados sobre a Proteção Catódica e seu uso, 65,5% responderam que já ouviram falar sobre Proteção Catódica em estruturas de concreto armado, porém somente 3,6% já fez algum curso na área. Dos 55 entrevistados, apenas 3 (5,5%) assinalaram que já usaram raramente a proteção catódica.

Já ouviu falar sobre uso de Proteção Catódica em Estruturas de Concreto Armado?

55 respostas



Ao serem questionados, “Qual ou quais as maiores dificuldades encontradas para a aplicação de métodos preventivos ou corretivos no combate a corrosão?” 52 pessoas responderam os seguintes motivos:



As entrevistas nos mostram que muitos dos profissionais nunca ouviram falar sobre a proteção catódica, não conhecem a técnica, e 73,1% sinalizam a “falta de conhecimento sobre o tema” como a principal dificuldade para a aplicação do método.

Como observado pela revisão da literatura deste trabalho, a proteção catódica é um sistema capaz de interromper completamente o processo corrosivo a curto, médio e longo prazo, o que pode reduzir custos de manutenção, reformas além de proteger e salvar vidas.

3

Experimento de recuperação de uma talhadeira usando proteção catódica por corrente impressa

Esse experimento foi realizado pelo autor dessa dissertação para demonstrar o uso da proteção catódica na recuperação de metais já em processo de corrosão.

3.1

Materiais e Métodos

O sistema de Proteção Catódica por Corrente Impressa (PCCI) envolve a instalação permanente de uma tensão controlada por sistema elétrico que passa corrente contínua para a armadura, assim todo o aço é transformado em cátodo, impedindo o processo corrosivo. O anodo pode ser aplicado na superfície ou perfurado em pequenos orifícios na estrutura. É o principal tratamento eletroquímico que fornece proteção que pode ser efetivamente monitorado e controlado a longo prazo [8].

Os principais componentes de um sistema PCCI típico incluem o anodo, o cátodo, eletrólito, cabeamento, dispositivos de monitoramento, como por exemplo: eletrodos de referência e corrente contínua. A proteção é fornecida conectando ao anodo atual para o terminal positivo e o cátodo ao terminal negativo de uma fonte de alimentação. A corrente contínua normalmente é fornecida por um transformador alimentado ou fonte de alimentação equivalente.

No presente estudo foram utilizados uma talhadeira de 26 cm (cátodo), palha de aço como metal de sacrifício (anodo), fio de cobre, duas pilhas tamanho C de 1,5 V ligadas em série (fonte de energia), e solução aquosa composta por 2 litros de água e 12 gramas de Cloreto de Sódio (NaCl) como eletrólito.

A solução de água e NaCl foi colocada em um recipiente de plástico para que não houvesse nenhuma troca de corrente com o material, Figura 6. O polo positivo das pilhas foi ligado ao anodo (palha de aço) e o polo negativo ao cátodo (talhadeira) e ambos imersos na solução salina.

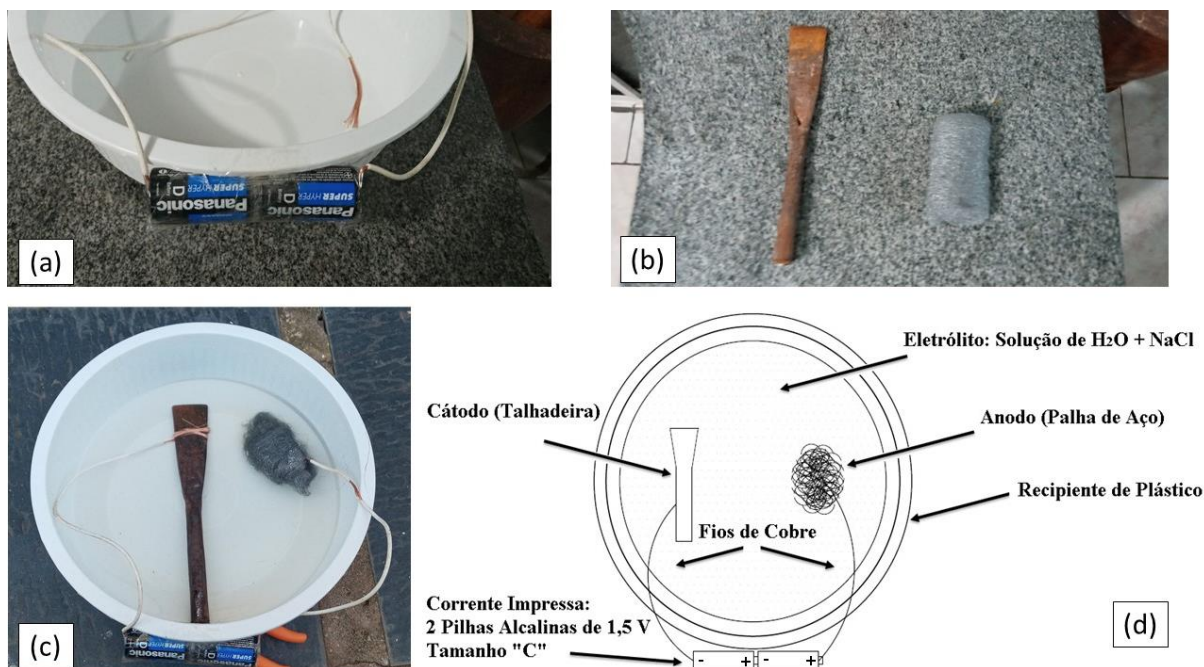


Figura 6 - (a) Recipiente de Plástico e Pilhas em série; (b) Talhadeira enferrujada (Cátodo) e Palha de Aço (Anodo); (c) Sistema instalado; (d) Esquema de instalação do Sistema de PC.

Foram feitos registros fotográficos para controle, conforme apresentado na Figura 7. O procedimento durou três horas e meia.

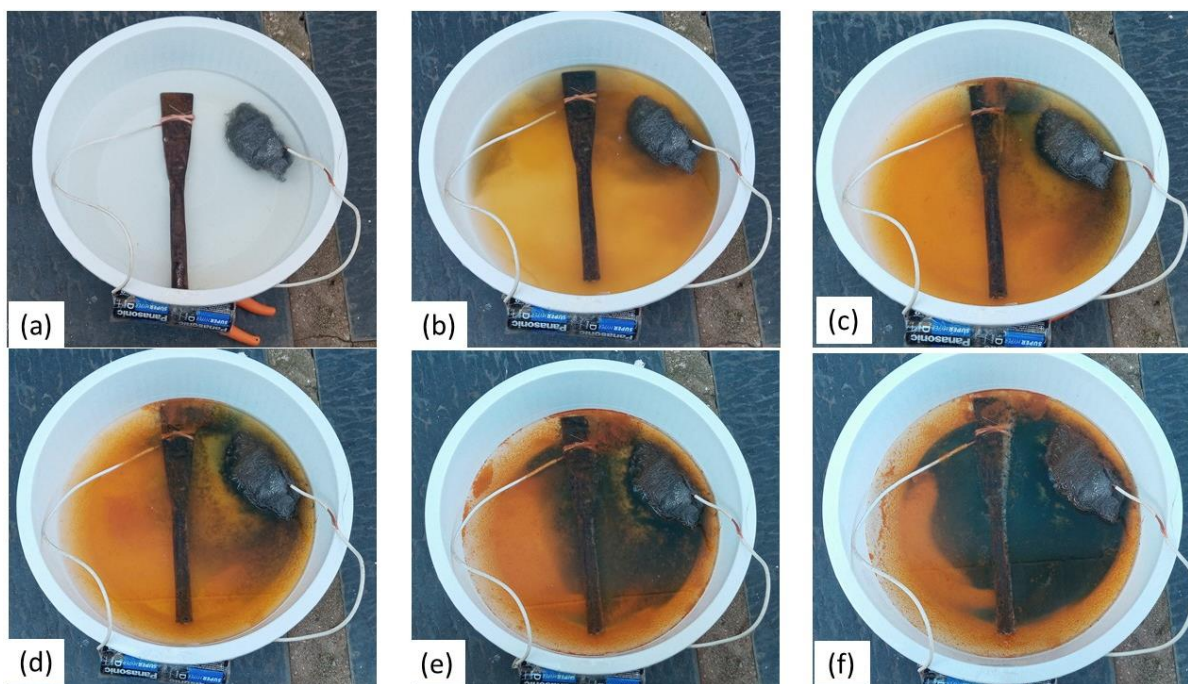


Figura 7 - (a) Início do processo; (b) Tempo percorrido: 10 minutos; (c) Tempo percorrido: 30 minutos (d) Tempo percorrido: 60 minutos; (e) Tempo percorrido: 1 hora e 30 minutos; (f) Tempo percorrido: 3 horas e 30 minutos.

Após três horas e meia de experimento os metais foram retirados da solução para limpeza e verificação dos resultados do procedimento, Figura 8.



Figura 7 - (a) Final do processo; (b) Retirada do material recuperado do recipiente; (c) e (d) Limpeza com água corrente e escova de aço .

3.2 Resultados

Em poucos minutos após o início do experimento, pode-se observar o desprendimento do hidróxido e óxidos de ferro do cátodo, enquanto o anodo começou a sofrer corrosão. Após a limpeza total da ferramenta pode-se notar um resultado satisfatório, eliminando totalmente o processo corrosivo e qualquer ponto de ferrugem, Figuras 9 e 10.



Figura 8- Talhadeira após o experimento usando a proteção catódica por corrente impressa.



Figura 9 - Antes e depois da talhadeira.

Um ano após o experimento (Figura 11), a talhadeira apresentou novos pontos de corrosão, o que demonstra a necessidade do uso contínuo do sistema de proteção catódica, mas o que pode ser notado é que o retorno da corrosão se deu em menor velocidade.



Figura 10 - Talhadeira 1 ano após o experimento.

O uso da proteção catódica não recupera a seção do aço, mas sim elimina os produtos gerados pela corrosão.

3.3

Conclusões

Como pode ser observado pelo experimento, o sistema de proteção catódica eliminou completamente a corrosão da ferramenta, confirmando assim, excelente resultado para a recuperação de materiais feitos de aço, podendo ser usado como mecanismo para recuperar diversos tipos de estruturas, como barras de aço em concreto armado, estruturas metálicas, ferramentas, entre outros materiais que sofreram processos corrosivos durante a sua vida útil.

Após a interrupção do sistema de proteção a corrosão tende a reaparecer, por isso, estudos do custo de manutenção devem ser contabilizados na hora da implementação.

Por não permitir o reingresso da corrosão enquanto ativa, a proteção catódica é o único sistema capaz de inibir completamente o processo corrosivo

4

Dimensionamento dos sistemas de proteção catódica

Rodrigues (2005) [15], apresenta que para o correto dimensionamento da proteção catódica em estruturas metálicas, deve-se observar o local onde ela se encontra (solo ou água), conhecer seu tamanho geométrico a ser protegido, o cálculo de corrente necessária e o dimensionamento do tipo de tamanho do aterramento adequado, sendo uma matéria do dimensionamento em estrutura metálica já muito difundida no meio acadêmico.

Já o dimensionamento de proteção catódica para estrutura de concreto armado é uma disciplina mais recente e baseia-se em uma série de conceitos e variáveis pré-estabelecidos nas estruturas metálicas.

Ainda segundo Rodrigues (2005) [15], dois fatores são os mais importantes no dimensionamento: a densidade da corrente, isto é, a corrente que irá fluir na pilha de corrosão (catodo/anodo) por unidade de área do anodo aplicado para interromper a corrosão nas armaduras e a situação do binômio concreto/armaduras que se deseja proteger. Além dessas duas, afirma que outras variáveis somar-se-ão a elas, como a resistividade do concreto, o tipo de anodo empregado e a durabilidade desejada.

Gentil (2020)[12], apresenta um roteiro dos mais simples dimensionamentos para a proteção catódica, sendo eles:

1. Cálculo da Corrente Elétrica de Proteção;
2. Por Anodos Galvânicos Ou De Sacrifício;
3. Por Corrente Impressa Ou Forçada.

4.1

Dimensionamento da proteção catódica por anodos galvânicos

4.1.1

Cálculo de corrente elétrica de proteção

Os cálculos descritos a seguir, seguem as orientações de Gentil (2020) [12]:

Quando a corrente elétrica necessária para a proteção catódica de uma determinada estrutura não pode ser obtida no campo, por intermédio do teste de corrente, ela precisa ser calculada.

A fórmula utilizada para esse cálculo é a seguinte:

$$I = A \times D_c \times F (1 - E) \quad (1)$$

onde:

I = corrente elétrica, em mA;

A = área a ser protegida, em m²;

D_c = densidade de corrente elétrica, em mA/m²;

F = fator de correção da velocidade;

E = eficiência do revestimento.

Os parâmetros envolvidos na equação supracitada, devem ser calculados ou estimados tendo-se em vista as orientações seguintes:

a) Para o cálculo da Área (A):

- Considerar apenas as partes em contato com o eletrólito.

b) Para a Densidade de Corrente Elétrica (D_c):

- Considerar a superfície a proteger completamente nua, sem revestimento;
- O valor D_c depende da resistividade do eletrólito, segundo a equação

$$D_c = 73,73 - 13,35 \times \log p \quad (2)$$

onde p = resistividade elétrica do eletrólito, em ohm.cm.

Como pode ser visto, se a resistividade elétrica do eletrólito (solo, água, concreto, etc) não for medida corretamente no campo, a densidade de corrente apresentará um erro que poderá comprometer o sistema de proteção catódica.

c) Para o fator de correção da velocidade (F):

- Utilizado apenas quando existe movimentação do eletrólito em relação à estrutura;
- O seu valor pode ser obtido na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - FATOR DE CORREÇÃO DA VELOCIDADE (F)

Velocidade (m/s)	F
1	1,00
2	1,11
3	1,17
4	1,22
5	1,24
6	1,25
7 e maior	1,27

Fonte: Vicente Gentil (2020) [12].

d) Para a eficiência do revestimento (E):

- Esse parâmetro precisa ser estimado em função da experiência do projetista, sendo extremamente importante para o cálculo correto da corrente elétrica, uma vez que pequenas diferenças nessa estimativa acarretam grandes variações na corrente calculada;
- Depende do tipo de revestimento e dos cuidados tomados com sua aplicação, inspeção e reparos;
- A tabela 6 a seguir fornece indicações para a sua estimativa.

Tabela 5 - EFICIÊNCIAS MÉDIAS DE DIVERSOS TIPOS DE REVESTIMENTOS

Tipo de Estrutura a Proteger	Qualidade de Revestimento	Eficiência E (%)
Tubulações enterradas ou submersas	Excelente	90 a 95
	Bom	80 a 90
	Regular	50 a 80
	Ruim	0 a 50
Fundo de tanque (parte externa)	Bom	60 a 80
	Regular	40 a 60
	Ruim	0 a 40

Fundo de tanque (parte interna)	Excelente	90 a 95
	Excelente	90 a 95
Embarcações	Bom	80 a 90
	Regular	50 a 80
	Ruim	0 a 50

Fonte: Vicente Gentil (2020) [12].

4.1.2 Cálculo de resistência por anodo galvânico

O sistema de proteção galvânica funcionará de acordo com a Lei de Ohm, segundo a equação:

$$I = \frac{\Delta V}{R_t} \quad (3)$$

onde:

I = Corrente elétrica de proteção, em amperes (A).

ΔV = diferença de potencial entre o anodo galvânico utilizado e a estrutura a proteger, em volts (V).

R_t = resistência total do circuito de proteção catódica, em ohm (Ω).

Para a aplicação correta da equação acima, as seguintes observações são importantes:

- O valor de I , ou sua soma, deve ser maior ou igual à corrente necessária, calculada de acordo com o visto no cálculo da corrente elétrica de proteção (4.1.1);
- O valor ΔV significa a diferença entre o potencial natural do anodo, mostrado na tabela 6, e o potencial de proteção do material metálico da estrutura (-0,80 V, para o aço, em relação ao eletrodo de Ag/AgCl ou -0,85 V para o eletrodo de Cu/CuSO₄);
- O valor R_t pode ser calculado com o auxílio da equação.

$$R_t = R_{ca} + R_c + R_a \quad (4)$$

onde:

R_{ca} = Resistência do cabo elétrico de ligação, quando existente, entre o anodo, ou anodos, e a estrutura metálica. Essa resistência depende do comprimento e bitola do cabo, podendo ser obtida através de tabelas dos fabricantes.

R_c = Resistência de contato entre a estrutura (catodo) e o eletrólito que a envolve. Para o caso dos sistemas onde os eletrólitos são de baixa resistividade elétrica, o valor de R_c é muito pequeno em relação às outras parcelas, podendo ser desprezado nos cálculos.

R_a = Resistência de contato entre o anodo, ou anodos, e o eletrólito. Essa resistência depende basicamente do formato do anodo e da resistividade elétrica do eletrólito, podendo ser calculada por intermédio das fórmulas empíricas que se seguem.

Tabela 6 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS ANODOS GALVÂNICOS

Anodo	Capacidade de corrente C (A.h/kg)	Potencial em circuito aberto (CuICuSO ₄)	Massa Específica (g/cm ³)	Eficiência (%)
Zinco	740	-1,10 V	7,2	90-95
Alumínio	2.200-2.844	-1,10 V	2,8	75-95
Magnésio	1.100	-1,60 V	1,8	50-60

Fonte: Vicente Gentil (2020) [12].

- *Cálculo da resistência de um anodo cilíndrico instalado na posição vertical:*

$$R_v = \frac{0,0052p}{L} \left(2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 \right) \quad (5)$$

onde:

R_v = resistência de um anodo vertical, em ohm.

p = resistividade elétrica do eletrólito, em Ω .cm.

L = comprimento do anodo, em pés.

d = diâmetro do anodo, em pés.

Obs.: Quando se usa enchimento condutor, os valores de L e d podem ser o comprimento e o diâmetro da coluna de enchimento.

- *Cálculo da resistência de um grupo de anodos verticais, instalados em paralelo:*

$$R_a = \frac{0,0052p}{L} \left(2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} 2,3 \log 0,656 N \right) \quad (6)$$

onde:

R_a = Resistência dos diversos anodos verticais, em ohm.

N = Número de anodos.

S = espaçamento entre os anodos, em pés.

- *Cálculo da resistência de um anodo cilíndrico, instalado na posição horizontal:*

$$R_h = \frac{0,0052p}{L} \left[2,3 \log \frac{4L^2 + 4L\sqrt{p^2 + L^2}}{d.p} + \frac{p}{L} - \frac{\sqrt{p^2 + L^2}}{L} - 1 \right] \quad (7)$$

onde:

R_h = resistência do anodo horizontal, em ohm.

P = dobro da profundidade do anodo, em pés.

Obs.: Para a resistência de “N” anodos, dividir o valor de “ R_h ” por “N”.

4.1.3 Cálculo da vida dos anodos galvânicos

Para o cálculo de vida do tempo de duração dos anodos galvânicos ou definição da massa total de anodos a ser utilizada para uma determinada vida, a seguinte expressão pode ser utilizada:

$$V = \frac{M.C .0,85}{8760 . I} \quad (8)$$

onde:

V = vida dos anodos, em anos.

M = Massa total de anodos, em Kg.

C = capacidade de corrente do anodo, em A.h/kg (Tabela 7).

I = corrente liberada pelos anodos, em ampère.

0,85 = fator de utilização do anodo (85%).

4.1.4 Cálculo da vida dos anodos inertes

Os anodos utilizados para os sistemas por corrente impressa, embora recebam a denominação genérica de anodos inertes, sofrem certo desgaste com o passar do tempo em função das densidades de corrente aplicadas em suas superfícies. Essas densidades de corrente precisam ser mantidas dentro de determinados limites, conforme mostrado na tabela 7, e a vida dos anodos, nessas circunstâncias, pode ser calculada através da expressão:

$$V = \frac{0,85 \times M}{D \times I} \quad (9)$$

onde,

V = vida dos anodos, em anos.

M = massa total dos anodos, em kg.

D = desgaste esperado do anodo, em kg/A . ano (Tabela 8).

I = corrente injetada pelo retificador, em A.

0,85 = fator de utilização dos anodos.

Tabela 8 - CARACTERÍSTICAS DOS ANODOS INERTES

Material do Anodo	Densidade de Corrente Recomendada (A/m ²)	Desgaste “D” (kg/A . Ano)
Grafite	Até 5	0,40
Fe-Si	Até 15	0,35
Fe-Si-Cr	Até 15	0,35*
Pb-Sb-Ag	50 a 100	0,10
Ti-Pt	Até 1000	Desprezível
Nb-Pt	Até 700	Desprezível
Ta-Pt	Até 1100	Desprezível

Titânio revestido com óxidos	Até 1100	Desprezível
Magnetita	Até 115	0,04
Ferrita	Até 115	0,002

Fonte: Vicente Gentil (2020) [12].

*Consumo em água do mar.

4.2

Dimensionamento da proteção catódica por corrente impressa

Esse dimensionamento também precisa obedecer à Lei de Ohm, sendo a equação interpretada da seguinte maneira:

$$I = \frac{\Delta V}{R_t} \quad (10)$$

onde:

I = corrente de proteção, em ampères, para cada conjunto retificador/cama ou feito de anodos a ser instalado. O número de retificadores é definido em função da corrente total necessária, das condições de distribuição dessa corrente ao longo da estrutura, da existência de locais de resistividade elétrica adequada e das disponibilidades de circuitos de corrente alternada nesses locais.

ΔV = tensão de saída, em corrente contínua, do retificador. Os retificadores podem ser dimensionados para ampla faixa de saída, tanto de tensão quanto de corrente, sendo mais comuns os seguintes valores:

- Para instalações terrestres, tensões de 30 V a 100 V e correntes de 5 A a 50 A.
- Para instalações marítimas, tensões de 10 V a 20 V correntes de 50 A a 400 A.

R_t = resistência total do circuito de um conjunto retificador/cama de anodos, podendo ser calculada segundo a mesma orientação mostrada para o anodo galvânico. A resistência R_t deve ser menor que a resistência nominal do retificador, R_r . Em geral, usa-se $R_r \geq 1,2 R_t$.

4.3

Dimensionamento usando o Método dos Elementos de Contorno (MEC)

Segundo Wrobel (2002) [6], considerando que as velocidades da água são baixas e não interferem na reação eletroquímica que ocorre no eletrólito, a seguinte equação pode ser escrita para a densidade de corrente:

$$J = -F \sum_{k=1}^N z_k D_k \nabla c_k - F^2 \sum_{k=1}^N z_k^2 c_k u_k \nabla U \quad (11)$$

onde,

J é o vetor de densidade de corrente,

F é a constante de Faraday,

z_k , c_k , u_k e D_k , são a carga, concentração, mobilidade mecânica e coeficiente de difusão, respectivamente para a espécie K .

N é o número de espécies e

U é o eletroquímico potencial.

Definindo a condutividade do eletrólito na forma:

$$\sigma = F^2 \sum_{k=1}^N z_k^2 c_k u_k \quad (12)$$

a equação (12) reduzida é:

$$J = -F \sum_{k=1}^N z_k D_k \nabla c_k - \sigma \nabla U \quad (13)$$

O primeiro termo da equação acima representa a porção da densidade de corrente sustentada por gradientes de concentração, que geralmente é desprezada em simulações de grande escala. A razão é que os gradientes de concentração só têm influência significativa na camada de difusão, próxima à estrutura, que é muito fina em relação ao comprimento característico do sistema. Assim, os efeitos de concentração são normalmente incorporados nas curvas de polarização, e aplicados como condições de contorno, a densidade de corrente no eletrólito é então dada por

$$J = -\sigma \nabla U \quad (14)$$

ou, usando notação indicial,

$$J = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x_i} \quad (15)$$

que é a afirmação da lei de Ohm.

A conservação de carga requer que

$$\frac{\partial J_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\sigma \frac{\partial U}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (16)$$

A condutividade σ é geralmente assumida como constante para a água do mar. Assim, a equação acima se reduz a uma equação de Laplace para o potencial eletroquímico U :

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x_i \partial x_i} = 0 \quad (17)$$

4.3.1 Condições de contorno

Em superfícies isoladas, a densidade de corrente na direção normal é igual a zero:

$$J_n = -\sigma \frac{\partial U}{\partial n} = 0 \quad (18)$$

A mesma condição se aplica na interface eletrólito/ar. Na análise numérica de estruturas flutuantes, a profundidade infinita da água do mar é geralmente assumida, uma vez que a principal área de atividade de corrosão é a zona de respingo.

As condições de contorno nos cátodos são geralmente dadas por uma curva de polarização não linear, para os anodos, é comum especificar o potencial eletroquímico para sistemas galvânicos ou a densidade de corrente para sistemas de corrente impressa, também é possível, em alguns problemas envolvendo sistemas galvânicos, especificar uma curva de polarização não linear para os ânodos.

Em condições gerais, não é fácil obter uma expressão de forma fechada para a curva de polarização e os dados obtidos experimentalmente, através de testes laboratoriais potenciostáticos ou galvanostáticos, devem ser utilizados. As curvas de polarização podem ser inseridas diretamente nos códigos BEM, descrevendo a relação entre potencial e densidade de corrente através de vários pontos discretos e usando algum tipo de interpolação (por exemplo, linear) entre os pontos.

Também é possível ajustar curvas de polarização experimentais ao modelo teórico descrito pela equação de Tafel, em termos dos parâmetros de polarização habituais, como segue

$$J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{U}{\beta_A}\right) - \exp\left(\frac{U}{\beta_C}\right) \right] \quad (19)$$

em que J_0 é a densidade de corrente de troca, e β_A e β_C são as inclinações da correspondente (região de Tafel anódica ou catódica. Se apenas a curva de polarização catódica for considerada,

$$J_n = -J_0 \exp\left(\frac{U}{\beta_C}\right) \quad (20)$$

É mais comum reescrever a expressão acima na forma

$$U = -\beta_C \ln \frac{J_n}{J_0} \quad (21)$$

Na prática, as curvas de polarização catódica e anódica são dependentes do tempo, pois seu comportamento é fortemente influenciado pela deposição de incrustações, temperatura da água, salinidade, teor de oxigênio, pH, etc. Também diferem em diferentes partes da superfície da estrutura a ser protegida

catodicamente. Embora seja muito difícil simular a polarização correta em cada ponto da superfície, é possível usar diferentes curvas de polarização em diferentes partes da superfície.

4.3.2

Aplicações do MEC

Em Telles, Mansur, Wrobel, e Marinho [16], é apresentada uma simulação de um sistema de proteção catódica por corrente impressa de uma plataforma semissubmersível usando um sistema computacional chamado PROCAT, desenvolvimento pelos autores baseado nos elementos de contorno.

Estudos baseados em modelos 2D e 3D podem ser observados em Wrobel e Miltiadou [17] e Miltiadou e Wrobel [18]

No livro *The Boundary Element Method*, de Wrobel [6], são apresentadas diferentes aplicações, tais como: célula de corrosão circular; tanque cilíndrico enterrado, bomba de água do mar, além de problemas de eletrodeposição.

A técnica do Método dos Elementos de Contorno, se mostrou útil para verificar a eficiência dos sistemas de proteção catódica antes da sua instalação, auxiliando o projetista no melhor posicionamento dos anodos, corrigindo área subprotegidas ou superprotegidas.

Outra área interessante são aplicações relacionados a análise inversa de problemas de PC, para identificar parâmetros de polarização a partir de valores potenciais medidos em alguns pontos distantes da superfície do metal e para identificar falhas no revestimento de dutos.

5

Estudo de caso sobre o uso de proteção catódica na recuperação estrutural de estruturas de concreto armado

A apresentação do cálculo a seguir seguirá os métodos de dimensionamento apresentados anteriormente, como proposto por Vicente Gentil (2020) [12].

5.1

Levantamento de dados da estrutura a ser protegida

Segundo Gentil (2020) [12], as principais informações necessárias dimensionamento da proteção catódica são:

- a) Material da estrutura a ser protegida;
- b) Especificações e propriedades do revestimento protetor, se existir;
- c) Características de construção, dimensionais e geométricas;
- d) Mapas e plantas de localização, desenho e detalhes da construção;

5.2

Material da estrutura a ser protegida

O material da estrutura a ser protegido, será a armadura de um pilar de concreto armado, composta de Aço CA-50 que apresenta corrosão.



Figura 11 - Fotos do Pilar P6 em estudo [Autor].

5.3

Dimensões, geometria e característica da estrutura em análise

O objeto de estudo é um pilar de concreto armado localizado em um condomínio na cidade do Rio de Janeiro, executado no ano de 1968. É um pilar central de um conjunto de 24 pilares, que suportam um prédio de 4 andares.



Figura 12 - Foto da Localização do Pilar em estudo.[Autor].

- Número do pilar: P06;
- Dimensões: 20 cm x 45 cm;
- Andar: Térreo;
- Pé direito: 3,85 m;
- Tipo de aço: CA-50;
- Armadura vertical: 12 Ø 16,0 mm – 385;
- Estribos: Ø 6.3 mm c/ 10 cm – 118;

Área superficial de armadura: 3,23 m²/m – considerando armadura vertical e estribos:

- Área superficial da armadura vertical (A_{sv}) – (Circunferência da bitola x comprimento x quantidade de barras)

$$A_{sv} = 2 \times \pi \times \frac{1,6}{2} \text{ cm} \times 385 \text{ cm} \times 12 \text{ un} = 23.222,65 \text{ cm}^2$$

- Área superficial dos estribos (A_{se}) - (Circunferência da bitola x comprimento x quantidade de barras)

$$A_{se} = 2 \times \pi \times \frac{0,63}{2} \text{ cm} \times 118 \text{ cm} \times 39 \text{ un} = 9.108,29 \text{ cm}^2$$

Logo,

$$A_{sv} + A_{se} = 23.222,65 + 9.108,29 = 32.330,94 \text{ cm}^2 = 3,23 \text{ m}^2$$

5.4

Detalhamento da armadura (em cm)

Cabe ressaltar que só foram citadas informações que são pertinentes ao presente caso de estudo.

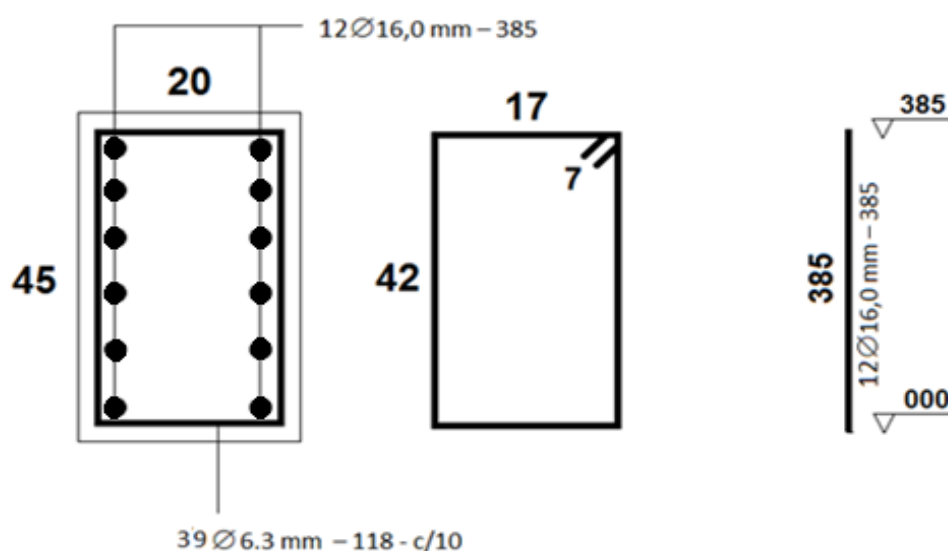


Figura 13 - Detalhamento da Armadura do Pilar em Estudo. Fonte: Autor.

5.5

Medições e Testes de Campo

Devido às limitações da pesquisa e para fins de apresentação didática dos cálculos de dimensionamento, os valores das medições de campo para análise de resistividade elétrica e dos potenciais estrutura/eletrolito serão baseados nas tabelas apresentadas a seguir, além de citar os métodos para a obtenção em campo.

5.6

Os métodos de resistividade elétricas

Segundo Araújo, Panossian e Lourenço (2014) [19], a resistividade elétrica pode ser definida como uma propriedade físico-química do concreto que indica a resistência ao fluxo de corrente elétrica de natureza iônica na solução aquosa (fase líquida do concreto) contida na sua rede de poros comunicantes: bolhas, interstícios e canais capilares.

Segundo os mesmos autores supracitados, pode-se obter a medida da resistividade através de quatro métodos.

- Método de disco – Um eletrodo externo;
- Método de dois eletrodos;
- Método dos quatro eletrodos (método de Werner);
- Determinação da resistividade elétrica volumétrica do concreto – NBR 9204:1985.

Os critérios de avaliação quanto à resistividade apresentados pelo Comitê Euro-Internacional Du Beton – CEB, os quais tem grande aceitação no meio técnico, são os seguintes:

Tabela 7 - Resistividade do Concreto / Indicação de Probabilidade de Corrosão

Resistividade do concreto (K ohm.cm)	Indicação de probabilidade de corrosão
>20	Desprezível
10 a 20	Baixa
5 a 10	Alta
<5	Muito Alta

Fonte: Comitê Euro-Internacional Du Beton – CEB.

Será usado como base para o cálculo a média da resistividade do concreto com indicação de probabilidade de corrosão **alta** (5 a 10 K ohm.cm), sendo assim o valor a ser usado será de **7,5 K ohm.cm**.

5.7

Cálculo da Corrente Elétrica de Proteção

Para obtenção do valor da corrente elétrica necessária para a proteção catódica da estrutura utilizaremos a seguinte fórmula indicada por Gentil (2020):

$$I = A \times D_c \times F(1 - E) \quad (1)$$

onde,

- A (Área a ser protegida) = 3,23 m².
- D_c (densidade da Corrente Elétrica): $D_c = 73,73 - 13,35 \times \log \rho$, onde ρ é a resistividade do eletrólito (7,5 K ohm.cm ou 7500 ohm.cm).

$$D_c = 73,73 - 13,35 \times \log \rho \quad (5)$$

$$D_c = 73,73 - 13,35 \times \log 7500$$

$$D_c = 21,99 \text{ mA/m}^2$$

- F = 1, conforme tabela 5, página 41.
- E = 0, pois não há nenhum revestimento protetor na armadura.

Sendo assim, o valor da corrente elétrica necessária é:

$$I_{req} = A \times D_c \times F(1 - E)$$

$$I_{req} = 3,23 \times 21,99 \times 1(1 - 0)$$

$$I_{req} = 71,0277 \text{ mA}$$

5.8

Cálculo da massa dos anodos galvânicos

Segundo Gentil (2020) [12], para o cálculo de duração dos anodos galvânicos ou definição da massa total de anodos por um determinado tempo, é utilizada a seguinte expressão:

$$V = \frac{M \times C \times 0,85}{8760 \times I} \quad (8)$$

sendo:

M = massa total dos anodos, em kg;

V = vida dos anodos, em anos;

I = corrente liberada pelos anodos, em A;

C = capacidade de corrente do anodo, em Ah/kg;

0,85 = fator de utilização anodo (85%)

O cálculo será baseado na “pastilha Z” de zinco fornecida pela Rogertec, no formato quadrado com 8 cm de lado e 3 cm de espessura com 0,100 kg de zinco em seu núcleo anódico², para ser obtido o valor da corrente emitida por ela no período de 1 ano.

Sendo assim, para o cálculo da Corrente Liberada (I_{lib}) por uma “pastilha Z” será:

$M = 0,100$ kg (massa total dos anodos, em kg);

$V = 1$ ano;

I_{lib} = em A;

$C = 740$ A x h/kg (Tabela 7, pág. 43);

0,85 = fator de utilização anodo (85%)

Com esses dados, é possível resolver a equação:

$$V = \frac{M \times C \times 0,85}{8760 \times I_{lib}} \quad (8)$$

$$1 = \frac{0,100 \times 740 \times 0,85}{8760 \times I_{lib}}$$

$$I_{lib} = 0,00718 \text{ A ou } 7,18 \text{ mA}$$

5.9 Número de anodos

Para obtenção do número de anodos, basta dividirmos o número de corrente necessária pelo número de corrente emitida por um anodo.

$$N = \frac{I_{req}}{I_{lib}} \quad (22)$$

sendo,

N = número de anodos;

² Dimensões obtidas da empresa Rogertec em 23 de Maio de 2018.

I_{req} = Corrente necessária para a proteção da estrutura.

I_{lib} = Corrente liberada por uma pastilha Z em estudo.

Logo,

$$N = \frac{71,0277}{7,18} = 9,89 \text{ anodos} \cong \mathbf{10 \text{ anodos}}$$

Outro método para obtenção do número de pastilhas, substituindo o número de corrente na fórmula a seguir e obter o número de massa necessário:

$$V = \frac{M \times C \times 0,85}{8760 \times I_{req}} \quad (8)$$

$$1 = \frac{M \times 740 \times 0,85}{8760 \times 0,0710277}$$

$$M = \frac{8760 \times 0,0710277}{740 \times 0,85}$$

$$\mathbf{M = 0,989 \text{ kg}}$$

Assim, pode-se obter o número de anodos dividindo o número de massa necessário pelo número de massa de uma pastilha Z.

$$N = \frac{M}{m} \quad (23)$$

sendo,

N = número de anodos;

M = Massa total requerida, em kg.

m = Massa unitária do anodo, em kg.

Assim,

$$N = \frac{0,989 \text{ kg}}{0,100 \text{ kg}} = 9,89 \text{ anodos}$$

$$\mathbf{N \cong 10 \text{ anodos}}$$

5.10

Verificação da corrente liberada pelos anodos

$$I = N \times i$$

onde:

I = corrente total liberada, em A;

N = número de anodos;

i = corrente liberada por um anodo, em A;

A **corrente liberada** deverá ser \geq a **corrente requerida**.

Corrente liberada pelo sistema:

$$I_{lib} = N \times i$$

$$I_{lib} = 10 \times 7,18 \text{ mA}$$

$$I_{lib} = 71,80 \text{ mA}$$

Como a $I_{req} = 71,0277 \text{ mA}$ e sendo a corrente liberada $I_{lib} = 71,80 \text{ mA}$, está satisfeita a equação:

$$I_{req} \leq I_{lib} = \text{OK!}$$

5.11

Distribuição dos anodos na estrutura

Para distribuir os anodos ao longo do pilar, precisa-se determinar a área superficial do pilar e dividirmos pelo número de anodos a ser utilizado, ou seja:

Área superficial do pilar:

$$\text{➤ } A_{\text{pilar}} = 2 \text{ faces de } 0,20 \times 3,85 + 2 \text{ faces de } 0,45 \times 3,85$$

$$A_{\text{pilar}} = 1,54 + 3,465$$

$$A_{\text{pilar}} = 5,005 \text{ m}^2$$

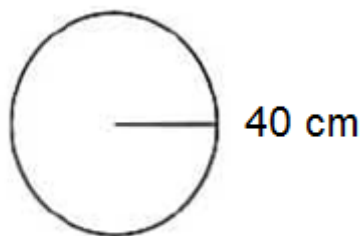
$$\text{➤ } \text{Número de anodos} = 10 \text{ anodos.}$$

Logo, $\text{Área de atuação} = \frac{5,005 \text{ m}^2}{10 \text{ anodos}}$

Obtemos,

1 anodo a cada $0,50 \text{ m}^2$, ou seja, o raio de atuação será: $\pi \times r^2 = 0,50 \gg$

$$r = \sqrt{\frac{0,50}{\pi}} \gg r = 0,398 \text{ m} \cong 40 \text{ cm.}$$



5.12 Análise dos resultados

É possível assim concluir que, para o pilar em estudo, onde a capacidade de resistência do concreto é considerada com alto risco de corrosão, devem ser usados 10 anodos, sendo aplicado 1 anodo para um raio de 40 cm. Ao comprar as pastilhas, o fornecedor orienta a instalação de uma pastilha a cada 40 cm, assim se observa que os cálculos feitos usando as fórmulas de Vicente Gentil estão muito próximos do recomendado pelo fornecedor.

5.13

Exemplo Prático de cálculo de proteção catódica por corrente impressa

Gentil (2020) [12] apresenta um exemplo prático de cálculo de resistência de aterramento de uma cama de anodos, e de sua vida útil, que será apresentado a seguir para exemplificação:

Calcular a resistência total de aterramento de uma cama de anodos com 20 anodos de grafite (dimensões = 1.500 mm X 75 mm, peso = 12 kg), instalados na posição vertical, com enchimento condutor de coque metalúrgico moído (dimensões = 3.000 mm X 254 mm), espaçados de 6 m. Sabendo-se que a cama de anodos será ligada a um retificador de 50 V, 30 A, destinado a proteger uma adutora, qual será a vida dos anodos de grafite para a operação do retificador em carga máxima? A resistividade elétrica média, medida no local de instalação dos anodos, é de 9.000 Ω .cm.

Resolução:

A fórmula a ser utilizada é a:

$$R_a = \frac{0,0052p}{L} \left(2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} 2,3 \log 0,656 N \right) \quad (24)$$

onde:

N = 20 anodos

p = 9.000 Ω .cm

L = 3.000 mm (para o valor de “L” pode-se utilizar o comprimento da coluna de coque).

d = 254 mm (diâmetro da coluna de coque)

S = 6.000 mm.

Obs.: os valores de L, d e S precisam ser convertidos em pés, para aplicação na fórmula.

Assim o valor obtido é de **$R_a = 1,45 \Omega$** , aproximadamente.

A vida dos anodos pode ser calculada da seguinte maneira, pela fórmula:

$$V = \frac{0,85 M}{DI} \quad (25)$$

onde:

$M = 240 \text{ kg}$ (massa de 20 anodos)

$D = 0,40 \text{ kg/A} \cdot \text{ano}$

$I = 30 \text{ A}$.

Logo,

$V = 17 \text{ anos}$.

Obs.: na realidade, a vida dos anodos será superior a 17 anos, uma vez que boa parte da corrente será descarregada através do enchimento condutor (coque metalúrgico moído) o qual reduzirá sensivelmente o desgaste do anodo.

6

Sistema Computacional GCPCalculator

O programa para computador GCPCalculator foi desenvolvido pelo autor em conjunto com o orientador dessa dissertação com a intuito de difundir e incentivar o uso da proteção catódica nas estruturas de concreto armado, facilitando o seu dimensionamento, possibilitando determinar a quantidade em quilogramas dos anodos e assim o custo para a implementação do sistema na estrutura.

O GCPCalculator foi desenvolvido em linguagem C++, através do ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Studio® compatível com sistema operacional Windows® da empresa Microsoft®.

Como base de cálculo para o sistema computacional foram utilizados os livros Corrosão Vicente Gentil [12] e o livro Sistema de Proteção Catódicas 2ª Edição Luiz Paulo Gomes [10].

6.1

Layout e funcionalidades

Na tela principal do programa GCPCalculator (Figura 15), o usuário adiciona as características da estrutura como: área a ser protegida (A), resistividade elétrica do eletrólito (ρ), fator de correção de velocidade (F), eficiência do revestimento (E), tempo de vida do sistema de proteção catódica (V), ao clicar no botão “Calcular”, o programa calcula e apresenta a Corrente Elétrica Necessária (I_{req}) e a Quantidade de Anodos Galvânicos em quilogramas dos anodos de zinco, alumínio e magnésio.

Figura 14 - Layout do CPCalculator para o cálculo da Corrente Elétrica Necessária (I_{req}) e Quantidade de Anodos Galvânicos em kg.

Com esses valores obtidos o usuário poderá entrar em contato com o fornecedor de anodos galvânicos e através do seu catálogo definir a quantidade de anodos, bastando apenas dividir a massa mínima necessária pela massa unitária do anodo escolhido.

O programa GCPCalculator também dispõe de uma calculadora auxiliar para o dimensionamento das áreas a serem protegidas das barras de aço no concreto armado (Figura 16).

Calculadora Auxiliar para Área

Calculadora para área a ser protegida do Concreto Armado:

Atenção: Os números decimais deverão ser separados por ponto (.)

Ø Barra de Aço: (mm)	Comprimento: (cm)	Quantidade: (Und.)	Área: (m ²)
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²
<input type="text"/> mm	<input type="text"/> cm	<input type="text"/> und.	<input type="text"/> m ²

Calcular

ÁREA TOTAL: m²

Figura 15 – Layout da calculadora auxiliar para dimensionamento da área de aço a ser protegida.

Nos itens Resistividade Elétrica do Eletrólito (ρ), Fator de Velocidade (F), Eficiência do Revestimento (E), Tempo de vida do Sistema de Proteção Catódica (V), o programa disponibiliza um informativo sobre o significado de cada item, dados e tabelas necessários para o correto preenchimento de cada tópico (Figuras 17 a 20).

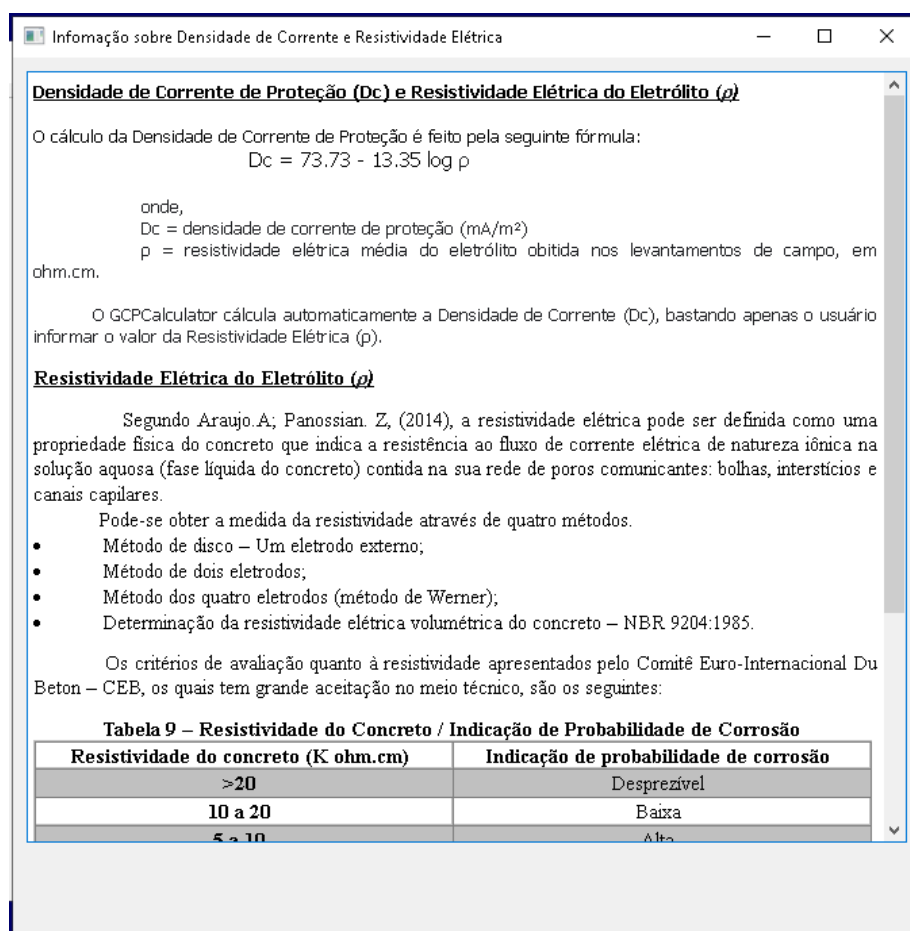


Figura 16 - Layout do informativo sobre Resistividade Elétrica e Densidade de Corrente de Proteção.

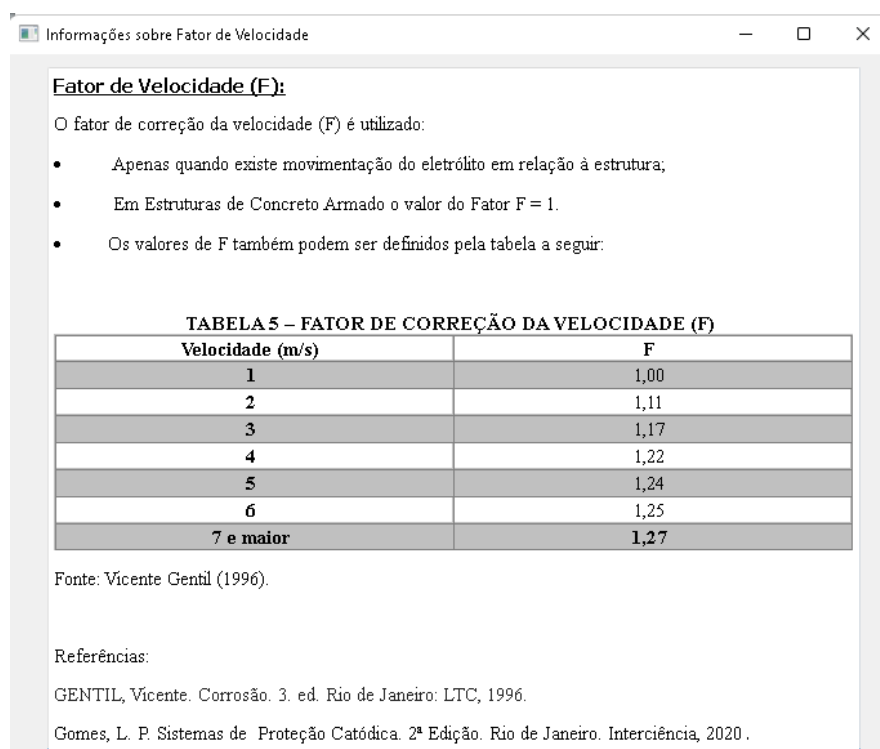


Figura 17 - Layout do informativo sobre Fator de Correção de Velocidade (F).

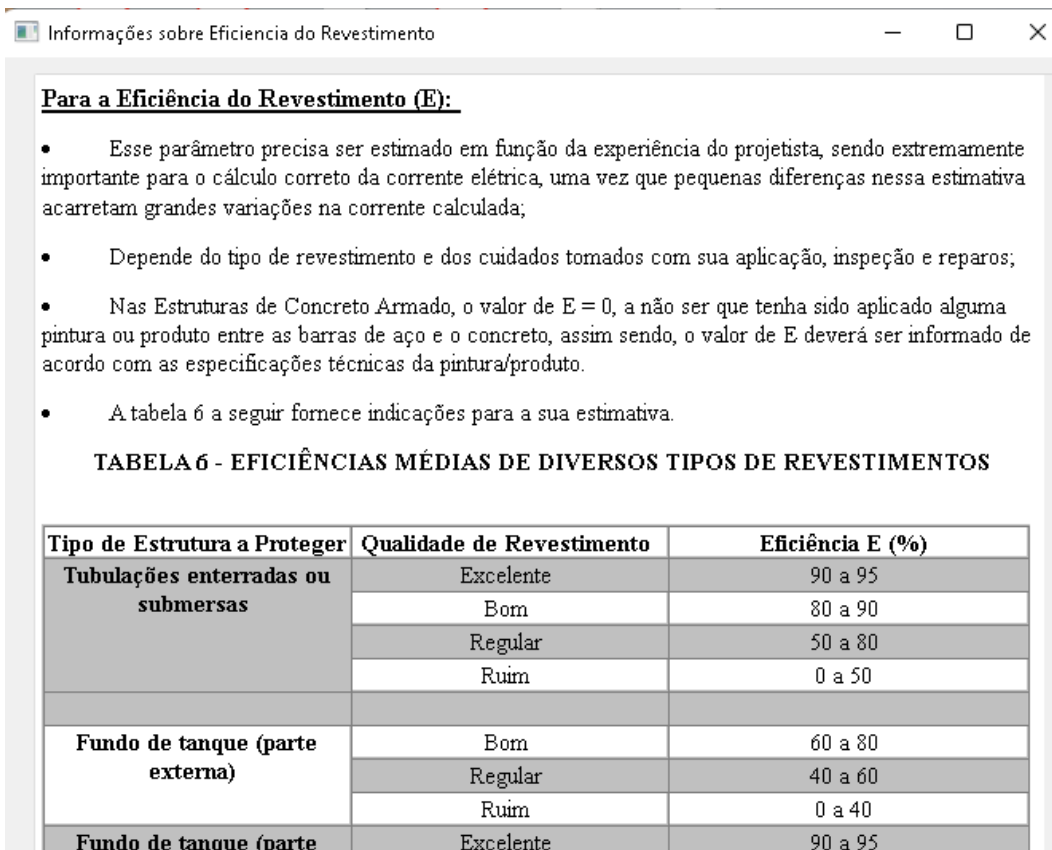


Figura 18 - Layout do informativo sobre Eficiência do Revestimento (E).

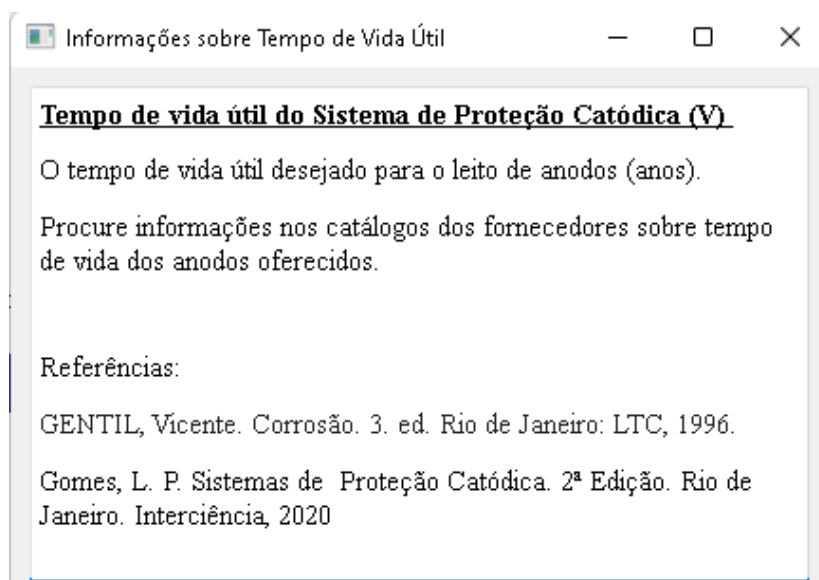


Figura 19 - Layout do informativo sobre Tempo de Vida Útil.

6.2 Discussão

6.2.1 Dimensionamento de um pilar usando o GCPCalculator.

O objeto em estudo é um pilar de concreto armado apresentado no dimensionamento manual no item 4 dessa dissertação.

Dados da estrutura:

- Armadura a ser protegida (Figura 21):

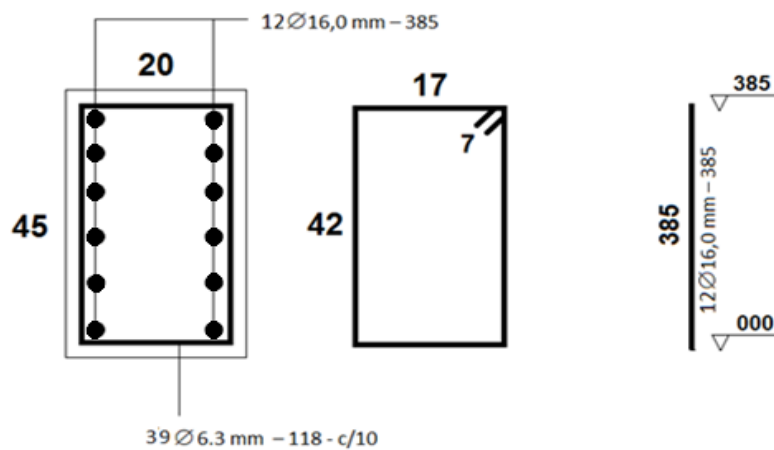


Figura 20 - Pilar em estudo.

- Resistividade elétrica adotada: 7500 ohm.cm;
- Fator de velocidade: 1;
- Eficiência do revestimento: 0;
- Tempo de vida do sistema de proteção catódica: 1 anos.

Calculando a armadura a ser protegida no GCPCalculator (Figura 22):

Calculadora Auxiliar para Área

Calculadora para área a ser protegida do Concreto Armado:

Atenção: Os números decimais deverão ser separados por ponto (.)

Ø Barra de Aço: (mm)	Comprimento: (cm)	Quantidade: (Und.)	Área: (m ²)
16 mm	385 cm	12 und.	2.32 m ²
6.3 mm	118 cm	39 und.	0.91 m ²
			0.00 m ²
			0.00 m ²
			0.00 m ²
			0.00 m ²
			0.00 m ²
			0.00 m ²
			0.00 m ²
			0.00 m ²
			0.00 m ²

Calcular

ÁREA TOTAL: 3.23 m²

Figura 21 - Cálculo da área na calculadora auxiliar do GCPCalculator.

Dimensionamento dos anodos galvânicos no GCPCalculator (Figura 23):

GCPCalculator

Programa desenvolvido por: Mota, A. L. R., Wrobel, L. C.
Rio de Janeiro, PUC-RJ

Dados da Estrutura: Atenção: Os números decimais deverão ser separados por ponto (.)

Área a ser protegida: 3.23 m² **Calculadora Auxiliar de Área**

Resistividade elétrica do eletrólito (ρ): 7500 $\Omega \cdot \text{cm}$ **Info**

Fator de correção de velocidade (F): 1 m/s **Info**

Eficiência do revestimento (E): 0 0-100% **Info**

Tempo de vida do Sistema de Proteção Catódica (V): 1 Anos **Info**

Calcular

Corrente Elétrica Requerida (Ireq):

71.05 mA ou 0.071 A

Quantidade de anodos galvânicos em kg:

Anodos de Zinco: 0.989 kg Anodos de Alumínio: 0.290 kg Anodos de Magnésio: 0.665 kg

Determinação do número de anodos, distribuição e fixação.

Figura 22 - Resultados obtidos no GCPCalculator.

Foi possível determinar que para proteger o pilar em estudo é necessária uma corrente de 71,05 mA ou 0,071 A, e para a obtenção dessa corrente, são necessários 0,989 kg de anodos de Zinco ou 0,290 kg de anodos de alumínio ou 0,665 kg de anodos de magnésio.

Ao procurar anodos disponíveis no mercado, foi escolhido o anodo de zinco, quadrado, de 0,100 kg de Zinco em seu núcleo anódico, com corrente liberada por anodo de 7,18 mA.

A determinação da quantidade de anodos é dada pela Fórmula 23:

$$N = \frac{M}{m} \quad (23)$$

sendo,

N = número de anodos;

M = massa de anodo requerida, em kg;

m = massa unitária do anodo escolhido, em kg;

Obtendo assim:

$$N = \frac{0,989}{0,100} = 9,89 \cong 10 \text{ anodos}$$

Outra maneira possível de se obter a quantidade de anodos é através da corrente requerida I_{req} e a corrente liberada pelo anodo escolhido, utilizando a Fórmula 22.

$$N = \frac{I_{req}}{I_{lib}} \quad (22)$$

sendo,

N = número de anodos;

I_{req} = corrente requerida, em kg;

I_{lib} = corrente liberada pelo anodo escolhido, em kg;

obtendo assim:

$$N = \frac{71,05}{7,18} = 9,89 \cong 10 \text{ anodos}$$

Deve ser feita uma verificação da corrente liberada pelo leito de anodos, para isso basta verificar, no catálogo do fabricante, qual a corrente indicada para cada tipo de anodo, multiplicando o valor pelo número total de anodos, obtendo assim a corrente total liberada pelos anodos, que deve ser igual ou maior que a corrente total necessária.

Para calcular a distribuição dos anodos no pilar, divide-se a área da malha de aço pelo número de anodos a ser utilizado (Fórmula 23):

- Área superficial: 5,005 m².
- Número de anodos calculado: 10 anodos.

$$\text{Área de atuação} = \frac{5,005}{10} \quad (31)$$

1 anodo a cada 0,50 m², ou seja, um raio de atuação de 0,398 m ou 39,8 cm, encontrando o mesmo resultado obtido no cálculo manual no item 4 desta dissertação.

6.3 Conclusão

O programa GCPCalculator foi testado comparando resultados de exercícios publicados pela Petrobras e universidades, além dos livros de proteção catódica

[10][12], e pela empresa IEC Engenharia e Instalações, se mostrando com resultados muito bons, e úteis para a prática.

O programa também se mostrou útil para outros tipos de estruturas, não somente concreto armado.

Por fim, cabe ressaltar a importância do monitoramento periódico das zonas de corrosão, pois a resistividade do concreto poderá sofrer alterações e/ou variações no sistema de proteção escolhido.

7

Conclusões e sugestões de novos estudos

A corrosão é a patologia mais significativa nas estruturas de concreto armado; assim, encontrar soluções concretas que previnam ou que auxiliem na sua recuperação é de grande valia para a Construção Civil. Das diversas formas que vem sendo apresentadas no mercado e em pesquisas, a Proteção Catódica tem se mostrado a mais eficiente entre elas.

O estudo e aplicação da Proteção Catódica em estruturas de concreto armado ainda é muito recente, porém vem sendo desenvolvido de forma crescente recebendo muitos incentivos de pesquisas. Observou-se durante a pesquisa, que os benefícios do uso da Proteção Catódica, seu baixo custo em relação ao tempo de sua durabilidade com os métodos já existentes são satisfatórios. Pode-se observar também, que a utilização de anodos galvânicos na prevenção contra a corrosão, se torna muito mais econômica, em comparação com o custo de uma futura recuperação.

A entrevista com estudantes e profissionais da construção civil, demonstrou um déficit no ensino de patologias no concreto armado, em especial formas de combate a elas, sinalizando a comunidade acadêmica a necessidade de novas implantações e metodologias voltadas para essa área.

Como pode ser observado pelo experimento da talhadeira de aço, o sistema de proteção catódica eliminou completamente a corrosão da ferramenta, confirmando assim, excelente resultado para a recuperação de materiais feitos de aço, podendo ser usado como mecanismo para recuperar diversos tipos de estruturas, como barras de aço em concreto armado, estruturas metálicas, ferramentas, entre outros materiais que sofreram processos corrosivos durante a sua vida útil.

O uso de tecnologia e software na engenharia tem se tornado cada vez mais relevante e presente no dia a dia da construção civil. O programa GCPCalculator, se mostrou funcional e didático, obteve resultados precisos quando comparados a

exercícios apresentados na literatura, e o próprio cálculo do estudo de caso apresentado nesta dissertação.

O programa pode ser aplicado de forma acadêmica, em cursos de proteção catódica, nas aulas da graduação em matérias de patologias e cursos de pós-graduação. Além de ser aplicado de forma comercial pela indústria.

A partir das pesquisas realizadas sugere-se os seguintes temas para pesquisas futuras:

- A realização de experimentos práticos em laboratório para melhor refinamento das fórmulas apresentada;
- Pesquisa de novos materiais como uso de anodo de sacrifício;
- O desenvolvimento de ábacos para uma qualificação mais refinada da classe de agressividade ambiental onde a estrutura a ser protegida se encontra;
- Influência da variação do cobrimento na quantidade de anodos necessários para a proteção catódica.

8

Referências

- 1 CARMONA, J., GARCÉS, P., & CLIMENT, M. A. (2015). Efficiency of a conductive cement-based anodic system for the application of cathodic protection, cathodic prevention and electrochemical chloride extraction to control corrosion in reinforced concrete structures. **Corrosion Science**, 96, 102-111.
- 2 OLEIWI, H. M., WANG, Y., CURIONI, M., CHEN, X., YAO, G., AUGUSTHUS-NELSON, L., ... & SHABALIN, I. (2018). An experimental study of cathodic protection for chloride contaminated reinforced concrete. **Materials and Structures**, 51(6), 148.
- 3 YOUNIS, A., EBEAD, U., SURANENI, P., & NANNI, A. (2020). Cost effectiveness of reinforcement alternatives for a concrete water chlorination tank. **Journal of Building Engineering**, 27, 100992.
- 4 G. KOCH, J. VARNEY, N. THOMPSON, O. MOGHISSI, M. GOULD, J. PAYER, International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study (IMPACT). <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>, 2016.
- 5 CRAMER, S. D., COVINO JR, B. S., BULLARD, S. J., HOLCOMB, G. R., RUSSELL, J. H., NELSON, F. J., ... & SOLTESZ, S. M. (2002). Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges. **Cement and Concrete Composites**, 24(1), 101-117.
- 6 WROBEL, L. C. The boundary element method. [s. l.]: **Wiley**, 2002. ISBN 0470842989.
- 7 Polder, R. B. (1998). Cathodic protection of reinforced concrete structures in The Netherlands-experience and developments. **Book-Institute of Materials**, 710, 172-183.
- 8 WILSON, K., JAWED, M., & NGALA, V. (2013). The selection and use of cathodic protection systems for the repair of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, 39, 19-25.
- 9 BERTOLINI, L., BOLZONI, F. A. B. I. O., CIGADA, A., PASTORE, T., & PEDEFERRI, P. (1993). Cathodic protection of new and old reinforced concrete structures. **Corrosion Science**, 35(5-8), 1633-1639.

- 10 GOMES, L. P. Sistemas de Proteção Catódica. 2ª Edição. Rio de Janeiro. **Interciência**, 2020.
- 11 CORROSÃO E MANUTENÇÃO DO CONCRETO E SUAS ARMADURAS. **Revista Corrosão&Proteção - ABRACO** – Rio de Janeiro: ABRACO, Nº 55, Ano 12. P. 10-23, Fev/Mar 2015. Disponível em: <www.abraco.org.br/src/uploads/2015/10/Revista-corrosao-e-protecao-55.pdf>. Acesso: 22/09/2021.
- 12 GENTIL, VICENTE. Corrosão. 3ª Edição. Rio de Janeiro. **LTC**, 2020.
- 13 JING, X., & WU, Y. (2011). Electrochemical studies on the performance of conductive overlay material in cathodic protection of reinforced concrete. **Construction and building materials**, 25(5), 2655-2662.
- 14 WANG, F., XU, J., XU, Y., JIANG, L., & MA, G. (2020). A comparative investigation on cathodic protections of three sacrificial anodes on chloride-contaminated reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, 246, 118476.
- 15 RODRIGUES, J. C. Anodos de Sacrício para Proteção Catódica em Estruturas de Concreto Armado. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 2005.
- 16 TELLES, J. C. F., MANSUR, W. J., WROBEL, L. C., & MARINHO, M. G. (1990). Numerical simulation of a cathodically protected semisubmersible platform using the procat system. **Corrosion**, 46(6), 513-518.
- 17 WROBEL, L. C., & MILTIADOU, P. (2004). Genetic algorithms for inverse cathodic protection problems. **Engineering analysis with boundary elements**, 28(3), 267-277.
- 18 MILTIADOU, P., & WROBEL, L. C. (2003). Identification of coating defects in cathodically protected underground pipelines. **International journal for numerical methods in engineering**, 58(6), 913-932.
- 19 ARAÚJO, A.; PANOSSIAN, Z.; LOURENÇO, Z. Proteção Catódica De Estruturas De Concreto – Revista IBRACON de Estruturas e Materiais – São Paulo: **SCIELO**. Vol. 6,Nº2.Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952013000200002>. Acesso em 22/05/2021.