



**ANÁLISE DE VIDA ÚTIL DE ÂNODOS DE ZINCO INCORPORADOS
EM REPAROS DE ESTACAS EM ZONA DE VARIAÇÃO DE MARÉ**

SÃO PAULO
2014



CAROLINA ESTEVES COLOMBO
KARINA CAVALCANTE DE OLIVEIRA
RODRIGO FORGIARINI LUCCA

**ANÁLISE DE VIDA ÚTIL DE ÂNODOS DE ZINCO INCORPORADOS
EM REPAROS DE ESTACAS EM ZONA DE VARIAÇÃO DE MARÉ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação *lato sensu* em Patologia das Obras Civas, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Civas.

Orientador: Prof. Msc. Luís César Siqueira De Luca.

Co-orientador: Prof. M.Sc. Thomas Carmona.

SÃO PAULO
2014

AGRADECIMENTOS

Nossos sinceros agradecimentos a todos aqueles que nos ajudaram na elaboração deste trabalho, desde as tarefas mais simples as mais complexas, pois sem eles não teríamos atingido nosso objetivo.

Em especial, gostaríamos de agradecer às seguintes pessoas e empresas:

À nossa família, pelo apoio, paciência e compreensão.

Ao professor e orientador Luís César Siqueira De Luca pela valiosa orientação, motivação e colaboração no decorrer do trabalho.

Ao professor e co-orientador Thomas Carmona, que graças ao seu incentivo pessoal e conhecimento técnico nos alavancou para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos ex-alunos do Instituto IDD, Camila Mendes de Mattos, Douglas Lopes Guilhem e Eriston Carlos da Paixão, que em 2010 realizaram um trabalho sobre a *Avaliação de Durabilidade de Ânodos de Sacrifício Aplicados em Estrutura de Concreto Armado em Zona de Variação de Maré*, o qual foi um trabalho pioneiro no Brasil referente à vida útil de ânodos de sacrifício.

Ao professor Mauro Ramon pela colaboração na revisão.

Às empresas EXATA Engenharia na figura de Netto, NOVATA Engenharia, Terminal Marítimo do Guarujá (TERMAG), Terminal de Granéis do Guarujá (TGG) e CONCREMAT Engenharia pela disponibilidade, colaboração e suporte ao trabalho de campo.

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE VIDA ÚTIL DE ÂNODOS DE ZINCO INCORPORADOS EM REPAROS DE ESTACAS EM ZONA DE VARIAÇÃO DE MARÉ

Por

CAROLINA ESTEVES COLOMBO
KARINA CAVALCANTE DE OLIVEIRA
RODRIGO FORGIARINI LUCCA

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS
OBRAS CIVIS, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

São Paulo (SP) 28 de Novembro de 2014.

Luís César Siqueira De Luca

Cesar Henrique Sato Daher

André Tadeu Moreno Figueiró

RESUMO

A corrosão das armaduras tem influência na durabilidade e na estabilidade das estruturas de concreto armado, podendo reduzir sua segurança e capacidade de serviço. Observa-se que a ocorrência desta manifestação patológica é significativa e sua recuperação é dispendiosa. Na construção civil, um dos métodos empregados para retardar a corrosão é a proteção catódica galvânica, inserindo-se ânodos de sacrifício de zinco. Portanto, ter conhecimento sobre a vida útil dos ânodos é essencial para projetá-los de forma apropriada, prevendo possíveis manutenções nas estruturas de concreto armado. Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa, através de um estudo de caso de 2010, de uma proteção catódica em estacas de concreto armado de um píer. Traz resultados de previsão de vida útil de ânodos de sacrifício de zinco, calculados pela fórmula decorrente da Lei de Faraday. Para tanto, após quatro anos da recuperação das estacas, foram realizadas leituras da corrente dos ânodos e medidas sua perda de massa. Os resultados mostram diferenças relevantes entre os valores iniciais e atuais da corrente elétrica, consequentemente da vida útil, com uma perda de massa variando entre 15% e 32%. Confirmou-se que há uma proporcionalidade no aumento de corrente com a perda de massa.

Palavras chave: corrosão, proteção catódica, ânodos de sacrifício, vida útil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de mecanismo de um ânodo de sacrifício (ÁVILA e GENESCÁ, 1995).	22
Figura 2 – Esquema de uma pilha de corrosão quando presente em um trecho de armadura.	26
Figura 3 - Diagrama de pH de Pourbaix para o Ferro (Fe). (SOUSA, 2014)	27
Figura 4 - Detalhe de um ânodo de sacrifício de zinco. (SERGI e PAGE, 1999)	29
Figura 5 – Gráfico da corrente galvânica x temperatura (SERGE, 2009).	37
Figura 6 - Modelo de formação de macrocélulas de corrosão devido a presença de fissura (ANDRADE, 1988).	38
Figura 7 - Potencial natural, capacidade de corrente e densidade dos anodos de sacrifício (GENTIL, 1996).	42
Figura 8 – Vista aérea. (GOOGLE MAPS, 2014).	46
Figura 9 – Vista aérea do Terminal de Granéis do Guarujá (TGG, 2014).	47
Figura 10 – Projeto esquemático do TGG (EXATA, 2005).	47
Figura 11 – Vista geral do píer (Acervo pessoal, 2014).	48
Figura 12 – Vista geral das estacas (Acervo Pessoal, 2014).	48
Figura 13 – Detalhe das estacas recuperadas e monitoradas (EXATA, 2005). ..	50
Figura 14 – Detalhe da pastilha utilizada na proteção catódica (VECTOR, 2014).	50
Figura 15 – Detalhe do projeto de encamisamento parcial das estacas (EXATA, 2005).	51
Figura 16 – Detalhe do projeto dos ânodos de sacrifício de zinco (distribuição e montagem). (EXATA, 2005).	52
Figura 17 – Vista em perspectiva do projeto dos ânodos de sacrifício de zinco (distribuição) (EXATA, 2005).	52
Figura 18 – Vista geral das pastilhas inseridas na estrutura (EXATA, 2010). ...	53

Figura 19 – Vista em planta do projeto dos ânodos de sacrifício de zinco (raio de influência) (MATTOS <i>et al.</i> , 2010).....	53
Figura 20 – Detalhe do dispositivo para leitura da corrente. (MATTOS <i>et al.</i> , 2010).....	54
Figura 21 – Detalhe do dispositivo para leitura da corrente (MATTOS <i>et al.</i> , 2010).....	54
Figura 22 – Detalhe do dispositivo instalado na estaca (MATTOS <i>et al.</i> , 2010).	55
Figura 23 – Detalhe da leitura sendo realizada através do dispositivo instalado (MATTOS <i>et al.</i> , 2010).	55
Figura 24 – Detalhe da medição da corrente na estaca E-353 (Acervo pessoal, 2014).....	58
Figura 25 – Vista geral da prospecção da estaca E-324 (Acervo pessoal, 2014).	59
Figura 26 – Detalhe do ânodo que foi removido presente na estaca E-324 (Acervo pessoal, 2014).....	59
Figura 27 – Vista geral dos ânodos sendo aferidos através de pesagem (Acervo pessoal, 2014).	60
Figura 28 – Vista geral da estaca E-324, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).	61
Figura 29 – Estaca E-317, sem anomalias aparentes na estaca, porém com infiltração na parte superior, com presença de microrganismo (fungos e limo) (Acervo pessoal, 2014).....	62
Figura 30 – Vista geral da estaca E-310, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).	62
Figura 31 – Vista geral da estaca E-303, sem anomalias aparentes, porém com infiltração na parte superior, com presença de limo e fungos (Acervo pessoal, 2014).....	62
Figura 32 – Vista geral da estaca E-226, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).	63

Figura 33 – Estaca E-339, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).	63
Figura 34 – Vista geral da estaca E-346, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).	63
Figura 35 – Vista geral da estaca E-353, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).	64
Figura 36 – Vista geral da estaca E-354, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).	64
Figura 37 – Detalhe dos ânodos removidos nas estacas (Acervo pessoal, 2014).	65
Figura 38 – Resultados das correntes aferidas em 2010 e 2014 (Acervo pessoal, 2014).	67
Figura 39 – Resultados das correntes aferidas em 2010 e 2014 (Acervo Pessoal, 2014).	67
Figura 40 – Resultados das médias das correntes aferidas em 2010 e 2014 (Acervo Pessoal, 2014).	68
Figura 41 – Correlação entre a perda de massa e a medição corrente atual (Acervo Pessoal, 2014).	69
Figura 42 - Gráfico Estimado da Vida Útil Residual em 2014.	70
Figura 43 - Gráfico do Fluxo das Correntes (Acervo pessoal, 2014).	72
Figura 44 - Gráfico Estimado da Vida Útil.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Série Galvânica Prática (GENTIL, 1996).	28
Tabela 2 - Resumo dos resultados obtidos em 2010. (MATTOS <i>et al</i> , 2010). ...	56
Tabela 3 – Resumo das leituras obtidas das correntes realizadas de 2010 e 2014 (Acervo pessoal, 2014).	66
Tabela 4 - Cálculo Estimado da Vida Útil Residual em 2014 (Acervo pessoal, 2014).	70
Tabela 5 - Cálculo Estimado da Corrente Representativa do período de 2010 a 2014 (Acervo pessoal, 2014).	71
Tabela 6 - Cálculo das Estimativas de Vida Útil.	73

LISTA DE EQUAÇÕES

(Equação 1 – Sistema de uma pilha)	21
(Equação 2 – Primeira Lei de Faraday).....	40
(Equação 3 – Cálculo da taxa de massa consumida).....	41
(Equação 4 – Equação para cálculo da vida útil pelas Leis de Faraday)	41
(Equação 5 – Cálculo da vida útil pelo método de Gentil)	42
(Equação 6 – Correspondência entre equações de Gentil e Faraday)	43
(Equação 7 – Equação comparativa).....	43
(Equação 8 – Equivalência de Equações).....	44

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
FOLHA DE APROVAÇÃO	4
RESUMO.....	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	6
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE EQUAÇÕES	10
SUMÁRIO	11
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	14
1.2. OBJETIVOS.....	14
1.2.1. Objetivo Geral	15
1.2.2. Objetivos Específicos	15
1.3. HIPÓTESE	15
1.4. JUSTIFICATIVAS	15
1.4.1. Tecnológicas.....	16
1.4.2. Econômicas	16
1.4.3. Sociais	17
1.4.4. Ecológicas	18
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	18
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. CORROSÃO DE ARMADURAS	20
2.1.2. SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO.....	24
2.1.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NA DURABILIDADE DOS ÂNODOS	32
2.2. DETERMINAÇÃO DA DURABILIDADE ATRAVÉS DO CÁLCULO DA VIDA ÚTIL	39
2.2.1. LEI DE FARADAY	39

2.2.2. MÉTODO GENTIL	42
3. ESTUDO DE CASO	45
3.1. HISTÓRICO.....	45
3.2. LOCALIZAÇÃO	46
3.3. CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA	46
3.4. CARACTERÍSTICAS DO PROJETO DE RECUPERAÇÃO E DE MONITORAMENTO DOS ÂNODOS.....	49
3.5. RESULTADOS OBTIDOS EM 2010	55
3.6. METODOLOGIA UTILIZADA EM 2014.....	56
3.6.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	57
3.6.2. INSPEÇÃO VISUAL NAS ESTACAS.....	57
3.6.3. MEDIÇÃO DA CORRENTE GALVÂNICA	57
3.6.4. PROSPECÇÃO NAS ESTACAS E AFERIÇÃO DA MASSA DO ÂNODO	58
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
4.1. INSPEÇÃO VISUAL.....	61
4.2. TEMPERATURA	65
4.3. CORRENTE ELÉTRICA	66
4.4. CONSUMO DA MASSA DOS ÂNODOS DE SACRIFÍCIO	68
4.5. CÁLCULO DA VIDA ÚTIL DOS ÂNODOS	69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
6. REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

A corrosão constitui uma das principais manifestações patológicas que limitam a vida útil de uma estrutura em concreto armado. No Brasil, ainda são poucos os dados estatísticos e pesquisas disponíveis recentes sobre a ocorrência de corrosão. Carmona Filho e Marega (1989) citam que 27% de casos de patologia em diferentes regiões do Brasil possuem problemas de corrosão de armaduras.

Esta manifestação patológica pode interferir na capacidade resistente da armadura, além da perda de aderência entre o concreto e o aço, desagregação do concreto e fissuração, entre outras patologias (SOUZA e RIPPER, 1998).

Dessa forma sua presença é um problema crítico, que pode comprometer severamente a segurança e a capacidade de serviço das estruturas. Como medidas para combater a corrosão em diversas estruturas, Gentil (2003) cita o emprego de inibidores, revestimentos protetores metálicos, proteção catódica e proteção anódica.

Dutra (1988) afirma que, dentre os métodos disponíveis para o controle da corrosão, a proteção catódica assume papel de destaque pela eficiência e menor custo com que protege as estruturas metálicas contaminadas. Na construção civil, o método mais comumente empregado para combater a corrosão é a proteção através de ânodos de sacrifício de zinco.

Um dos modelos que pode direcionar a previsão da vida útil dos ânodos de sacrifício é baseado nos princípios da Lei de Faraday e existe ainda uma referência brasileira, calculada pelo Método Gentil, de Vicente Gentil.

Diversos fatores, como temperatura, umidade, agressividade do ambiente, qualidade do concreto, podem influenciar na previsão de vida útil dos ânodos de sacrifício, por meio de interferências não previstas em projetos.

No Brasil, a manutenção das estruturas ainda não faz parte dos hábitos de boas práticas da engenharia. Poucas entidades investem em ações de melhorias para as estruturas civis existentes.

Para tanto, este trabalho apresenta modelos de previsão de vida útil de ânodos de sacrifício de zinco instalados em estruturas de concreto armado, assim como a análise de vida útil da proteção catódica.

Como referência para o presente trabalho, deu-se continuidade aos estudos apresentados por Camila Mattos, Douglas Guilhem e Eriston Paixão, no Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Pós Graduação em Patologia das Obras Civis em 2010, do Instituto IDD: *“Avaliação da durabilidade de ânodos de sacrifício aplicados em estrutura de concreto armado em zona de variação de maré”*.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A previsão da estimativa de vida útil calculada pela fórmula baseada na Lei de Faraday no momento da instalação do sistema de proteção catódica em 2010 é a mesma prevista com dados analisados em 2014?

1.2. OBJETIVOS

Neste item apresentam-se os objetivos gerais e específicos da pesquisa a ser desenvolvida.

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar comparativamente os resultados de previsão da vida útil de ânodos de sacrifício de zinco através de um estudo de caso.

1.2.2. Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, serão apresentados os principais aspectos envolvidos no problema em questão, dentre estes:

- a) Realizar uma extensa revisão bibliográfica sobre o tema, identificando os fatores de influência na durabilidade e quais métodos para previsão da vida útil;
- b) Avaliar a vida útil dos ânodos de sacrifício instalados na estrutura, com base dos resultados medidos *in loco* em 2014, considerando os fatores externos envolvidos.

1.3. HIPÓTESE

Supõe-se que as previsões de vida útil da proteção catódica calculadas em 2010 sejam superiores às calculadas com base nos dados de 2014.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Neste item apresentam-se as justificativas para a pesquisa, a saber: tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas.

1.4.1. Tecnológicas

Helene (2014) afirma que desde a década de 90, a comunidade técnica mundial tem-se dedicado aos problemas de corrosão de armaduras, buscando melhores soluções para especificações e projetos de obras novas, reparos ou reforços. Ele ainda defende que o estudo de corrosão das armaduras é um tema de grande importância atual para o desenvolvimento da engenharia.

No caso da realização de reparos e recuperações de corrosão é necessário o conhecimento técnico atualizado e abrangente do problema, requerendo materiais e técnicas específicas.

Desta forma, o presente trabalho tem por finalidade ampliar o conhecimento técnico de forma a apresentar melhores parâmetros para fundamentar projetos de recuperação de armaduras corroídas através do estudo dos critérios para avaliação da vida útil de ânodos de sacrifício de zinco.

1.4.2. Econômicas

As perdas econômicas com o processo de corrosão são frequentes na construção civil. Segundo Gentil (2003), as perdas diretas são custos com a substituição de peças que sofreram corrosão, incluindo energia e mão-de-obra e com a manutenção do processo de corrosão.

Deve-se também levar em consideração que o procedimento de recuperação de armaduras corroídas é de complicada execução se comparados com os demais procedimentos de recuperação existentes; principalmente pelo fato de provocar uma etapa destrutiva do concreto, e eventualmente da própria armadura.

Ressalta-se também, que a aderência entre o concreto novo e o concreto existente, etapa consequente desse procedimento, é essencial para garantir a eficiência do reparo. Além disso, a colocação adequada das barras ou a

sua limpeza correta também fazem parte das variáveis que podem interferir na qualidade do reparo.

Quando se utiliza ânodos de sacrifício como proteção catódica, o dimensionamento correto é um dos fatores determinantes para a eficiência da aplicação do método. Assim, torna-se necessário que o dimensionamento e consequente tempo de atuação dos ânodos sejam estimados o mais próximo da realidade; evitando-se custos e retrabalhos desnecessários e, principalmente garantindo a segurança da estrutura recuperada.

1.4.3. Sociais

A principal questão social envolvida em processos de corrosão de armadura ou até uma adequada estimativa de vida de um sistema de recuperação de armaduras corroídas é o aspecto de segurança das estruturas e, assim consequentemente, a segurança dos usuários.

Em novembro de 2007, durante uma partida de futebol, parte da arquibancada do anel superior da Fonte Nova desabou, estádio localizado na cidade de Salvador, no estado da Bahia. Na ocasião, como relatado pelo Jornal O Globo, 07 (sete) pessoas morreram e outros 87 torcedores ficaram feridos. Segundo o Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia da Bahia (CREA-BA) o acidente ocorrido decorreu de colapso da estrutura da laje, mais especificamente, nos pontos de engaste com a face inferior da viga, devido à corrosão na armadura de ligação entre as duas superfícies (da viga e da laje). Esse exemplo mostra que o resultado de uma corrosão na estrutura, pode levá-la ao colapso e assim levar à morte ou ferimentos de pessoas.

Além disso, deve-se ainda levar em consideração que muitas das obras de concreto armado são monumentos históricos e sua preservação assegura parte de nossa memória histórica e cultural.

1.4.4. Ecológicas

Refazer reparos, ou até mesmo fazer uma nova estrutura, em substituição a uma colapsada ou condenada, bem como posteriormente realizar novamente o tratamento de proteção de uma estrutura, geram resíduos desnecessários. Além disso, são utilizados mais recursos naturais que não precisariam ser consumidos do meio ambiente.

Propõe-se no presente trabalho, uma avaliação da vida útil dos ânodos de sacrifício de zinco de forma a dimensionar melhor a utilização dos mesmos. Assim, evita-se refazer reparos ou reconstruir peças que sofreram com o processo de corrosão e colapsaram.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para abranger os objetivos desta pesquisa, serão realizados os seguintes procedimentos metodológicos:

- a) Ampla revisão bibliográfica para embasar o conteúdo apresentado;
- b) Consulta de documentos existentes para subsidiar a realização do trabalho, tais como projetos da estrutura e medidas realizadas anteriormente; e
- c) Realização de ensaios em campo, tais como: determinação da corrente galvânica da pastilha; análise visual das condições das estacas de concreto armado; análise das pastilhas de zinco para verificação da massa residual.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho será dividido em cinco capítulos.

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como delinea as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica e discorre sobre os mecanismos de corrosão e os fatores que influenciam na vida útil dos ânodos de sacrifício de zinco.

O **Capítulo 3** trata sobre o estudo de caso, com o histórico e a descrição da estrutura, metodologia empregada, apresentando os ensaios realizados para subsidiar a análise.

O **Capítulo 4** apresenta a análise dos resultados obtidos em 2014 em comparação com os de 2010, utilizando o modelo de previsão de vida útil baseado na Lei de Faraday.

O **Capítulo 5** apresenta as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada uma revisão bibliográfica referente à proteção catódica, através de ânodos de sacrifício de zinco, para combater o processo de corrosão em estruturas de concreto armado, com finalidade de subsidiar teoricamente a análise comparativa entre a vida útil estimada destes ânodos de sacrifício instalados em reparos de estacas localizadas em região marítima.

2.1. CORROSÃO DE ARMADURAS

As estruturas de concreto armado são projetadas e executadas para manter condições mínimas de segurança, estabilidade e funcionalidade durante um determinado tempo de vida útil, sem custos antevistos de manutenção e reparos (GENTIL, 2007).

No entanto, o processo de corrosão no concreto armado, compromete severamente a estabilidade e durabilidade da estrutura (RODRIGUES, 1994). Podendo afetar a capacidade portante dos componentes estruturais, em função da perda de seção transversal das armaduras, da perda de aderência entre o aço e o concreto e da fissuração deste (HELENE, 2003).

Segundo Gentil (2003), admite-se que a armadura esteja protegida quando inserida no concreto, devido a barreira de ação da massa do concreto e sua alta alcalinidade decorrente principalmente da formação de hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$, durante o processo de hidratação do cimento, ocorrendo um pH neutro, em torno de 12,5.

O mecanismo de corrosão pode ser compreendido considerando-se uma célula eletrolítica ou galvânica, que consiste num sistema que envolve dois eletrodos e dois tipos de reações químicas: uma que fornece e outra que consome elétrons. Para manter a neutralidade elétrica e sustentar as reações químicas, a

transferência de carga elétrica ocorre através de caminhos internos e externos, conectando os dois eletrodos onde estas reações acontecem. Os elétrons fluem por uma conexão externa e os íons fluem entre as duas soluções que circundam os eletrodos (GENTIL, 2003).

Rodrigues (2005) indica que, basicamente, uma pilha eletroquímica apresenta os seguintes componentes:

- a) Ânodo: eletrodo em que há oxidação (corrosão) e onde a corrente elétrica, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito;
- b) Eletrólito: condutor contendo íons que transportam a corrente elétrica do ânodo para o cátodo;
- c) Cátodo: eletrodo onde a corrente sai do eletrólito ou o eletrodo no qual as cargas negativas (elétrons) provocam reações de redução;
- d) Circuito metálico: ligação metálica entre o ânodo e o cátodo por onde escoam os elétrons, no sentido ânodo-cátodo.

Retirando-se um desses componentes elimina-se a pilha e, conseqüentemente, diminui a possibilidade de corrosão. Evidentemente, pode-se retirar o cátodo, a ligação metálica ou o eletrólito. O ânodo, sendo a própria estrutura metálica que se deseja proteger, não pode ser retirado, então aplica-se nele revestimento protetor e/ou proteção catódica (RODRIGUES, 2005).

A corrente elétrica convencional tem sentido contrário ao do elétron. Considerando o sentido convencional, o cátodo é o eletrodo negativo (–) e o ânodo o positivo (+); no sentido real os sinais são contrários, isto é, ânodo (–) e cátodo (+). A pilha é caracterizada por uma diferença de potencial entre seus eletrodos, em circuito aberto – é a sua força eletromotriz. Ela é igual a:

$$E_{\text{pilha}} = E_{\text{cátodo}} - E_{\text{ânodo}}$$

(Equação 1 – Sistema de uma pilha)

Onde $E_{\text{cátodo}}$ e $E_{\text{ânodo}}$ são os potenciais de redução dos eletrodos (GENTIL, 2003). Na Figura 1 demonstra-se o esquema explicado anteriormente (ÁVILA e GENESCÁ, 1995).

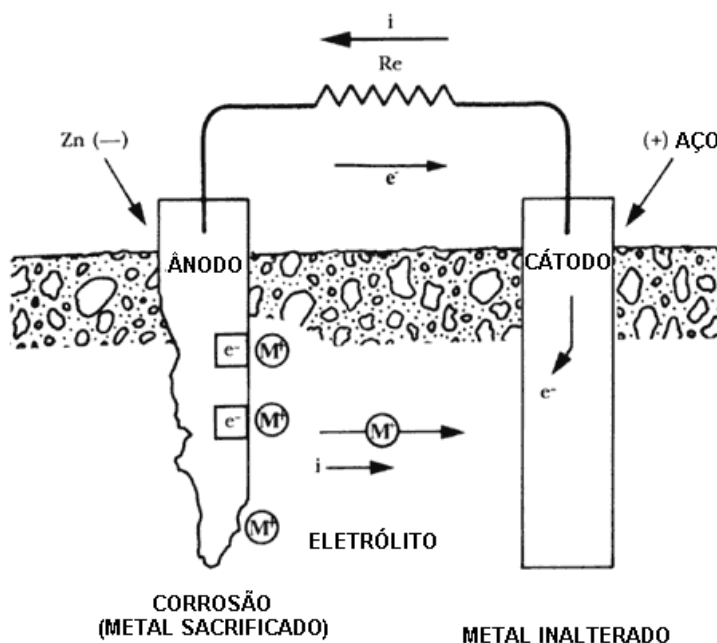


Figura 1 - Esquema de mecanismo de um ânodo de sacrifício (ÁVILA e GENESCÁ, 1995).

Helene (2003) mostra que os fatores que afetam a corrosão estão associados essencialmente às características do concreto, ao meio ambiente e à disposição das armaduras nos componentes estruturais afetados.

De acordo com diversos autores, a corrosão das armaduras pode, porém, ser induzida pela carbonatação do concreto ou pela penetração de cloretos (PEDEFERRI E BERTOLINI, 1996, 2000; TUTTI, 1982; SCHIESSL, 1998; EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE AND TECHNOLOGY, 1996, 2000).

Helene (2003) afirma que os produtos de corrosão do aço ocupam um volume que é superior ao do metal original. A acumulação destes produtos na interface entre o aço e o concreto gera tensões de tração neste último, que provocam a fissuração e o posterior desprendimento do revestimento.

Os danos causados pela corrosão de armaduras geralmente manifestam-se através de fissuras no concreto paralelas à direção do reforço e deslocamento do cobrimento. Em componentes estruturais que apresentam um elevado teor de umidade, os primeiros sintomas de corrosão evidenciam-se por meio de manchas de óxido na superfície do concreto (HELENE, 2003).

O tempo do surgimento de fissuras depende essencialmente da qualidade e da espessura do cobrimento do concreto, assim como do diâmetro e do posicionamento da armadura e do tipo de produto de corrosão gerado (HELENE, 2003).

Nos itens subsequentes estão descritos os dois tipos de ataque de ocorrência mais comum nas estruturas de concreto armado.

2.1.1.1. Ataque por cloretos

A presença de uma concentração crítica de íons cloreto em contato com a superfície da armadura provoca a despassivação do aço e a corrosão localizada deste por pites. O valor da concentração depende de diversos fatores, tais como o pH, o teor de aluminato tricálcico (C_3A) no cimento e, em alguns casos, do teor de umidade do concreto (HELENE, 2003).

Atualmente, as normas de projeto impõem limites estritos à quantidade de cloretos que podem ser introduzidos no concreto durante a construção através do cimento, da água da massa, dos agregados ou dos aditivos. O risco de corrosão por cloretos é, assim, associado à penetração dos cloretos através do cobrimento (BERTOLINI, 2010).

Helene (2003), admite que o valor do teor crítico de cloretos (expresso como cloretos totais ou solúveis em ácido) geralmente adotado na prática é de 0,4% em peso, com relação ao teor de cimento do concreto.

O ingresso de íons cloretos para o interior do concreto pode ser decorrente da interação com o meio ambiente, ao emprego de sais de degelo ou à

utilização de aditivos e/ou agregados contendo este tipo de íons durante a produção do concreto (HELENE, 2003).

2.1.1.2. Perda de alcalinidade do concreto

A diminuição do pH do concreto ($\text{pH} \leq 9$) provoca a perda da passividade do aço. Este processo pode ocorrer como resultado da lixiviação das substâncias alcalinas existentes nos poros do concreto ou mesmo devido ao processo de carbonatação, que ocorre como resultado da reação química entre o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , e outros álcalis (sódio e potássio) presentes na solução dos poros com o dióxido de carbono (CO_2) atmosférico (HELENE, 2003).

Ainda, o produto desta reação é o carbonato de cálcio (CaCO_3), tornando ácido o concreto. Este fenômeno avança para o interior do concreto a uma velocidade que geralmente é proporcional a $t^{1/2}$, sendo “t” o tempo. Desta forma, o processo de carbonatação ocorre com maior rapidez em concretos de baixa qualidade e em ambientes cuja umidade relativa varia entre 50% e 70% (HELENE, 2003).

2.1.2. SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO

Lourenço (2014) afirma que em ambientes agressivos medidas adicionais para proteção da armadura à corrosão devem ser tomadas, sendo que as principais medidas adicionais utilizadas são: revestimento da armadura por camada polimérica, utilização de aditivos inibidores de corrosão no concreto, proteção catódica da armadura, substituição da armadura por materiais mais resistentes à corrosão e recobrimento do concreto com produtos protetores.

Direcionadamente ao tema deste trabalho será tratado o sistema de proteção catódica contra corrosão.

2.1.2.1. PROTEÇÃO CATÓDICA

Segundo Ávila e Genescá (1995), se atribui ao inglês Davy a descoberta da proteção catódica, tendo este utilizado peças de zinco pela primeira vez em 1784 para proteger as partes de cobre de navios britânicos. Ainda indicam que a proteção catódica com ânodos de sacrifício é normalmente de três metais: zinco (Zn), magnésio (Mg), alumínio (Al) e suas ligas. O zinco tem sido o material mais utilizado.

A proteção catódica é um dos métodos mais empregados para a proteção de grandes estruturas metálicas, quer sejam enterradas ou submersas (parcial ou totalmente). Assim, tubulações, plataformas de petróleo, navios, píeres e até mesmo edifícios de concreto armado, são protegidos por este método. (UFRGS, 2014)

Uma maneira de interromper processos de corrosão em estruturas de concreto armado é inserir outro metal para corroer no lugar do aço. Este sistema é chamado de Proteção Catódica e é definido como a redução ou eliminação da corrosão devido à transformação das armaduras em cátodos, devido a imposição de corrente galvânica ou impressa (CHRISTOPHER, 2000).

O princípio da proteção catódica se baseia em levar o potencial de corrosão do equipamento a proteger para valores correspondentes à imunidade do material. Sob determinadas condições, uma área da superfície da armadura torna-se anódica e a outra torna-se catódica. A diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo favorece o crescimento de uma corrente de corrosão galvânica que flui para o ânodo dentro do ambiente concreto. Esta corrente penetra na estrutura do aço, a partir do cátodo e através do concreto, sendo que o circuito é completado pelo fluxo eletrônico de corrente através da armadura, retornando ao cátodo

(Figura 2). O resultado desta pilha de corrosão é a perda do metal, na forma de corrosão galvânica generalizada, ou na forma de pites, nas áreas anódicas (GLASS, 1997).

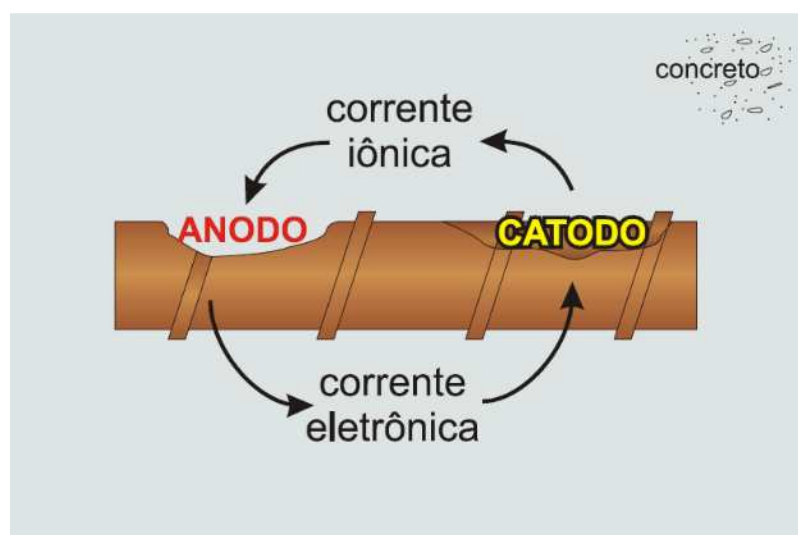


Figura 2 – Esquema de uma pilha de corrosão quando presente em um trecho de armadura (GLASS, 1997).

Lourenço (2014) cita que existem duas formas de aplicação de proteção catódica: ânodos galvânicos ou por corrente impressa. Reforçando a ideia apresentada no início deste tópico, também indica que no caso de ânodos galvânicos o metal a proteger é ligado diretamente a um metal mais ativo (ânodo de sacrifício), como o zinco, o alumínio ou o magnésio. No sistema de corrente impressa utiliza-se um ânodo inerte e uma fonte externa de corrente contínua.

2.1.2.2. Proteção Catódica Galvânica

Segundo Gonçalves (2005), a proteção galvânica é uma técnica eletroquímica de proteção de estruturas danificadas pela corrosão que consiste na redução ou eliminação do fenômeno de corrosão de uma superfície metálica por meio de uma polarização catódica, obtida por um fluxo de corrente, que desloque

seu potencial abaixo do potencial de corrosão, ou seja, até a zona de imunidade dos diagramas de Pourbaix indicado na Figura 3.

O cátodo metálico proveniente do processo corrosivo pode sofrer dissolução ou reagir com outros elementos como oxigênio, enxofre e cloretos, resultando em um filme superficial. Na superfície do aço, dependendo da temperatura e do pH do meio, vários óxidos e hidróxidos podem ser formados, sendo que os mais comuns são: FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. O diagrama de Pourbaix, apresentado na Figura 3, identifica os produtos da corrosão que estarão presentes no aço em função do potencial e do pH da solução aquosa em temperatura ambiente (SOUSA, 2014).

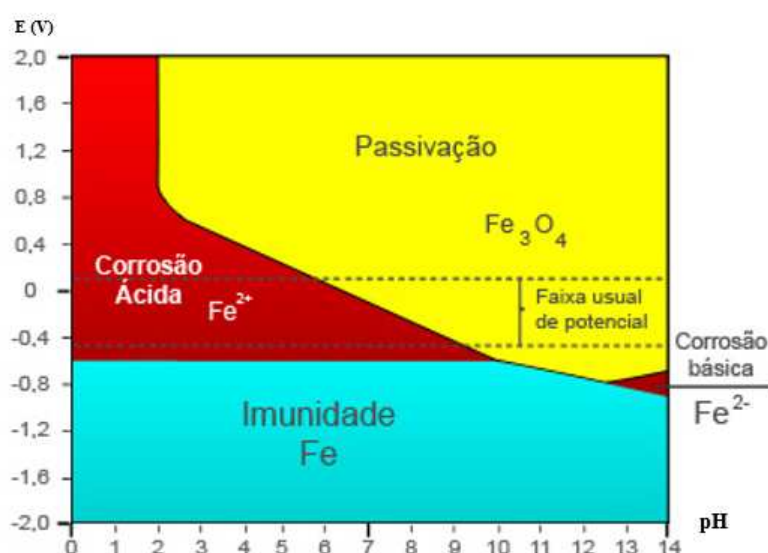


Figura 3 - Diagrama de pH de Pourbaix para o Ferro (Fe) (SOUSA, 2014).

De acordo com Gentil (1996), na proteção catódica galvânica o metal a proteger é ligado diretamente ao ânodo de sacrifício, que se dissipa gradualmente, libertando elétrons, gerando assim corrente elétrica entre os metais. Esse fluxo de corrente elétrica origina-se da diferença de potencial existente entre o metal a proteger e o ânodo que tem potencial mais negativo na tabela de potenciais, conforme apresentado na Tabela 1.

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

*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.

Tabela 1 - Série Galvânica Prática (GENTIL, 1996).

Pela análise da Tabela 1 verifica-se que os ânodos galvânicos utilizados como eletrólitos são de baixa resistividade elétrica, uma vez que as diferenças de potenciais são pequenas, necessitando de circuitos de baixas resistências elétricas para liberação da corrente de proteção catódica. Pelo mesmo motivo a proteção catódica é mais recomendada para estruturas metálicas que requeiram pequenas quantidades de corrente, em geral até 5Amperes (GENTIL, 1996).

Como mencionado anteriormente, na construção civil adota-se mais comumente a proteção a corrosão através da inserção de ânodos de sacrifício de zinco, devido as qualidades que serão citadas no subitem a seguir.

a. Ânodos de sacrifício de zinco

Ávila e Genescá (1995) indicam que um material anódico deve reunir as seguintes propriedades:

- Deve ter um potencial de dissolução suficientemente negativo para polarizar a estrutura de aço (que é o metal que normalmente é protegido) a -0,80 V. Entretanto, o potencial não deve ser excessivamente negativo já que isso motivaria um gasto desnecessário de corrente. O potencial prático de dissolução pode estar compreendido entre - 0,95 V e - 1,7 V;

- Quando o metal atua como ânodo deve apresentar uma pequena tendência à polarização, não deve desenvolver películas passivantes protetoras e deve ter um elevado sobrepotencial para a formação de hidrogênio;
- O metal deve ter um elevado rendimento elétrico, expresso em amperes-hora por kg de material (Ah/kg), o que constitui sua capacidade de drenagem de corrente;
- Em seu processo de dissolução anódica, a corrosão deverá ser uniforme;
- O metal deve ser de fácil obtenção e deverá poder ser fundido em diferentes formas e tamanhos.
- O metal deverá ter um custo razoável, de modo que em conjunção com as características eletroquímicas corretas, possa obter-se uma proteção a um custo baixo por ampere-ano.

Segundo Sergi e Page (1999) o ânodo de sacrifício de zinco é um tipo de proteção catódica galvânica constituído por zinco puro, encapsulado num material alcalino de elevada condutividade elétrica, geralmente uma argamassa de cimento porosa. Possui fios condutivos para a fixação e contato com as armaduras da estrutura de concreto armado (Figura 4).



Figura 4 - Detalhe de um ânodo de sacrifício de zinco. (SERGI e PAGE, 1999)

Os primeiros ânodos galvânicos para construção civil foram desenvolvidos no final de 1990, porém seus resultados em laboratório só foram comprovados tempos depois (SERGI e PAGE, 1999). São fabricados em diferentes diâmetros e comprimentos, a fim de permitir que o usuário escolha um tamanho mais adequado para o projeto.

O zinco inicia o processo de óxido-redução antes do aço, devido à maior eletronegatividade, evitando a inversão de polaridade gerada pelos

diferentes materiais que são utilizados na recuperação estrutural. Desta forma, ele protege as armaduras e evita a deterioração dos elementos estruturais, ampliando a durabilidade da intervenção e da própria estrutura de concreto armado (WEBER, 2014).

É utilizado em reparos localizados ou generalizados, superficiais ou profundos, para estruturas de concreto armado sujeitas a ambientes com agressividade característica pela presença de íons cloretos, como ambientes marinhos e industriais, edifícios à beira-mar, píeres, cais, ancoradouros, indústrias de papel e celulose, indústrias químicas, entre outros. As suas principais vantagens são a facilidade de instalação, melhor relação custo/benefício da intervenção, redução dos custos de manutenção e possibilidade de controle do desempenho (WEBER, 2014).

Esse tipo de ânodo deve satisfazer a certas exigências, entre elas: bom rendimento teórico da corrente em relação à massa a ser consumida; a corrente não deve diminuir com o tempo; não é aconselhável que o rendimento prático da corrente seja muito inferior ao teórico (RODRIGUES, 2005).

Como citado anteriormente, o zinco como ânodo é muito usado em ambientes propensos à ação de água do mar, como píeres. É necessário que o material seja composto de zinco sem muitas impurezas, principalmente sem a presença de ferro e cobre, tendo em vista que estes elementos potencializam a reação catódica do hidrogênio sobre o metal, provocando uma autocorrosão do ânodo (DAVIS, 2000).

2.1.2.3. Proteção catódica por corrente impressa

Conforme Gentil (2007), no processo por corrente impressa, o fluxo de corrente origina-se da voltagem de uma fonte geradora de corrente elétrica contínua. São utilizados retificadores que, alimentados com corrente alternada,

fornece corrente elétrica contínua para a proteção da estrutura metálica. O sistema de proteção catódica por corrente impressa se compõe basicamente por:

- a) Retificador – converte a corrente alternada em corrente contínua;
- b) Ânodo inerte – resistente à corrosão, é responsável pela injeção de corrente para a armadura, através do eletrólito;
- c) Eletrodo de referência – sensor de potencial eletroquímico que possibilita leituras através de voltímetro e também utilizado para enviar sinal elétrico para o controle automático do retificador;
- d) Blindagem dielétrica – isolamento elétrico, no entorno dos ânodos de corrente impressa, para evitar a superproteção local e proporcionar melhor distribuição de corrente à estrutura;
- e) Cabo elétrico – faz a interligação do sistema: do retificador aos ânodos, eletrodos e fonte de corrente alternada.

O ânodo para corrente impressa, ao contrário do galvânico, praticamente não se desgasta, ou seja, enquanto o metal do ânodo galvânico se dissolve no eletrólito para produzir elétrons, o ânodo inerte consegue fazê-lo sem que seja necessária a sua dissolução (GENTIL, 2007).

As vantagens do sistema por corrente impressa são de fornecer correntes elevadas de proteção; haver melhor controle das correntes de proteção; ser eficiente para estruturas pobremente revestidas ou sujeitas a correntes de interferência. No entanto, o custo com manutenção é maior que o sistema galvânico; requer disponibilidade de energia elétrica externa e pode causar interferências sobre outras estruturas metálicas nas proximidades (GENTIL 2007).

2.1.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NA DURABILIDADE DOS ÂNODOS

De acordo com Mehta (1994) uma longa vida útil é considerada sinônimo de durabilidade. O comitê 201 do ACI (1991) define durabilidade do concreto de cimento Portland como sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração; ou seja, o concreto durável deve conservar sua forma original, qualidade e capacidade de uso quando exposto ao seu meio ambiente.

Para Helene (1993) o término da vida útil total das estruturas de concreto corresponde à ruptura e o colapso total da estrutura; ou seja, a estrutura não exerce mais o comportamento e nem a função para o qual foi projetada. De forma análoga, pode-se propor que o término da vida útil dos ânodos de sacrifício de zinco seria quando o mesmo não exerce mais função de proteger o metal do processo corrosivo.

A diferença entre as voltagens características entre o aço e o zinco gera energia necessária para a proteção galvânica. Desta forma, a corrente que circula entre o ânodo de zinco e a armadura consome massa do próprio ânodo, em função do ataque galvânico. A relação entre a corrente galvânica e a área do ânodo resulta na densidade da corrente atuante, que é proporcional à velocidade da corrosão. (BENNETT & SHUE, 1996 *apud* RODRIGUES, 2001).

Assim, pode-se propor que quando existe uma perda de massa do ânodo no qual a densidade de corrente inserida é insuficiente para proporcionar a proteção galvânica, é indicativo que o ânodo chegou ao término de sua vida útil.

Para se estimar a vida útil de um sistema de proteção catódica com ânodos de sacrifício de zinco deve-se levar em consideração parâmetros como: a determinação da quantidade, dimensão, localização e método de instalação dos ânodos; a extensão da corrosão; a divisão do sistema em zonas anódicas independentes, variações na contaminação por teores de cloretos e na

resistividade do concreto e o ambiente de exposição de cada parte da estrutura (LOURENÇO, 2014).

2.1.3.1. Projeto de dimensionamento

O projeto de proteção catódica tem uma grande influência na durabilidade dos ânodos de sacrifício de zinco, pois se for mal dimensionado acarretará na ineficiência do sistema de proteção ou uma redução de vida útil estimada.

Os principais fatores relacionados ao projeto são o tipo, a quantidade, a distribuição, a localização e as dimensões dos ânodos, o método de instalação, a densidade da corrente necessária, a resistividade do eletrólito, as dimensões e a geometria da estrutura a proteger, além do ambiente de exposição (LOURENÇO, 2014).

O levantamento de dados da estrutura constitui-se, basicamente, no estudo das características físicas da mesma, como dimensões, formato, ligações com outras estruturas e revestimentos (DUTRA, 2006).

O projeto de um sistema de proteção catódica baseia-se na densidade de corrente necessária – com referência à unidade da área da superfície da armadura – para levar o aço à condição da passividade (BERTOLINI, 2012).

Antes de instalar um sistema de proteção catódica é necessário verificar se a armadura é contínua do ponto de vista elétrico e se o concreto entre a armadura e o ânodo fornece um percurso eletrolítico sem descontinuidade (portanto, não deve conter grandes fissuras), delaminações ou zonas com elevada resistência elétrica, como revestimentos ou restaurações com aglomerantes poliméricos não cimentícios, pois estes podem comprometer o fluxo uniforme da corrente de proteção. Eventuais descontinuidades elétricas entre as armaduras são eliminadas mediante ligações e conexões elétricas adicionais (BERTOLINI, 2012).

Para a aplicação da proteção catódica, é necessária a remoção somente do concreto estruturalmente degradado (fissurado ou descolado) e a sua substituição por argamassas cimentícias; mas não é necessária a remoção do concreto restante, mesmo que tenha um teor de cloretos superior ao teor crítico (BERTOLINI, 2012).

A intervenção de reparação nessas zonas consiste na remoção de uma camada superficial de concreto até atingir as armaduras, na limpeza das armaduras e na posterior reposição da seção, através da aplicação de argamassa de reparação (LOURENÇO, 2014).

A seleção dos ânodos não deve ser feita de forma aleatória. Sua utilização deve ser estabelecida com base nas características da estrutura a ser protegida e também deve-se conhecer qual o eletrólito que estará em contato com o material metálico. Por exemplo, os ânodos de liga de alumínio são usados em estruturas metálicas imersas *offshore*. Já os ânodos de magnésio são utilizados em estruturas metálicas imersas em água doce, de baixa resistividade ou em solos com resistividade elétrica de até 3.000 $\Omega\cdot\text{cm}$. Desta forma, ânodos de zinco puro não devem ser utilizados no ambiente alcalino do concreto, já que passivam-se facilmente neste meio (GENTIL, 2003).

Dos comentários acima, pode-se verificar que, em geral, os ânodos galvânicos são aplicados a eletrólitos com pequena resistividade elétrica, ou seja, de até 3.000 $\Omega\cdot\text{cm}$ e em estruturas cujo aço necessite de pequenas quantidades de corrente, normalmente até 5 A, uma vez que as diferenças de potenciais envolvidas são reduzidas, necessitando de circuitos com baixas resistências elétricas para o fornecimento da corrente de proteção catódica (GENTIL, 2003).

Os dois fatores mais importantes em uma proteção catódica são: a densidade da corrente, isto é, a corrente que irá fluir nas pilhas de corrosão (catodo/ânodo) por unidade de área do ânodo aplicado para interromper a corrosão nas armaduras, e a situação do binômio concreto/armaduras que se deseja proteger (BENNETT & SHUE, 1996 *apud* RODRIGUES, 2001).

Além destas duas variáveis principais, devem ser adicionadas algumas outras, como a resistividade do concreto, o tipo de ânodo empregado e a durabilidade desejada. De qualquer forma, é preciso ficar atento para que, caso haja insuficiente densidade de corrente ou distribuição inadequada, a interrupção, redução ou prevenção da corrosão pode não ocorrer totalmente (RODRIGUES, 2001).

2.1.3.2. Presença de Cloretos

Sais à base de cloreto podem ser encontrados na água do mar, na atmosfera marinha, águas contaminadas, e podem também estar presentes íons de cloretos em aditivos, produtos de limpeza, entre outros.

De acordo com Almeida e Sales (2013), a presença do íon de cloreto na estrutura de concreto é uma das principais causas de corrosão das armaduras, pois atua na fase de iniciação e na aceleração da propagação do processo corrosivo.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que, quando a relação Cl^-/OH^- é maior que 0,6, o aço perde a proteção contra corrosão, pois provavelmente o filme de óxido de ferro se torna instável nessas condições. Além disso, altos teores de cloretos tendem a reter mais a umidade no concreto aumentando o risco de corrosão.

Quando o metal está exposto a soluções contendo íons de cloreto, caso das armaduras em concreto contaminados por cloretos, é suficiente baixar o potencial para a zona de passivação perfeita do diagrama de Pourbaix.

Assim, Lazzari e Pedferri *apud* Lourenço (2014) mencionam que em estruturas aéreas contaminadas com cloretos é necessário a aplicação de corrente entre 5 a 20mA/m² da superfície de metal a proteger e em estruturas submersas a proteção é de 0,2 a 2mA/m², devido à baixa concentração de oxigênio. Como a

densidade de corrente de proteção é maior para áreas contaminadas expostas ao ar, é maior o consumo do ânodo de sacrifício.

2.1.3.3. Porosidade do Concreto

Os poros no concreto têm origem no espaço deixado pela água de amassamento após a hidratação do cimento, que possui volume maior do que o cimento anidro e quando a água evapora deixa uma quantidade de vazios (NEVILLE, 1997).

No que se refere às características da matriz do concreto, o aspecto da porosidade é um dos mais importantes relacionado à iniciação da corrosão, pois tem relação direta com a velocidade de transporte dos agentes agressivos para o interior do concreto (FIGUEIREDO & MONTEIRO, 2011).

2.1.3.4. Umidade

Pannoni (2007) afirma que a corrosão não ocorre na ausência de umidade e é importante que se garanta que a construção esteja protegida da umidade tanto quanto possível.

A diferença da umidade nos elementos estruturais - como no caso do estudo em questão em que se trata de estacas submetidas a variação de maré - é um fator agravante de corrosão, pois cria-se zonas com diferença de potencial (MONTEIRO, 2008).

2.1.3.5. Temperatura

De acordo com Cascudo (1997), a variação da temperatura atua de forma secundária no processo de corrosão. O aumento da temperatura pode

acelerar a corrosão, pois eleva a velocidade das reações e a mobilidade iônica, porém sua diminuição pode levar a condensação, que produz aumento na umidade local.

Segundo Neville (1997), outro fator que a temperatura influencia é o teor de cloretos livres na água, que aumenta quando a temperatura eleva.

Também é importante destacar que a variação da corrente galvânica está fortemente relacionada com a temperatura, segundo estudo de caso realizado por SERGI (2009), em uma ponte de concreto armado localizada em Leicester no Reino Unido. Em temperaturas máximas de 80°F (26,6°C), o valor da corrente encontrava-se em torno de 23mA; para temperaturas mínimas de 20°F (-6°C) a corrente correspondente estava em torno de 5mA conforme a Figura 5 apresentada na sequência.

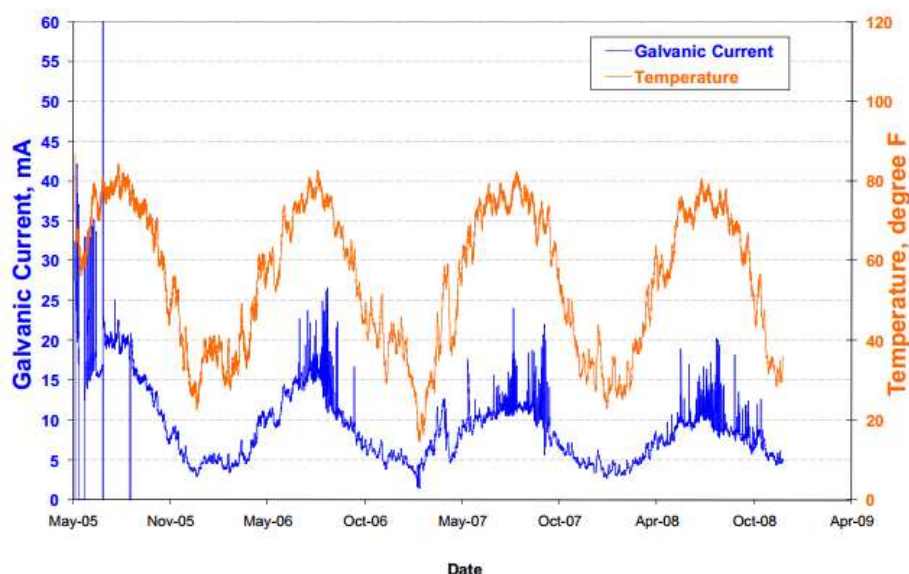


Figura 5 – Gráfico da corrente galvânica x temperatura (SERGE, 2009).

2.1.3.6. Fissuração

Segundo Figueiredo & Monteiro (2011), através das fissuras os agentes agressivos como íons Cl^- ou CO_2 podem penetrar e romper a passividade da armadura. Em fissuras transversais à armadura, a região próxima a fissura atuará como ânodo, enquanto que nas regiões laterais atuarão como cátodo (Figura 6a). No caso de fissura longitudinal sobre a armadura, a região adjacente à armadura atuará como ânodo e a região inferior da armadura como cátodo (Figura 6b).

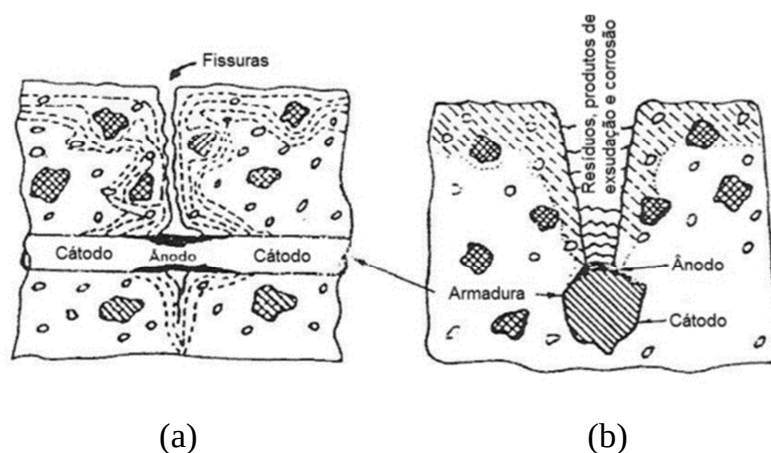


Figura 6 - Modelo de formação de macrocélulas de corrosão devido a presença de fissura (ANDRADE, 1988).

2.1.3.7. Revestimento

A utilização de um revestimento isolante na estrutura irá reduzir a ação da proteção catódica. Quando aplicado em primeiro lugar, o revestimento, muitas vezes, pode conter defeitos e, em utilização, irá desenvolver falhas ao longo de um período de tempo.

O emprego de revestimento e proteção catódica tira proveito das melhores características de cada método de controle de corrosão. Assim, a maior parte da proteção é fornecida pelo próprio revestimento e a proteção catódica

proporciona proteção às falhas deste revestimento, à medida em que este se degrada com o tempo. Logo, uma combinação de ambos, normalmente resultará no sistema mais econômico de proteção (UFRGS, 2014).

2.1.3.8. Resistividade do concreto

Geralmente, se a resistividade do concreto é abaixo de $10000 \Omega\text{cm}$, o risco de ocorrer corrosão é maior. Pode-se citar que o traço do concreto, fator água/cimento, tipo de cimento, afetam na resistividade do concreto.

Os íons de cloreto podem diminuir também a resistividade do concreto, já que ele absorve umidade, favorecendo a corrosão (SOUSA, 2014).

2.2. DETERMINAÇÃO DA DURABILIDADE ATRAVÉS DO CÁLCULO DA VIDA ÚTIL

Para o presente trabalho foi trazido à revisão bibliográfica o método de cálculo baseado em Vicente Gentil e na Lei de Faraday. Visando manter a comparação com o estudo anterior teve-se o foco na Lei de Faraday.

2.2.1. LEI DE FARADAY

Segundo a Primeira Lei de Faraday, a massa da substância eletrolisada em qualquer dos elementos é diretamente proporcional à quantidade de carga elétrica que atravessa a solução, conforme apresentado na Equação 2.

$$m = K_1 \cdot Q$$

(Equação 2 – Primeira Lei de Faraday)

Onde:

m = massa da substância

K_1 = constante de proporcionalidade

Q = carga elétrica (Coulomb)

Conforme Panonni (2000) pode-se entender que o metal sob ação de corrosão se equivale a uma bateria produtora de energia elétrica que está em curto circuito, em que a energia é dissipada durante o consumo do reagente catódico e a formação de produtos de corrosão.

Correlacionando com o tema do presente trabalho, entende-se que é uma ligação onde existe uma corrente de energia entre os metais de sacrifício e aqueles a serem protegidos, sendo o concreto o meio gerador deste “curto circuito”, que dissipa a energia entre estes dois metais (zinco a aço).

Para que haja o equilíbrio de massa, a quantidade de reagente catódico consumido (de ânodo de sacrifício) deve ser igual, tanto em termos químicos e eletroquímicos, à quantidade de produto de corrosão formado pelo metal a ser protegido.

Como num sistema eletroquímico, os elétrons são liberados pela reação anódica e consumidos pela reação catódica, portanto a corrosão pode ser considerada como uma corrente eletroquímica que flui da área anódica para a área catódica. Esta corrente pode ser vista como uma medida da velocidade do processo de corrosão, e, portanto, a velocidade com que o aço é corroído.

Para o cálculo de vida útil de ânodos de sacrifício de zinco considera como base a Lei de Farada, pois a massa do ânodo está relacionada ao valor da corrente no ânodo e não do número de ânodos inseridos na estrutura. Este cálculo requer a corrente em um determinado período e a massa do ânodo.

Uma vez que a taxa de consumo é balizada (T_m), a vida útil do ânodo é calculada através da relação da massa total com a taxa de consumo da massa por um determinado período de tempo.

Logo, com base na Lei de Faraday, é possível estimar o tempo necessário para uma determinada corrente consumir uma determinada massa, no caso a massa de zinco utilizada como ânodo de sacrifício.

Fórmula para o cálculo da taxa de massa consumida (Equação 3):

$$T_m = \frac{i \cdot m}{n \cdot F \cdot e \cdot u}$$

(Equação 3 – Cálculo da taxa de massa consumida)

Fórmula para o cálculo da vida útil (Equação 4):

$$V = \frac{M}{T_m}$$

(Equação 4 – Equação para cálculo da vida útil pelas Leis de Faraday)

Sendo:

T_m : taxa de massa consumida (g/s);

i : corrente no ânodo (C/s);

m : massa atômica (65,39 g/mol);

n : valência, número de elétrons liberados para cada molécula do metal durante a reação de oxidação - 2 (adimensional);

F: constante de Faraday - 96.500 (s.A/mol);

e : fator de eficiência - 0,9 (adimensional);

u : fator de utilização - 0,8 (adimensional);

V : vida útil (s);

M : massa total dos ânodos (g).

2.2.2. MÉTODO GENTIL

Na literatura também foi encontrada outra fórmula para o cálculo da vida útil dos ânodos de sacrifício de zinco, apresentada por Gentil (1996), conforme apresentado pela expressão a seguir:

$$V = \frac{M.C.0,85}{i.8760}$$

(Equação 5 – Cálculo da vida útil pelo método de Gentil)

Sendo:

V: vida útil (ano);

M: massa total dos ânodos (kg);

C: capacidade de corrente dos anodos (A.h.kg⁻¹);

i: corrente (A);

0,85: fator de utilização adotado para ânodos convencionais (adimensional);

i = Corrente, em A (amperes).

A Figura 7 a seguir cita os valores da capacidade de corrente alguns tipos de materiais que compõem ânodos de sacrifício:

Anodo	C (Ah.kg ⁻¹)	E (V/Cu,CuSO ₄)	d (g.cm ⁻³)
Mg	1100	-1,70	1,8
Zn	740	-1,10	7,2
Al	2200-2844	-1,10	2,8

Figura 7 - Potencial natural, capacidade de corrente e densidade dos anodos de sacrifício (GENTIL, 1996).

Gentil não demonstra em sua literatura, a origem de sua equação, porém ao estudar os parâmetros apresentados nota-se que a mesma é baseada na adaptação da Lei de Faraday. Se combinarmos a Equação 3 e a Equação 4 (Faraday) teremos a Equação 6:

$$V = \frac{M.n.F.e.u}{i.m}$$

(Equação 6 – Correspondência entre equações de Gentil e Faraday)

Sendo:

V: vida útil (s);

M: massa total dos ânodos (g);

n: valência, número de elétrons liberados para cada molécula do metal durante a reação de oxidação - 2 (adimensional);

F: constante de Faraday - 96.500 (s.A/mol);

e: fator de eficiência - 0,9 (adimensional);

u: fator de utilização - 0,8 (adimensional));

i: corrente no ânodo (C/s);

m: massa atômica (65,39 g/mol).

Igualando a Equação 5 (Gentil) e Equação 6 (Faraday), tem-se:

$$\frac{M.C.0,85}{i.8760} \cong \frac{M.n.F.e.u}{i.m}$$

(Equação 7 – Equação comparativa)

Sendo:

M: massa total dos ânodos;

C: capacidade de corrente dos anodos (A.h.kg⁻¹);

i: corrente no ânodo;

n: valência, número de elétrons liberados para cada molécula do metal durante a reação de oxidação - 2 (adimensional);

F: constante de Faraday - 96.500 (s.A/mol);

e: fator de eficiência - 0,9 (adimensional);

u: fator de utilização - 0,8 (adimensional));

m: massa atômica (65,39 g/mol).

As incógnitas de massa (M) e corrente (i) estão presentes nas duas equações (Faraday e Gentil), e diferem somente da ordem de grandeza

estipulada. Como a Lei de Faraday apresenta como resultado um valor em segundos (s) do tempo de consumo da massa, para obter grandezas mais comuns, a fórmula de Gentil, já se apresenta convertida para a unidade de tempo em anos. Para tanto se divide a equação por 8.760 segundos, ou seja, um ano.

Outra incógnita embutida na equação de Gentil é o fator de utilização, assumido seu o valor como 0,85, assim como na equação de Faraday, que apresenta o fator de eficiência (0,9) e o fator de utilização (0,8).

A capacidade elétrica é determinada pela quantidade de energia elétrica que pode ser acumulada em si por uma determinada tensão e pela quantidade de corrente que atravessa o material no qual é composto o ânodo de sacrifício. Portanto a capacidade elétrica corresponde à relação entre a quantidade de carga acumulada e o potencial elétrico que o material assume em consequência disso. Igualando as incógnitas faltantes, tem-se a seguinte equação:

$$C \cong \frac{n \cdot F}{m}$$

(Equação 8 – Equivalência de Equações)

Sendo:

C: capacidade de corrente dos anodos (A.h.kg⁻¹);

n: número de valência (adimensional);

F: constante de Faraday - 96.500 (s.A/mol);

m: massa atômica (65,39 g/mol).

Logo, conclui-se que a Fórmula de Gentil e Faraday são equivalentes e optou-se por utilizar nos cálculos de vida útil deste trabalho a fórmula de Faraday.

3. ESTUDO DE CASO

Apresenta-se neste trabalho a continuidade do estudo de caso intitulado “*Avaliação de Durabilidade de Ânodos de Sacrifício Aplicados em Estrutura de Concreto Armado em Zona de Variação de Maré*”, realizado em nove estacas de concreto armado recuperadas no ano de 2010 no píer do Terminal de Granéis do Guarujá (TGG), principalmente relacionado ao monitoramento realizado na proteção catódica com ânodos de sacrifício de zinco.

Primeiramente foi realizada uma pesquisa referente à documentação existente, nos projetos de recuperação, relatórios de inspeção e ensaios da época (EXATA, 2005). A partir deste estudo foi possível o desenvolvimento das etapas a seguir descritas.

3.1. HISTÓRICO

O porto foi construído em 1957, inicialmente para recebimento de petróleo, consórcio entre a Exxon Mobil Corporation (ESSO) e Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras). Após a construção do Porto de São Sebastião, a estrutura foi desativa para esta função (TGG, 2014).

Em 2007 passou a funcionar no local o TGG, dirigido pelas empresas América Latina Logística (ALL), Ferrovias Norte Brasil (FERRONORTE), AMAGGI e BUNGE, atuando como terminal portuário para recepção, armazenagem e embarque de grãos sólidos.

Consolida com o Porto de Santos como o maior porto de exportação brasileiro para o agronegócio, capaz de movimentar 6 milhões de toneladas/ano, sendo o maior e mais moderno terminal da América Latina.

O TGG ocupa uma área de 340 mil metros quadrados e recebe grande parte da produção do Centro-Oeste do Brasil, o que representa um incremento de

aproximadamente 50% no volume total de granéis agrícolas movimentados pelo Porto de Santos.

3.2. LOCALIZAÇÃO

O TGG está localizado na margem esquerda do Porto Organizado de Santos, mais precisamente na Avenida Santos Dummont, s/n – bairro Vicente de Carvalho, município do Guarujá, Estado de São Paulo. Na Figura 8 tem-se uma vista aérea do TGG.



Figura 8 – Vista aérea. (GOOGLE MAPS, 2014).

3.3. CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA

O terminal é composto por um píer de atração com 276 metros de comprimento e largura variando entre 14 metros e 4 metros, ligado ao continente através de uma ponte de acesso de 45 metros de comprimento e 7,8 metros de

largura. O restante da estrutura possui dois *dolphins* de amarração e dois *dolphins* de atracação.

Na Figura 9 pode-se observar a vista superior do porto e na Figura 10 o projeto esquemático das estruturas que compõe o porto.



Figura 9 – Vista aérea do Terminal de Granéis do Guarujá (TGG,2014).

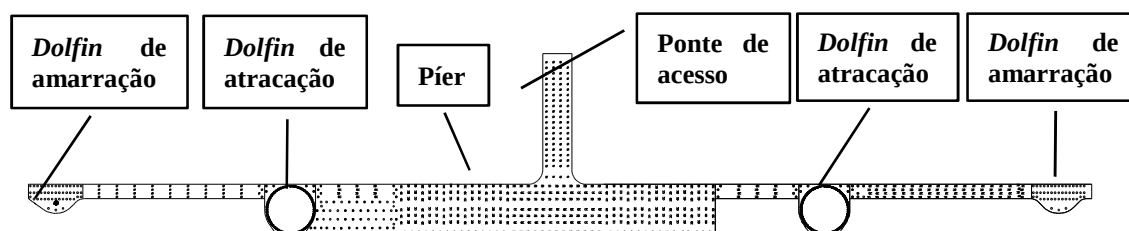


Figura 10 – Projeto esquemático do TGG (EXATA, 2005).

A estrutura do píer foi construída em concreto armado moldado *in loco*, constituída por 840 estacas de seção retangular 40 centímetros x 40

centímetros (conforme Figuras 11 e 12) que sustentam uma estrutura de lajes maciças posicionadas acima do nível de variação de maré.

Conforme dados obtidos *in loco*, já que não foi possível a obtenção dos projetos originais, tem-se que o cobrimento real das estacas é da ordem de 3 centímetros e a resistência características a compressão média é de 45 MPa.



Figura 11 – Vista geral do píer (Acervo pessoal, 2014).



Figura 12 – Vista geral das estacas (Acervo Pessoal, 2014).

3.4. CARACTERÍSTICAS DO PROJETO DE RECUPERAÇÃO E DE MONITORAMENTO DOS ÂNODOS

Desde 2005 a estrutura apresentava problemas relacionados a durabilidade, principalmente nas fundações de estacas e na face inferior das lajes, tais como corrosão de armaduras, fissuras e problemas nas juntas de dilatação.

Deste modo, a empresa Exata Engenharia foi contratada para realizar inspeção visual e ensaios, de forma a subsidiar a metodologia de recuperação da estrutura, com objetivo de proporcionar novamente a durabilidade e estabilidade para as estruturas que apresentavam manifestações patológicas graves.

Através dos ensaios realizados em 2005 pode-se constatar que o concreto antigo possuía resistência a compressão de 45 MPa, qualidade moderada relacionada ao ensaio de índice de vazios, não apresentava carbonatação e pode-se verificar contaminação por cloretos presente em profundidade da armadura. Além disso, o ensaio de potencial de corrosão indicou probabilidade de corrosão alta.

Em 2010, foi realizada recuperação estrutural em nove estacas mais críticas (E-226, E-303, E-310, E-317, E-324, E-339, E-346, E-353), por meio do encamisamento de concreto da estaca existente (aumento de 7 cm da seção com adição de novas armaduras), uma vez que sua capacidade resistente foi muito reduzida. Na Figura 12 tem-se o detalhe das estacas recuperadas em 2005.

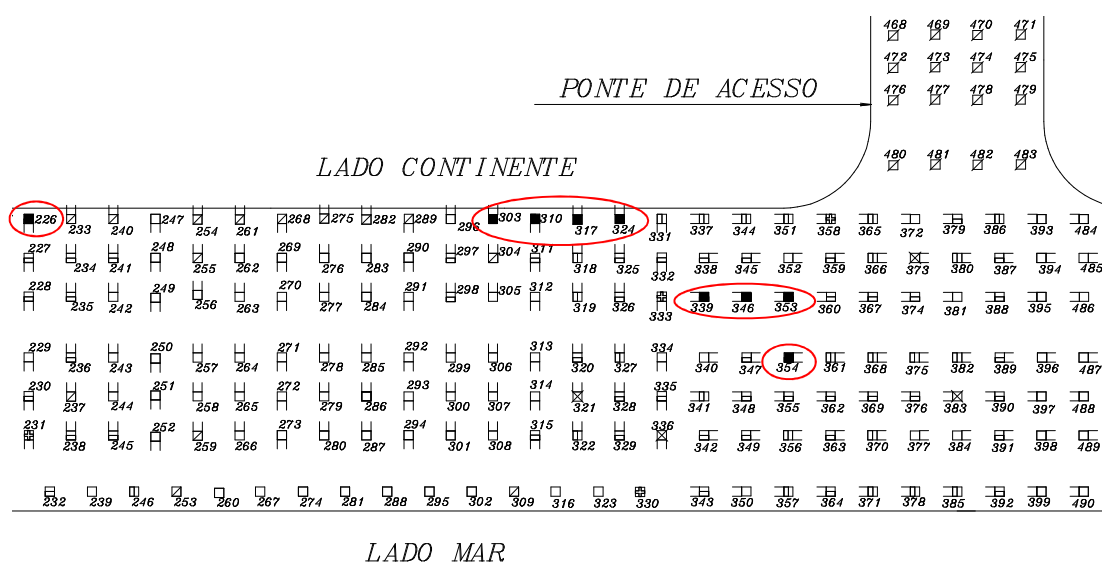


Figura 13 – Detalhe das estacas recuperadas e monitoradas (EXATA, 2005).

Com o intuito de obter um incremento de vida útil nas estacas reparadas utilizou-se um sistema de proteção catódica com ânodos de sacrifício de zinco. Foi utilizada a pastilha denominada Galvashiel XP, com dimensões de 6,5 cm de diâmetro e 3,0 cm de altura (Figura 14), produzida pela empresa Vector Corrosion Technologies e comercializada pela empresa Weber Saint-Gobain no Brasil.



Figura 14 – Detalhe da pastilha utilizada na proteção catódica (VECTOR, 2014).

O projeto de proteção galvânica foi calculado pela empresa EXATA Engenharia e os ânodos foram distribuídos conforme especificação do fabricante. De acordo com o mesmo, a vida útil das pastilhas pode variar de 10 a 20 anos, conforme apresentado catálogo do fabricante.

Em suma, no cálculo foi considerado o consumo das pastilhas, seu raio de cobertura e o espaçamento entre as unidades, conforme memória de cálculo (EXATA, 2005).

Nas Figuras 15 a 19 pode-se observar os principais detalhes do projeto de recuperação com os ânodos de sacrifício de zinco.

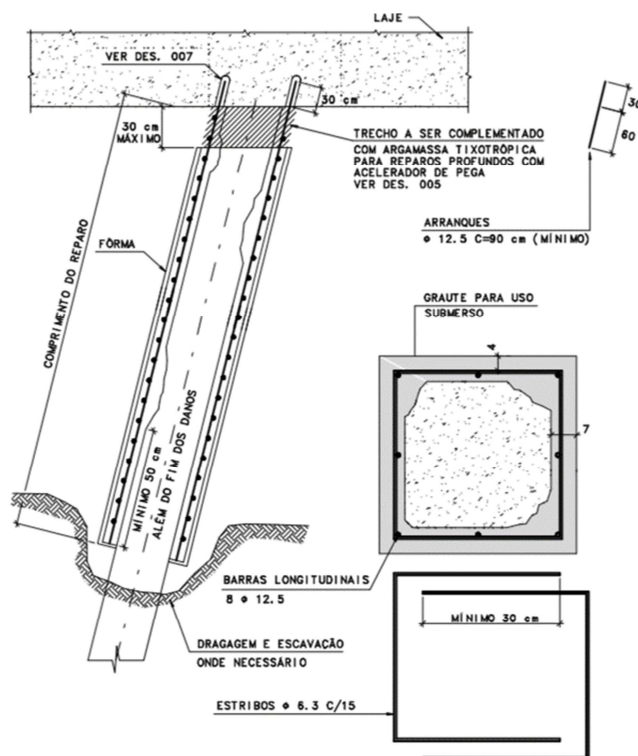


Figura 15 – Detalhe do projeto de encamisamento parcial das estacas (EXATA, 2005).

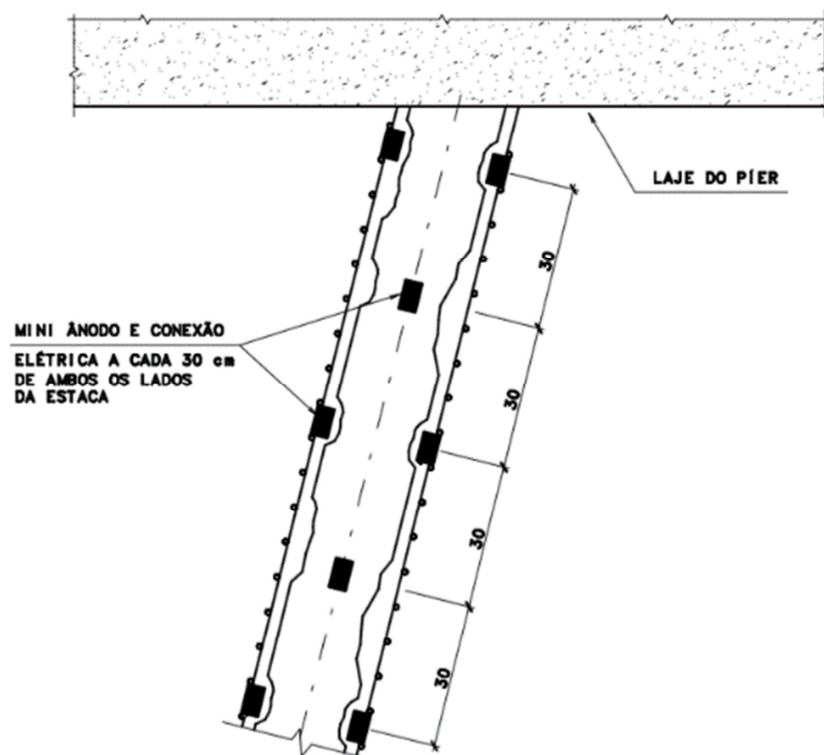


Figura 16– Detalhe do projeto dos ânodos de sacrifício de zinco (distribuição e montagem). (EXATA, 2005)

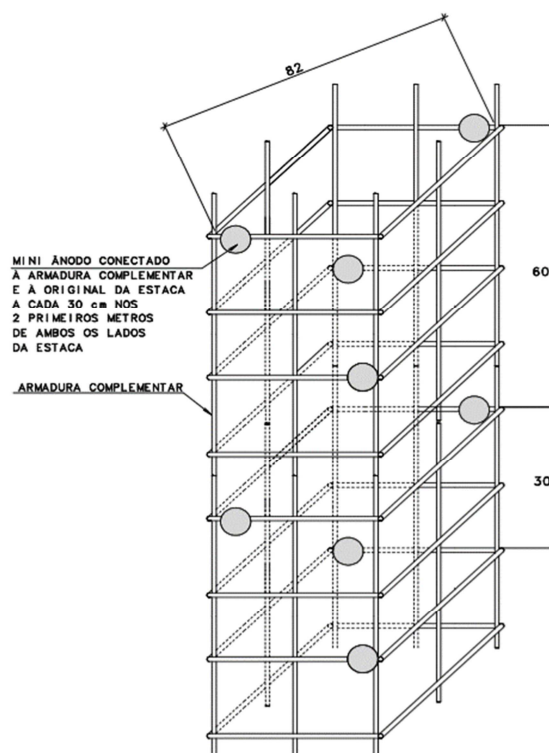


Figura 17– Vista em perspectiva do projeto dos ânodos de sacrifício de zinco (distribuição) (EXATA, 2005).



Figura 18 – Vista geral das pastilhas inseridas na estrutura (EXATA, 2010).

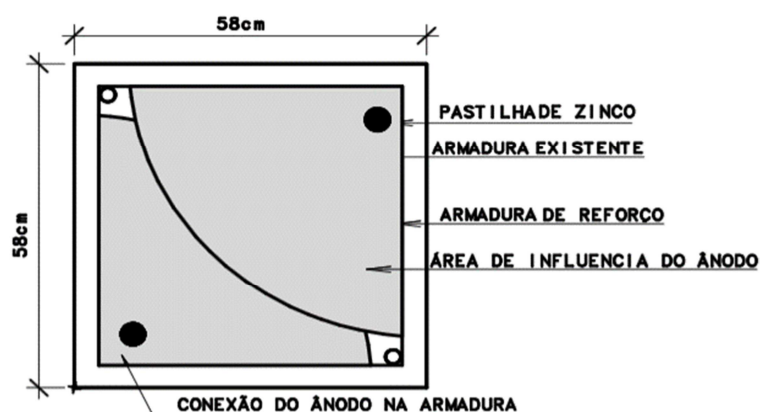


Figura 19 – Vista em planta do projeto dos ânodos de sacrifício de zinco (raio de influência) (MATTOS *et al.*, 2010).

Na oportunidade foram instalados dispositivos para acompanhamento do desempenho dos ânodos, que consistem basicamente na inserção de dois fios instalados no ânodo e nas armaduras novas, para realização da medida da corrente através de um multímetro de alta impedância. Nas Figuras 20 a 23 tem-se exemplos do dispositivo criado para realização das leituras.

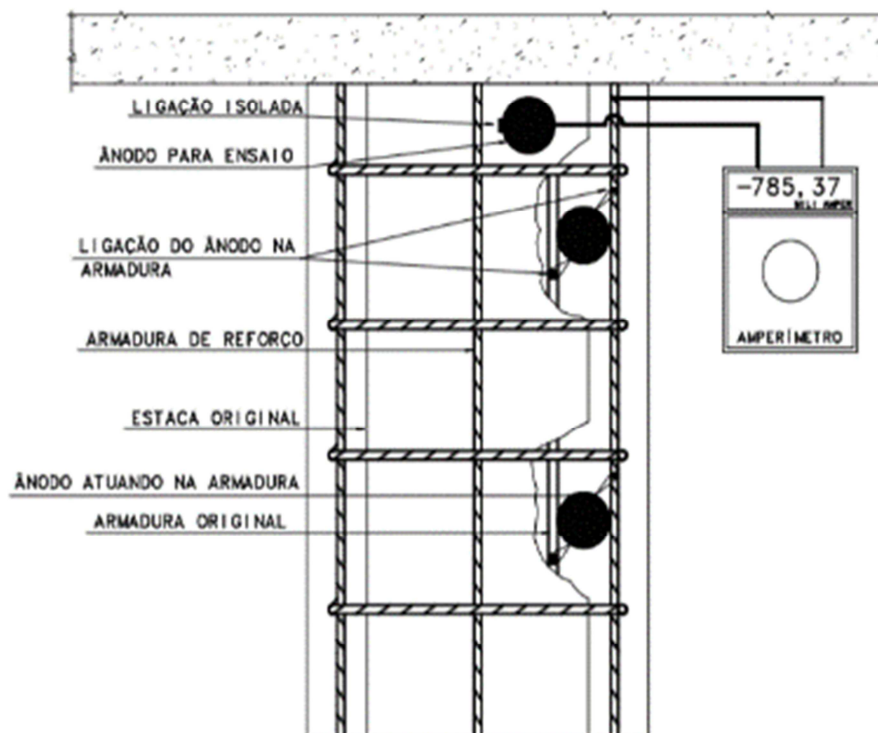


Figura 20 – Detalhe do dispositivo para leitura da corrente. (MATTOS *et al.*, 2010).



Figura 21 – Detalhe do dispositivo para leitura da corrente (MATTOS *et al.*, 2010).

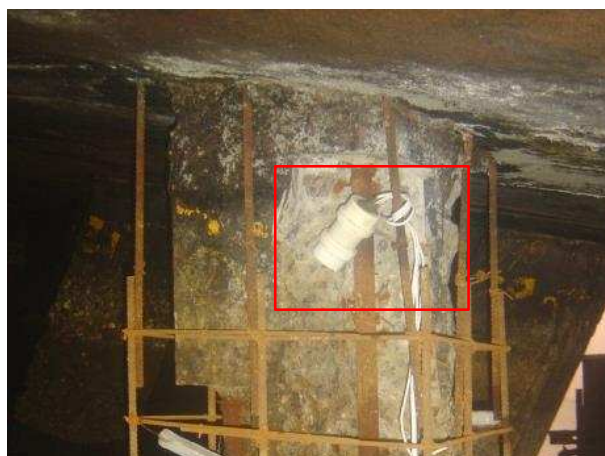


Figura 22 – Detalhe do dispositivo instalado na estaca (MATTOS *et al.*, 2010).

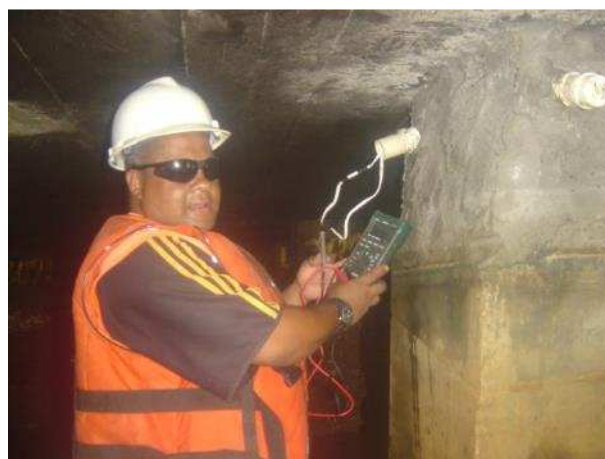


Figura 23 – Detalhe da leitura sendo realizada através do dispositivo instalado (MATTOS *et al.*, 2010).

3.5. RESULTADOS OBTIDOS EM 2010

Em novembro de 2010 foram medidas as correntes (I) resultantes das estacas recuperadas e com instalação do sistema de proteção catódica, como indica a Tabela 2:

Estaca	Data da Inserção dos Ânodos	I (μ A) 28/10/10	I (μ A) 08/11/10	I (μ A) 29/11/10	Taxa de Massa consumida (g/s)	Vida útil estimada (anos)
E-226	24/09/2010	722	1245	1114	4,80E-07	3,6
E-303	18/08/2010	424	1010	530	3,10E-07	7,6
E-310	18/08/2010	584	1340	360	3,6E-0,7	11,2
E-317	18/08/2010	1146	1440	1240	6,0E-0,7	3,3
E-324	18/08/2010	876	1326	830	4,8E-0,7	4,9
E-339	10/11/2010	-	-	725	3,4E-0,7	5,6
E-346	10/11/2010	-	-	694	3,3E-0,7	5,8
E-353	10/11/2010	-	-	776	3,7E-0,7	5,2
E-354	24/11/2010	-	-	565	2,7E-0,7	7,2

Tabela 2 - Resumo dos resultados obtidos em 2010. (MATTOS *et al*, 2010).

Conforme observado na Tabela 2 verifica-se que quanto maior o fluxo da corrente, maior será a taxa do consumo de massa do ânodo e consequentemente a estimativa de vida útil fornecerá valores menores.

Contudo, em MATTOS *et al.* (2010) já se afirmava que a queda da corrente irá continuar ao longo do tempo, logo, os resultados apresentados da vida útil estimada não devem ser entendidos como aumento da vida útil final da estaca, pois a corrente não fica estagnada, tende a diminuir.

Conforme estudos apresentados sobre o tema, a corrente tende a estabilizar após 3 meses de instalação dos ânodos, logo, os resultados mais coerentes para as leituras da corrente podem ser observados nas estacas E-303, E-310, E-317 e E-324.

3.6. METODOLOGIA UTILIZADA EM 2014

Foi realizado um plano de trabalho para as atividades, compreendendo: visita ao porto para inspeção visual nas estacas, monitoramento das correntes e prospecção nas estacas para remoção dos ânodos para aferição da massa real, conforme será apresentado a seguir.

3.6.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a realização do trabalho foi utilizado um multímetro digital modelo MD-6290 da marca ICEL Manaus cedido pela empresa EXATA Engenharia para medida da corrente; uma balança semi-analítica BK 4400 da marca GEHAKA, com sensibilidade de 0,1 grama para medida da massa do ânodo cedido pela CONCREMAT ENGENHARIA, martetele pneumático cedido pela NOVATA ENGENHARIA e uma máquina fotográfica.

3.6.2. INSPEÇÃO VISUAL NAS ESTACAS

Foi realizada inspeção visual, documentada através de registro fotográfico, nas nove estacas recuperadas (E-226, E-303, E-310, E-317, E-324, E-339, E-346, E-353), com objetivo de analisar o quadro atual da estrutura, principalmente quanto à presença de manifestações patológicas que possam interferir na vida útil dos ânodos de sacrifício.

3.6.3. MEDIÇÃO DA CORRENTE GALVÂNICA

Nas estacas pré-determinadas foram medidas as correntes galvânicas nos ânodos, para análise da vida útil, sendo que na oportunidade também foi medida a temperatura do ambiente, conforme pode-se observar na Figura 24.



Figura 24 – Detalhe da medição da corrente na estaca E-353 (Acervo pessoal, 2014).

3.6.4. PROSPECÇÃO NAS ESTACAS E AFERIÇÃO DA MASSA DO ÂNODO

Foram escolhidas quatro estacas (E-303, E-310, E-317 e E-324) para aberturas de janelas para remoção dos ânodos, sendo que na oportunidade também foi analisado o aspecto visual das armaduras embutidas, conforme observado nas Figuras 25 e 26.



Figura 25 – Vista geral da prospecção da estaca E-324 (Acervo pessoal, 2014).



Figura 26 – Detalhe do ânodo que foi removido presente na estaca E-324 (Acervo pessoal, 2014).

Após a remoção dos ânodos das estacas os mesmos foram limpos, para retirada da argamassa envoltória e pesados em balança de precisão, conforme observado na Figura 27.



Figura 27 – Vista geral dos ânodos sendo aferidos através de pesagem (Acervo pessoal, 2014).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos, visando correlacionar os resultados da inspeção visual das estacas e ânodos, das correntes e das massas consumidas, para então verificar a vida útil estimada da proteção catódica através de ânodos de sacrifício de zinco para as estruturas em estudo e ainda quais os fatores que influenciaram na durabilidade.

4.1. INSPEÇÃO VISUAL

Nas Figuras 28 a 36 pode-se observar a inspeção visual realizadas nas estacas em estudo.



Figura 28 – Vista geral da estaca E-324, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).



Figura 29 – Estaca E-317, sem anomalias aparentes na estaca, porém com infiltração na parte superior, com presença de microrganismo (fungos e limo) (Acervo pessoal, 2014).



Figura 30 – Vista geral da estaca E-310, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).



Figura 31 – Vista geral da estaca E-303, sem anomalias aparentes, porém com infiltração na parte superior, com presença de limo e fungos (Acervo pessoal, 2014).



Figura 32 – Vista geral da estaca E-226, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).



Figura 33 – Estaca E-339, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).



Figura 34 – Vista geral da estaca E-346, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).



Figura 35 – Vista geral da estaca E-353, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).



Figura 36 – Vista geral da estaca E-354, sem anomalias aparentes (Acervo pessoal, 2014).

De uma forma geral as estacas apresentam aspecto uniforme e não constatou-se manifestações patológicas graves. Contudo, verificou-se que é grande a presença de agentes biológicos, “craca”, incrustados nas estacas, principalmente na zona de variação de maré. Destaca-se que nas estacas E-303 e E-317 se verificou que há umidade descendente havendo a percolação de água pelas estacas inclinadas em sentido mar.

Conforme visualizado na Figura 37, tem-se que os arames que ligam o ânodo às armaduras não apresentam corrosão e que há uma camada de material esbranquiçado, entendendo-se que seja o produto de corrosão do zinco. Para remoção da argamassa foi utilizada espátula.



Figura 37 – Detalhe dos ânodos removidos nas estacas (Acervo pessoal, 2014).

4.2. TEMPERATURA

Quando foi realizada a medição da corrente, nos dias 11 e 12 de novembro do ano de 2014 foi aferida também a temperatura do ambiente que variou entre 27,6°C a 28,5°C. Comparando com a medida de temperatura realizada em 2010, o resultado foi praticamente o mesmo, 28,1°C.

4.3. CORRENTE ELÉTRICA

Foram realizadas cinco leituras de corrente elétrica nas nove estacas de referência, três leituras entre outubro e novembro de 2010 e duas leituras em novembro de 2014, conforme observado na Tabela 3.

Estaca	Leitura 1 (μ A)	Leitura 2 (μ A)	Leitura 3 (μ A)	Leitura 4 (μ A)	Leitura 5 (μ A)
	28/10/2010	08/11/2010	29/11/2010	11/11/2014	12/11/2014
E-226	722	1245	1114	470	392
E-303	424	1010	530	1333	1375
E-310	584	1340	360	250	196
E-317	1146	1440	1240	2198	2000
E-324	876	1326	830	365	349
E-339			725	114	154
E-346			694	356	354
E-353			776	122	125
E-354			565	127	99

Tabela 3 – Resumo das leituras obtidas das correntes realizadas de 2010 e 2014 (Acervo pessoal, 2014).

Observa-se na Figura 38 os valores de correntes medidas em 2010 e em 2014 e tem-se que na maioria dos casos há uma queda da corrente variando entre 39% a 84%. Somente as leituras das estacas E-303 e E-317 apresentaram uma corrente superior quando comparados os resultados de 2010.

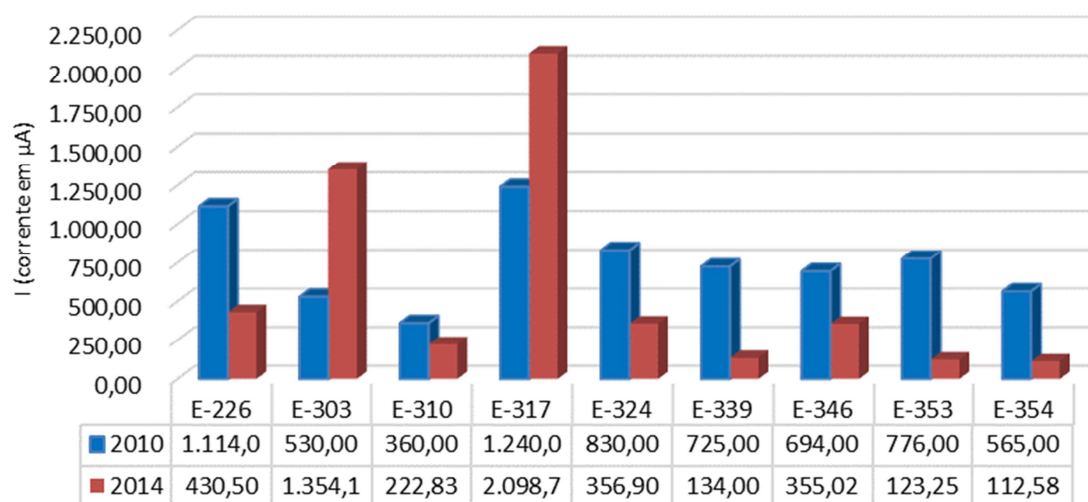


Figura 38 – Resultados das correntes aferidas em 2010 e 2014 (Acervo pessoal, 2014).

Contudo, a presença de umidade verificada nas estacas E-303 e E-317, como mostram as Figuras 29 e 31, podem ser o fator causador destas diferenças, já que ampliam as possibilidades de ocorrência de corrosão.

Estas diferenças são igualmente verificadas na Figura 39, que mostra as medidas individuais realizadas em 2010 e em 2014, onde novamente somente as medidas das estacas E-303 e a E-317 tiveram um comportamento fora do padrão identificado, que é de diminuição e estabilização da corrente ao longo do tempo.

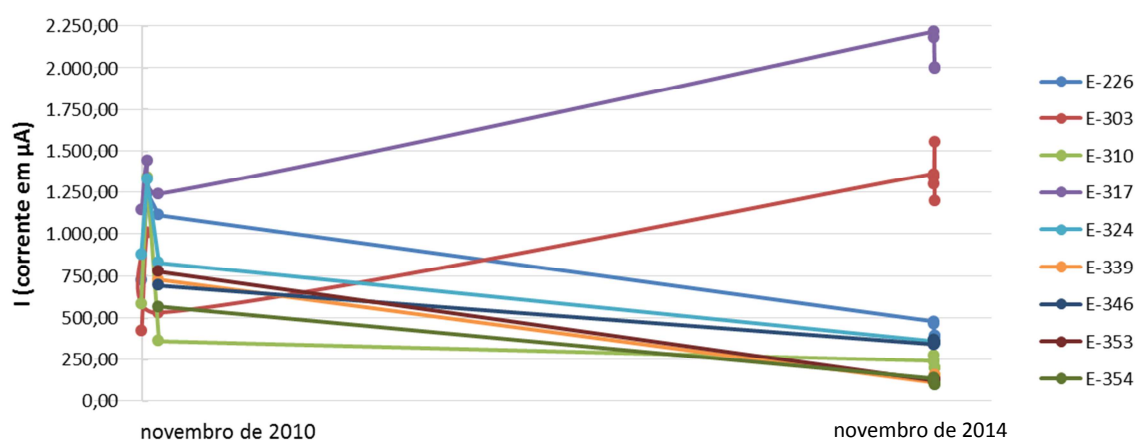


Figura 39 – Resultados das correntes aferidas em 2010 e 2014 (Acervo Pessoal, 2014).

4.4. CONSUMO DA MASSA DOS ÂNODOS DE SACRIFÍCIO

No dia 21 de novembro de 2014 foram extraídos ânodos das estacas E-324, E-310, E-317 e E-303, através de uma janela realizada no concreto.

A Figura 40 indica a aferição da massa dos ânodos retirados das estacas, revelando a diferença de massa consumida, tomando-se como referência a massa inicial de 60 gramas.

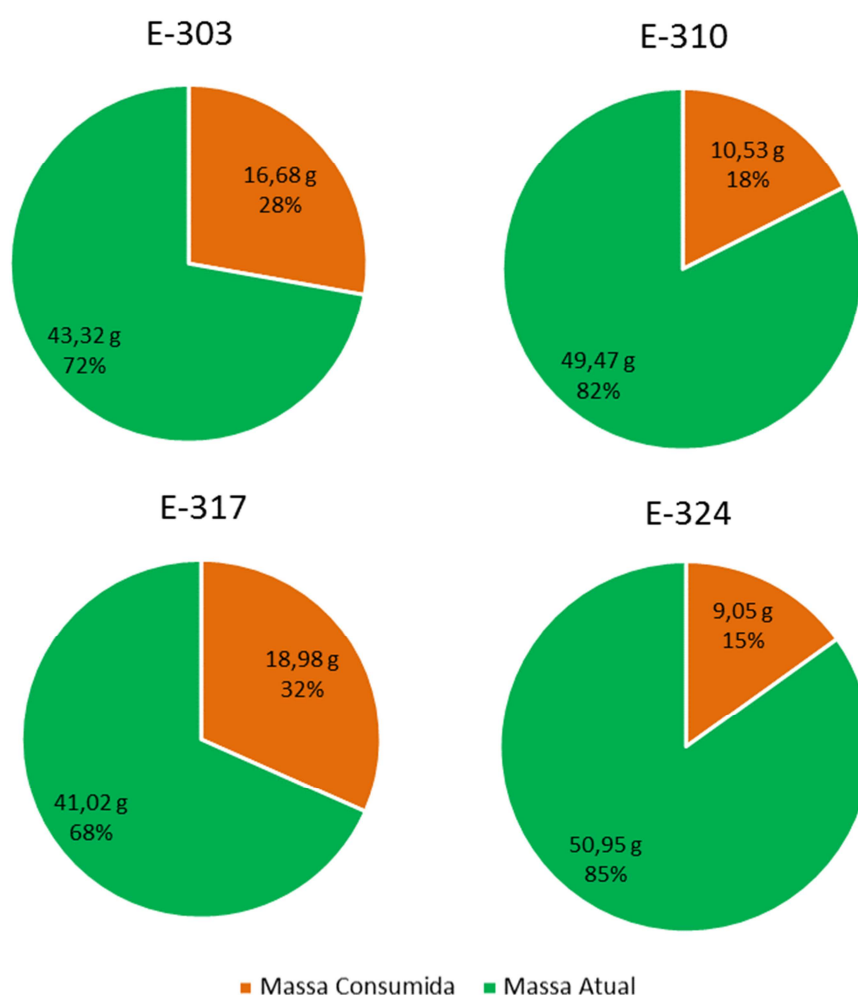


Figura 40 – Resultados das médias das correntes aferidas em 2010 e 2014 (Acervo Pessoal, 2014).

As maiores perdas de massa ocorreram nas amostras E-303 e E-317, na ordem de aproximadamente 30%. Já as amostras E-310 e E-324 tiveram uma perda da ordem de 16,5%.

Pode-se ainda correlacionar a perda de massa com a medição da corrente, conforme constatado na Figura 41, onde fica evidente que há uma correlação entre estas aferições, confirmando os princípios considerados na Lei de Faraday.

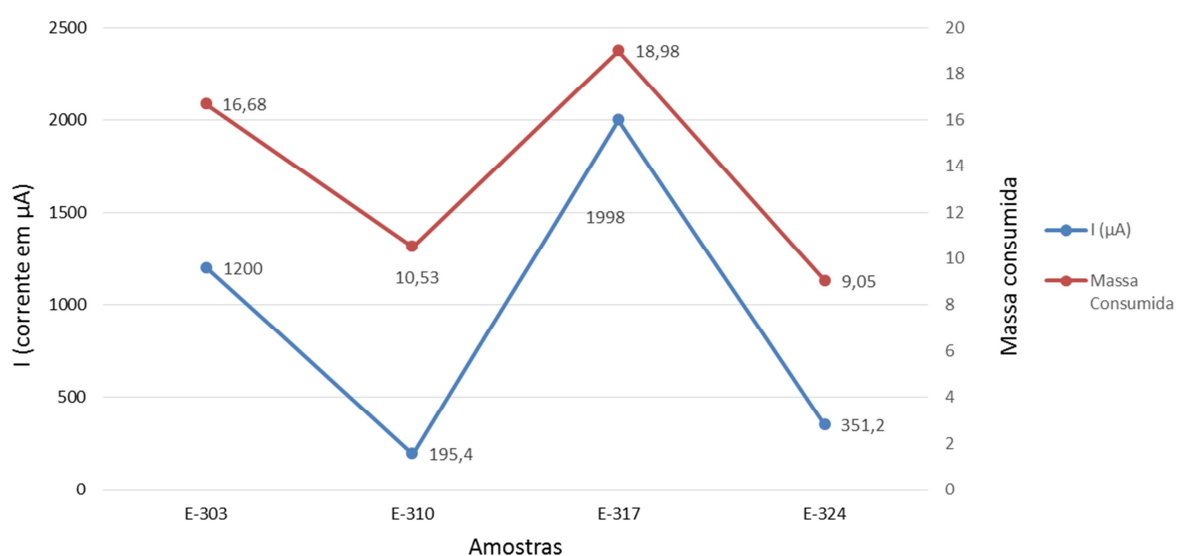


Figura 41 – Correlação entre a perda de massa e a medição corrente atual (Acervo Pessoal, 2014).

4.5. CÁLCULO DA VIDA ÚTIL DOS ÂNODOS

A partir dos resultados obtidos nos itens 4.2 e 4.3, é possível calcular a vida útil dos ânodos de sacrifício extraídos das estacas de concreto armado do píer do TGG (E-303, E-310, E-317 e E-324), através da aplicação da Lei de Faraday descrita nas equações do item 2.2.1.1. Os resultados obtidos em 2014 e utilizados para análise são apresentados na Tabela 4.

Estaca	I Média total (μA)	Massa consumida (g)	Taxa de consumo de massa (g/s)	Tempo em uso da massa (anos)	Vida útil residual (anos)	Vida útil total estimada (anos)
E-303	1.354,17	43,32	6,37226E-07	4,25	2,16	6,41
E-310	222,83	49,47	1,04858E-07	4,25	14,96	19,21
E-317	2.098,75	41,02	9,87603E-07	4,25	1,32	5,57
E-324	356,90	50,95	1,67945E-07	4,25	9,62	13,87

Tabela 4 - Cálculo Estimado da Vida Útil Residual em 2014 (Acervo pessoal, 2014).

Em quatro anos e três meses nota-se que o consumo de massa não foi o mesmo para as estacas, assim como a sua corrente. O ânodo da estaca E-317 possui a maior taxa de consumo de massa neste período, e também foi o mais consumido, com 32% a menos de sua massa inicial. Embora o ânodo da estaca E-310 apresente menor taxa de consumo de massa, o ânodo da estaca E-324 foi o que menos perdeu massa, somente 15%.

Na Figura 42 se ilustra a somatória do tempo de consumo da massa dos ânodos em referência (2010 a 2014) e a vida útil residual, ou seja, a previsão de durabilidade do ânodo de acordo com a massa que ainda não foi consumida.

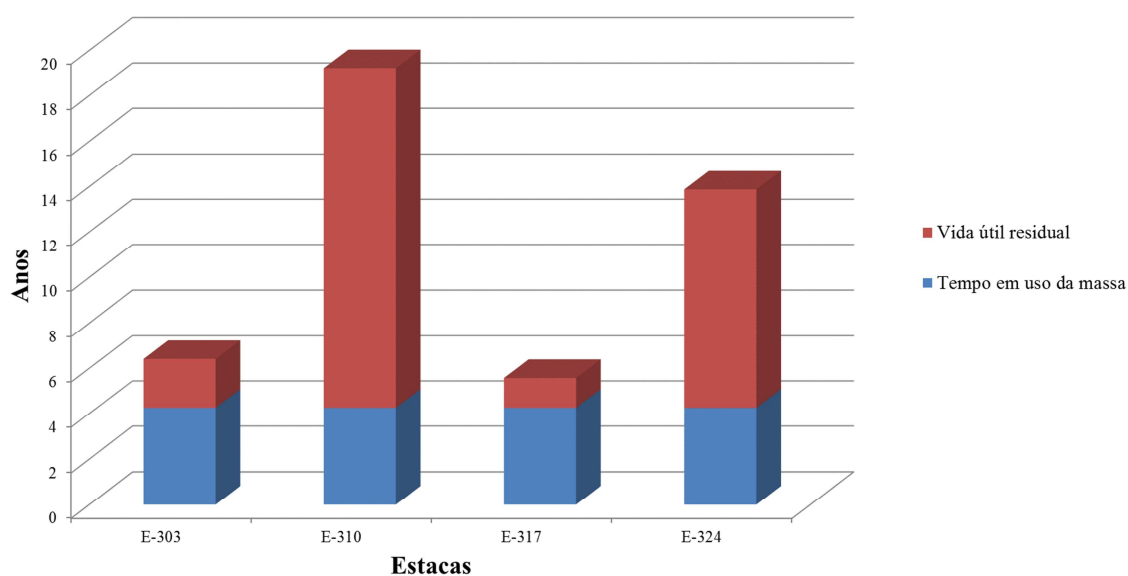


Figura 42 - Gráfico Estimado da Vida Útil Residual em 2014 (Acervo pessoal, 2014).

Utilizando-se os valores da massa consumida, e levando-se em consideração o tempo transcorrido desde a implantação do sistema de proteção catódica, pode-se calcular o valor do fluxo da corrente elétrica que representa este período. A seguir, a Tabela 5 indica os valores calculados para este fluxo, no qual foi denominado de “corrente representativa”.

Estaca	Massa consumida (g)	Tempo de consumo da massa (anos)	I "Representativa" (μA)
E-303	43,32	4,25	285,98
E-310	49,47	4,25	180,54
E-317	41,02	4,25	325,41
E-324	50,95	4,25	155,16

Tabela 5 - Cálculo Estimado da Corrente Representativa do período de 2010 a 2014 (Acervo pessoal, 2014).

Verifica-se que os resultados calculados são até 84% menores que os valores do fluxo da corrente medidos atualmente, e até 81% diferentes dos valores medidos em 2010. Este fato exemplifica que a corrente não se apresenta constante ao longo de sua atuação.

A Figura 43 ilustra num gráfico a diferença entre a “corrente representativa” e as correntes obtidas em 2010 e 2014.

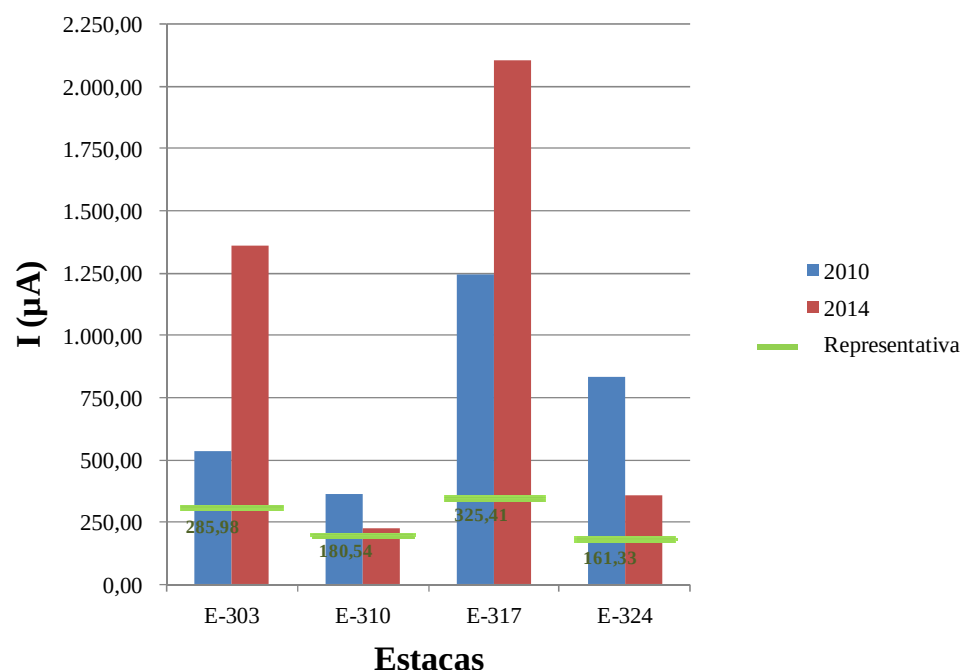


Figura 43 - Gráfico do Fluxo das Correntes (Acervo pessoal, 2014).

Nota-se que entre as estacas a variação da corrente é menor se comparadas a corrente representativa com as correntes medidas em campo. Verifica-se também que a estaca E-310 é a que possuiu menor variação de fluxo, em contrapartida a que sofreu maior variação foi a estaca E-317.

Se levar em consideração que a corrente galvânica representativa seja da ordem de 50% da corrente inicial, segundo Whitmore (2009) é possível determinar e analisar a variação da estimativa da vida útil referente aos distintos valores de fluxo de corrente, a saber:

- valores de corrente obtidos em 2010 através da utilização de multímetro: “Dados de 2010” mostrados na coluna 3 da Tabela 6;
- valores baseados nas medições de 2010, considerando que a corrente medida representa o dobro da corrente de estabilização: “Dados de 2010 corrigido” mostrados na coluna 4 da Tabela 6, ou seja: $I_{\text{corrigida}} = 0,5 \times I$ de “Dados de 2010”;
- valores de corrente obtidos em 2014 através da utilização de multímetro: “Dados de 2014” mostrados na coluna 5 da Tabela 6; e

- valores de corrente calculados através do consumo de massa entre 2010 e 2014: “I representativa” mostrados na coluna 6 da Tabela 6.

A Tabela 6 resume os valores calculados para a estimativa de vida útil.

Estaca	Massa para consumo (g)	Fluxo de Corrente Elétrica (I)				Estimativa de Vida Útil			
		Dados de 2010 (μA)	Dados de 2010 corrigido (μA)	Dados de 2014 (μA)	I Representativa (μA)	Dados de 2010 (anos)	Dados de 2010 corrigido (anos)	Dados de 2014 (anos)	I Representativa (anos)
E-303	60	530,00	327,33	142,99	285,98	7,63	12,35	6,41	14,14
E-310	60	360,00	380,67	90,27	180,54	11,23	10,62	19,21	22,40
E-317	60	1240,00	637,67	162,70	325,41	3,26	6,34	5,57	12,42
E-324	60	830,00	505,33	77,58	155,16	4,87	8,00	13,80	26,06

Tabela 6 - Cálculo das Estimativas de Vida Útil (Acervo pessoal, 2014).

Nota-se que os maiores valores para a estimativa da vida útil são os calculados através da “corrente representativa” e, como esperado, os menores valores são os calculados através da medição da corrente em 2010, visto que os valores iniciais do fluxo costumam ser maiores do que os valores ao longo da utilização dos ânodos.

Entre os “Dados de 2014” e “I representativa” a diferença máxima é de 55% e mínima de 14%; entre os “Dados de 2010 corrigido” essa diferença é de 81% para a máxima e 12% para a mínima. Entre os “Dados de 2010 corrigido” e “I representativa” a diferença máxima é de 69% e a mínima é de 13%.

A Figura 44 ilustra as estimativas de vida útil dos distintos fluxos de corrente obtidos, e apresenta a faixa de durabilidade que o fabricante do ânodo indica para o tipo de ânodo em estudo.

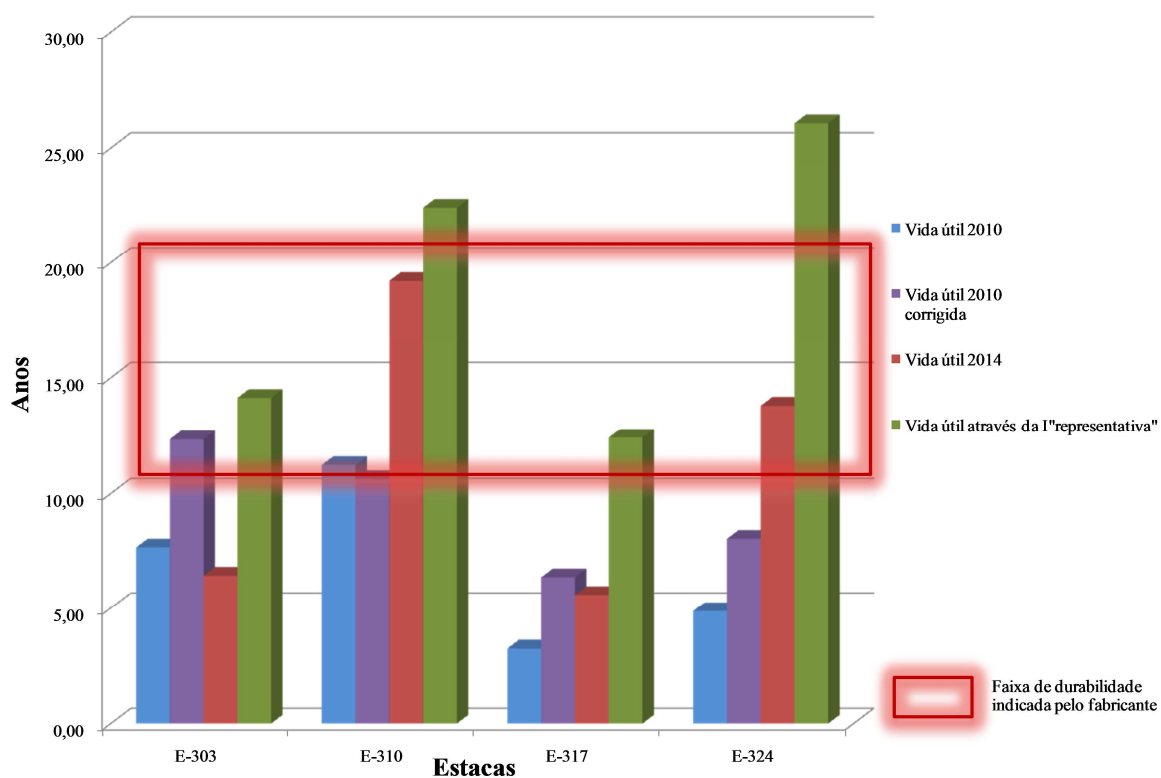


Figura 44 - Gráfico Estimado da Vida Útil (Acervo pessoal, 2014).

Verifica-se que a estimativa que melhor coincide com a indicação do fabricante é a vida útil calculada através da “corrente representativa”. A estimativa mais conservadora é dos valores baseados na estimativa de corrente das medições de 2010 (“Dados de 2010 corrigido”).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as considerações finais deste trabalho, bem como as sugestões para novos estudos na área.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio de uma análise mais aprofundada das fórmulas de previsão (Gentil e Faraday), nota-se que a fórmula do Gentil também é baseada na Lei de Faraday, porém é apresentada de uma forma mais simplificada. Portanto, para se manter a mesma base de cálculo realizada em 2010, utilizou-se a fórmula de previsão de vida útil baseada na Lei de Faraday, mais comumente utilizada internacionalmente.

Após a análise comparativa dos resultados verificou-se que a estimativa de previsão da vida útil dos ânodos de sacrifício de zinco apresenta grande variação entre a atual e a baseada nos estudos realizados anteriormente.

Através da inspeção visual foi possível detectar que as estacas em referência que foram recuperadas em 2010 não possuem anomalias que indiquem corrosão das armaduras, tampouco outras manifestações patológicas significativas. Porém, a viga acima das estacas E-303 e E-317 possui um foco de infiltração que atinge a parte superior dessas estacas.

Comparando os valores de corrente obtidos em 2010 e 2014 tem-se que na maioria dos casos há uma queda de corrente variando entre 39% a 84%. Somente em dois casos das estacas E-303 e E-317 houve um aumento significativo da corrente, em média de 200%, estacas estas que podem estar sofrendo influência da infiltração supramencionada.

As mesmas estacas, E-303 e E-317, possuíram também valores superiores de consumo da massa dos ânodos de sacrifício medidos, 30% de perda

em relação a massa inicial. Já as demais estacas apresentaram perda de 16,5% da massa.

Logo, considera-se que quanto maior a corrente maior será o consumo da massa dos ânodos de sacrifício, conforme prevê a teoria de Faraday.

Em relação aos valores calculados de vida útil, observou-se uma grande diferença entre as correntes consideradas (2010, 2010 corrigida, 2014 e a Representativa), apresentadas na Tabela 6. A vida útil que mais se aproximou ao estipulado pelo fabricante (entre 10 a 20 anos) foi com o cálculo da corrente Representativa. Em geral os maiores valores de vida útil estão relacionados às estacas que não apresentaram infiltração.

As informações obtidas através da revisão bibliográfica indicam que um conjunto de fatores pode interferir na corrente do circuito gerado pelo sistema ânodo - armadura e assim resultar em um maior consumo de massa do ânodo. Dentre os itens citados, os agentes que podem estar presentes no ambiente do caso apresentado são: cloretos, umidade e temperatura.

Assim acredita-se que para o caso em estudo, o contato com um ambiente agressivo (região marítima) e com presença de umidade constante, no qual as estacas de concreto do píer do Terminal de Granéis de Guarujá estão localizadas, podem influenciar na corrente real, consequentemente na massa consumida do ânodo e na previsão da vida útil da proteção catódica.

No entanto a inconstância da intensidade da corrente não é levada em consideração nas equações de Faraday e de Gentil para o cálculo da vida útil dos ânodos e seu consequente dimensionamento.

Também não é válido o cálculo de vida útil realizado de forma pontual, já que a corrente pode variar por vários fatores já citados anteriormente.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se abaixo proposições para novos trabalhos relacionados ao presente estudo:

- a) Continuidade da monitoração da corrente galvânica, juntamente com leituras de temperatura, para possibilitar estimativas mais realistas da vida útil dos ânodos;
- b) Realizar um programa de ensaios em peças de concreto armado contaminados somente com um ou mais agentes que influenciem no consumo de massa de ânodos de sacrifício de zinco, para identificar a influência de cada agente, com possíveis variações de traços de concreto;
- c) Ampliar as pesquisas para a proteção catódica em geral no concreto armado e protendido; e
- d) Estudar a efetividade da proteção em relação ao espaçamento dos ânodos.

6. REFERÊNCIAS

ANDRADE, C.; GONZALEZ, J. A. **Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras. Informes de la Construcción.** Espanha, 1988.

ÁVILA, J.; GENESCÁ, J. **Más allá de la herrumbre II. La lucha contra la corrosión.** Terceira Edição, 1995. Disponível em: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_7.htm> Acesso em 02/11/2014.

BERTOLINI, L. **Materiais de Construção – Patologia, Reabilitação, Prevenção.** Oficina de Texto. São Paulo, 2010.

BRITISH STANDARD. **Cathodic Protection - code of practice for land and marine applications.** BS 7361 Part 1: 1991.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas.** Goiania: UFG, 1997.

CASTINHEIRAS, W. G. e OLIVER, J. H. **Apostila: Proteção Catódica, O Efetivo Combate à Corrosão.** PETROBRAS, 2001.

CHRISTOPHER, L. P.; S. GEOGI. **Developments in Cathodic Protection Applied to Reinforced Concrete.** Journal of materials in civil engineering. February, 2000.

DAVIS, J.R. **Corrosion – Understanding the basics.** ASM International, 2000.

DUTRA, Aldo C. e NUNES, Laerce P. **Proteção Catódica, Técnica de Combate à Corrosão** Rio de Janeiro, J. R. Editora, 1991.

DUTRA, Aldo Carneiro. **Proteção catódica: técnica de combate à corrosão.** Rio de Janeiro, 2006.

EXATA – **Projetos de recuperação de cais do TGG – Terminal de Granéis do Guarujá** – São Paulo, 2015.

FIGUEIREDO, E. J; MEIRA, G. R. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo, IBRACON, 2011.

GENTIL, Vicente. **Corrosão.** Rio de Janeiro, 1ª Edição, 1996. 4ª Edição, 2003. 5ª Edição, 2007.

GENTIL, Vicente. **Proteção Catódica**. Rio de Janeiro, 1977.

GLASS, G.K., Buenfeld, N.R. **Corrosion Science**. 1997.

GOOGLE MAPS. **TGG – Terminal de Granéis do Guarujá**. Disponível em <<https://www.google.com.br/maps/place/TGG+-+Terminal+de+Gran%C3%A9is+do+Guaruj%C3%A1/@-23.9684002,-46.2929422,5861m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x94ce02285de3b937:0x2cdd52d3df6d7a99>>. Acesso em: 17/11/2014.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993.

HELENE, P. **Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo, 2003.

HOAR, T. P. **Proceedings Royal Society**. Londres, 1976.

JORNAL DO BRASIL. **Um Niemeyer na Favela: Igreja São Daniel, em Manguinhos, está abandonada**. Disponível em <<http://www.jb.com.br/rio/noticias/2012/12/10/um-niemeyer-na-favela-igreja-sao-daniel-em-manguinhos-esta-abandonada/>>. Acesso em 13/07/2014.

JORNAL FOLHA DE SÃO PAULO. **Igreja de Niemeyer ameaça desabar no Rio**. Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u66439.shtml>> Acesso em 31/07/2014.

LOURENÇO, M. Zita - **Corrosão em estruturas de concreto armado – Técnicas eletroquímicas para a reabilitação de estruturas** – Rio de Janeiro, 2014.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, 2008.

MONTEIRO, Eliana Barreto. **Causas da corrosão, fatores desencadeadores e fatores acelerantes**. Poli USP, Notas de aula. São Paulo, 2009.

MONTEIRO, Eliana Barreto. **Fundamentos da corrosão, proteção e durabilidade das armaduras**. Poli USP, Notas de aula. São Paulo, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo, 1997.

NUNES, Laerce P. e LOBO, Alfredo Carlos O. - **Pintura Industrial na Proteção Anti-corrosiva**, Rio de Janeiro, 1997.

O GLOBO. **Justiça absolve acusado na tragédia da fonte nova**. Disponível em <<http://oglobo.globo.com/esportes/justica-absolve-acusado-na-tragedia-da-fonte-nova-3202160>> Acesso em 13/07/2014.

PANNONI, Fabio Domingos. **Durabilidade de Estacas Metálicas Cravadas no Solo**. São Paulo, 2000.

P. E. FRANCIS. **Cathodic Protection**. NPL - National Physical Laboratory Publication. Londres, 2014.

RIBEIRO, V. R.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; ALMEIDA, F.C.R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Rio de Janeiro, 2014.

RODRIGUES, J. C. **Ânodos de Sacrifício para Proteção Catódica em Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2005.

RODRIGUES, J. C. **Bom concreto (armado) versus corrosão**. Revista recuperar, n.44. Rio de Janeiro, 2001.

RODRIGUES, J. C. **Corrosão tem fim. Use proteção catódica**, pp 5-9. Revista Recuperar, Instituto de Patologia da Construção. Rio de Janeiro, 2005.

SERGI, GEORGE **Ten Year Results of Galvanic Sacrificial Anodes en Steel Reinforced Concrete**. European Corrosion Congress (EUROCORR). France, 2009.

SERGI, G; PAGE. C. L. **Sacrificial anodes for cathodic protection of reinforcing steel around patch repairs applied to chloride-contaminated concrete**, European Corrosion Congress (EUROCORR). Germany, 1999.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Manual Patologia, recuperação e reforço das estruturas de concreto**. São Paulo, 1998.

SOUZA, Carlos A. C. de. **Corrosão em estruturas de concreto armado – Princípio da corrosão eletroquímica** Rio de Janeiro, 2014.

Terminal de Granéis do Guarujá (TGG). **Conteúdo histórico do site**. Disponível em <<http://www.tgg.com.br/>>. Acesso em: 08/11/2014.

TOMASHOV, N. D. **Theory of Corrosion and Protection of Metals**. New York, 1986.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). **Corrosão e processos eletroquímicos II - Notas de aula**. Disponível em <http://www.ufrgs.br/lapec/crbst_11.html>. Acesso em: 02/09/2014.

VECTOR. **Especificações e Manuais de Ânodos de sacrifício**. Disponível em: <<http://www.vector-corrosion.com/wordpress/wordpress/wp-content/uploads/2013/07/Galvashield-XP-General-Specification-June-2013.docx>> Acesso em 02/11/2014.

WEBER. **Catálogo digital – Proteção de estruturas**. Disponível em <<http://www.weber.com.br/reparos-reforco-e-protecao/produtos/protecao-de-estruturas/webertec-galvashield-xp2.html>>. Acesso em 10/10/2014.

WHITMORE, D.W,; BALL, J.C. **Galvanic Protection for Reinforced Concrete Bridge Structures: Case Studies and Performance Assessment**. Australasian Corrosion Conference. Australia, 2009.

W. VON BAECKMANN, W. SCHWENK AND W. PRINZ - **Handbook of Cathodic Corrosion Protection - Theory and Practice of Electrochemical Protection Processes**. England, 1997.