



**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE ÂNODOS DE SACRIFÍCIO
APLICADOS EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO EM ZONA
DE VARIAÇÃO DE MARÉ**

SÃO PAULO
2010



CAMILA MENDES DE MATTOS

DOUGLAS LOPES GUILHEM

ERISTON CARLOS DA PAIXÃO

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE ÂNODOS DE SACRIFÍCIO
APLICADOS EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO EM ZONA
DE VARIAÇÃO DE MARÉ**

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

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca

Co-orientador: M.Sc. Thomas Carmona

SÃO PAULO
2010

AGRADECIMENTOS

Ao engenheiro civil M.Sc. Thomas Carmona e Dr. Antonio Carmona, pela valiosa colaboração no levantamento de dados bibliográficos e de campo deste trabalho.

Ao Terminal de Graneis do Guarujá (TGG) em especial ao Sr Ivan Modolo por permitir a realização de ensaios nas estacas do terminal.

À NOVATA ENGENHARIA por fornecer embarcação e mão de obra para o auxílio da execução dos ensaios em campo.

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE ÂNODOS DE SACRIFÍCIO APLICADOS EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO EM ZONA DE VARIAÇÃO DE MARÉ

Por

CAMILA MENDES DE MATTOS

DOUGLAS LOPES GUILHEM

ERISTON CARLOS DA PAIXÃO

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.

Curitiba (PR) ____ de ____ de ____.

Nome do Professor Orientador

Nome do Prof. Co-orientador

Nome do terceiro professor integrante da banca

RESUMO

Procura-se com este trabalho avaliar a durabilidade de ânodos de sacrifício utilizados como proteção catódica contra a corrosão de estacas de concreto armado, cravadas em solo marinho e em região sujeita a variação de maré. A proteção catódica é uma técnica bastante utilizada atualmente e, para sua utilização e estudos neste trabalho, foram necessários diversos ensaios preliminares, os quais apontaram para a empregabilidade desta técnica no que tange um possível aumento da vida útil da estrutura. Após os resultados dos ensaios preliminares, foram definidos dois diferentes tipos de reparos necessários à estrutura, para estes ensaios a técnica de proteção catódica foi empregada e estudada. Tão logo os reparos foram executados e a proteção utilizada, foram feitos novos ensaios, desta vez com o intuito de comprovar a durabilidade dos ânodos, cujos resultados mostraram-se satisfatórios.

Palavras chave: Proteção catódica, corrosão, variação de maré, estacas armadas, vida útil.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO PARA O SISTEMA FE-H ₂ O A 25°C (POURBAIX 1961).....	25
FIGURA 2 – ARMADURA PASSIVADA.....	26
FIGURA 3 - MECANISMO DE CORROSÃO. (CARMONA).....	29
FIGURA 4 - CONCEITUAÇÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO COM RELAÇÃO À CORROSÃO DAS ARMADURAS DE TUUTI (1982), AMPLIADO POR HELENE (1993).	31
FIGURA 5 – REPARO TIPO 1.....	47
FIGURA 6 – REPARO TIPO 2.....	48
FIGURA 7 – REPARO TIPO 3.....	49
FIGURA 8 – REPARO TIPO 4.....	50
FIGURA 9 – REPARO TIPO 5.....	51
FIGURA 10 – POSICIONAMENTO DAS ESTACAS	52
FIGURA 11 – VISTA DO CORTE DA DISTRIBUIÇÃO E MONTAGEM DOS ÂNODOS.....	57
FIGURA 12 – VISTA EM PERSPECTIVA DA DISTRIBUIÇÃO E MONTAGEM DOS ÂNODOS	58
FIGURA 13 – VISTA EM PLANTA DO RAIO DE INFLUÊNCIA DO ÂNODO	58
FIGURA 14 – ESQUEMA PARA LEITURA	71

LISTA DE FOTOS

FOTO 1 – ESTACA TIPO 1, ANTES DO REPARO -----	38
FOTO 2 – ESTACA TIPO 1, ANTES DO REPARO. -----	39
FOTO 3 – ESTACA TIPO 2, ESTACA ANTES DO REPARO -----	39
FOTO 4 – LIMPEZA DAS ESTACAS -----	59
FOTO 5 – ESTACA CUJA LIMPEZA FOI CONCLUÍDA -----	59
FOTO 6 – ESTACA EM FASE DE ESCARIFICAÇÃO -----	60
FOTO 7 – ARMAÇÃO IMPEDIDA -----	61
FOTO 8 – ARMAÇÃO LIVRE DE IMPEDIMENTOS DE ACESSO -----	61
FOTO 9 – ESPAÇO ABERTO AO REDOR DA ARMAÇÃO -----	62
FOTO 10 – ARMAÇÃO LIMPA APÓS HIDROJATEAMENTO -----	62
FOTO 11 – COLORAÇÃO TÍPICA DA ARMAÇÃO -----	63
FOTO 12 – PERFURAÇÃO DA LAJE E FIXAÇÃO DE ARRANQUES -----	63
FOTO 13 – PERFURAÇÃO DA LAJE E FIXAÇÃO DE ARRANQUES -----	64
FOTO 14 – ANCORAGEM QUÍMICA DOS ARRANQUES -----	64
FOTO 15 – ANCORAGEM QUÍMICA DOS ARRANQUES, OUTRO EXEMPLO. -----	65
FOTO 16 – BASE DE FORMA, VISTA SUPERIOR -----	65
FOTO 17 – BASE DE FORMA, VISTA LATERAL -----	66
FOTO 18 – BASE DE FORMA INSTALADA NA ESTACA -----	66
FOTO 19 – CONFECÇÃO DA ARMAÇÃO -----	67
FOTO 20 – COLOCAÇÃO DOS ESPAÇADORES E ÂNODOS -----	67
FOTO 21 – ARMAÇÃO POSICIONADA NA ESTACA -----	68
FOTO 22 – FABRICAÇÃO DAS FORMAS NOS BERÇOS -----	68
FOTO 23 – FORMA PRONTA PARA INSTALAÇÃO -----	69
FOTO 24 – INSTALAÇÃO DA FORMA -----	69
FOTO 25 – AJUSTES DA FORMA NA ESTACA -----	70
FOTO 26 – DISPOSITIVOS DE ACOMPANHAMENTO -----	70
FOTO 27 – FIXAÇÃO COM ANCORAGEM QUÍMICA -----	71
FOTO 28 – FIXAÇÃO COM ANCORAGEM QUÍMICA -----	72
FOTO 29 – DETALHE DO ÂNODO INSTALADO E DO ESPAÇADOR -----	72
FOTO 30 – INSTALAÇÃO DO DISPOSITIVO -----	73
FOTO 31 – VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA -----	74
FOTO 32 – VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA DO GRAUTE -----	74
FOTO 33 – MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA -----	75
FOTO 34 – ESTACA DESFORMADA -----	75
FOTO 35 – COMPLEMENTO FINAL COM ARGAMASSA TIXOTRÓPICA -----	76

FOTO 36 - LEITURA DA CORRENTE GALVÂNICA -----	78
FOTO 37 – PESAGEM DA PASTILHA DE ZINCO -----	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - APLICAÇÕES TÍPICAS DOS ÂNODOS GALVÂNICOS.	33
TABELA 2 - APLICAÇÕES TÍPICAS DOS ANODOS INERTES.....	34
TABELA 3 – AGRESSIVIDADE DA ÁGUA	44
TABELA 4 - ESTACAS A SEREM ANALISADAS	77
TABELA 5 – RESULTADOS OBTIDOS	78
TABELA 6 – DADOS PARA ANÁLISE PELA LEI DE FARADAY	80
TABELA 7 – DADOS DA ESTACA 226, ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DOS ÂNODOS	81
TABELA 8 – DADOS DA ESTACA 303, ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DOS ÂNODOS.	83
TABELA 9 – DADOS DA ESTACA 310, ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DOS ÂNODOS.	86
TABELA 10 – DADOS DA ESTACA 317, ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DOS ÂNODOS.....	88
TABELA 11 – DADOS DA ESTACA 324, ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DOS ÂNODOS.....	90
TABELA 12 – RESUMO DOS RESULTADOS DAS MEDIDAS DE CORRENTE (AMPERAGEM) NAS ESTACAS	92
TABELA 13 – RESUMO DOS RESULTADOS DAS MEDIDAS DE CORRENTE E MASSA CONSUMIDA	94

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 – CONSUMO DE PASTILHAS	53
EQUAÇÃO 2 – VARIAÇÃO DO PODER DE COBERTURA EM FUNÇÃO DA SUPERFÍCIE	55
EQUAÇÃO 3 – ESPAÇAMENTO ENTRE AS UNIDADES DE PASTILHA.....	56
EQUAÇÃO 4 – EQUAÇÃO DE FARADAY.....	79

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – DISTRIBUIÇÃO RELATIVA DA INCIDÊNCIA DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO APARENTE – HELENE (1992).....	18
GRÁFICO 2 – CORRENTE GALVÂNICA NO ÂNODO – ESTACA 226	82
GRÁFICO 3 – CORRENTE GALVÂNICA NO ÂNODO – ESTACA 303	84
GRÁFICO 4 – CORRENTE GALVÂNICA NO ÂNODO – ESTACA 310	86
GRÁFICO 5 – CORRENTE GALVÂNICA NO ÂNODO – ESTACA 317	88
GRÁFICO 6 – CORRENTE GALVÂNICA NO ÂNODO – ESTACA 324	91
GRÁFICO 7 – EVOLUÇÃO DA CORRENTE EM FUNÇÃO DO TEMPO	93
GRÁFICO 8 – CORRENTE GALVÂNICA NO ÂNODO, RESUMO GERAL	93
GRÁFICO 9 – QUANTIDADE DE MASSA CONSUMIDA, RESUMO GERAL	95
GRÁFICO 10 – ESTIMATIVA DE DURABILIDADE DOS ÂNODOS.	95
GRÁFICO 11 - TENDÊNCIA DA EVOLUÇÃO DA CORRENTE EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	97

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
FOLHA DE APROVAÇÃO	6
RESUMO	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE FOTOS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE EQUAÇÕES.....	12
LISTA DE GRÁFICOS	13
SUMÁRIO.....	14
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	19
1.2. OBJETIVOS.....	19
1.2.1. Objetivo Geral	19
1.2.2. Objetivos Específicos	19
1.3. HIPÓTESE	19
1.4. JUSTIFICATIVAS	20
1.4.1. Tecnológicas.....	20
1.4.2. Econômicas	20
1.4.3. Sociais	20
1.4.4. Ecológicas	21
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. CORROSÃO DE ARMADURAS	23
2.1.1. Passivação	26
2.1.2. Despassivação	26
2.2. MECANISMOS DE CORROSÃO	28
2.3. VIDA ÚTIL.....	29

2.4. PROTEÇÃO CATÓDICA	32
2.4.1. Proteção catódica galvânica	33
2.4.2. Proteção catódica por corrente impressa.....	34
3. ESTUDO DE CASO.....	37
3.1. DADOS DA OBRA E ENSAIOS PRELIMINARES.....	37
3.1.1. Classificação dos Danos estudados.	38
3.2. ENSAIOS PARA DIAGNOSTICO	40
3.2.1. RESISTÊNCIA DO CONCRETO	40
3.2.2. ÍNDICE DE VAZIOS APÓS SATURAÇÃO E FERVURA. ...	40
3.2.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	41
3.2.4. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ULTRA- SOM	41
3.2.5. TEOR DE CLORETOS	41
3.2.6. TEOR DE SULFATOS	42
3.2.7. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	43
3.2.8. POTENCIAL ELÉTRICO DE CORROSÃO	43
3.2.9. UMIDADE RELATIVA DO AR, TEMPERATURA AMBIENTE E DA ÁGUA	43
3.2.10. AGRESSIVIDADE DA ÁGUA.....	44
3.3. TERAPIA PROPOSTA	45
3.4. EXECUÇÃO DOS REPAROS	52
3.4.1. Remoção Mecanizada da Vida Marinha	59
3.4.2. Escarificação das Estacas	60
3.4.3. Abertura de espaços ao redor da armação	60
3.4.4. Limpeza com Hidrojato.....	62
3.4.5. Fixação dos Arranques da Armadura Complementar	63
3.4.6. Ancoragem Química dos Arranques	64
3.4.7. Montagem de Base de Forma das Estacas	65
3.4.8. Montagem da Armadura Complementar e Instalação de Ânodos de Sacrifício	66

3.4.9. Montagem e Instalação de Formas.....	68
3.4.10. Instalação do Dispositivo de Acompanhamento dos Ânodos....	70
3.4.11. Preenchimento das Formas com Graute Submerso	73
3.4.12. Complemento Final com Argamassa Estrutural	76
3.4.13. Monitoração do Desempenho.....	77
3.4.14. Cálculo da vida útil do ânodo.....	79
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	92
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

1. INTRODUÇÃO

O foco principal deste trabalho é dar uma contribuição na avaliação da durabilidade de mini ânodos de sacrifício instalados em estrutura de concreto armado em zona de variação de maré.

A proteção catódica é uma técnica bastante utilizada atualmente, principalmente em estruturas submersas presentes em ambientes agressivos, especialmente os ambientes marinhos em regiões de variação de maré.

Segundo GONÇALVES, ANDRADE & CASTELLOTE, essa técnica foi empregada pela primeira vez em 1955 em estruturas de concreto armado submersas ou enterradas. Na década de 70 houve novamente o emprego em estruturas não enterradas e em 1990 esta técnica passou a ser utilizada de maneira preventiva.

É especificamente empregada em situações onde há corrosão de armaduras ou, de maneira preventiva, evitando que a corrosão se instale.

Sabe-se que a corrosão de armaduras constitui uma das principais manifestações patológicas que afetam a durabilidade e estabilidade de uma estrutura. HELENE (1992) apresenta o Gráfico 01 de distribuição relativa da incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado. Verifica-se que a corrosão de armaduras ocupa 20% deste universo, estando entre as 3 maiores causas das degradações das estruturas.

Esta deterioração da armadura implica em perda de seção com aumento de volume, formando produtos expansivos que causarão a fissuração do concreto.

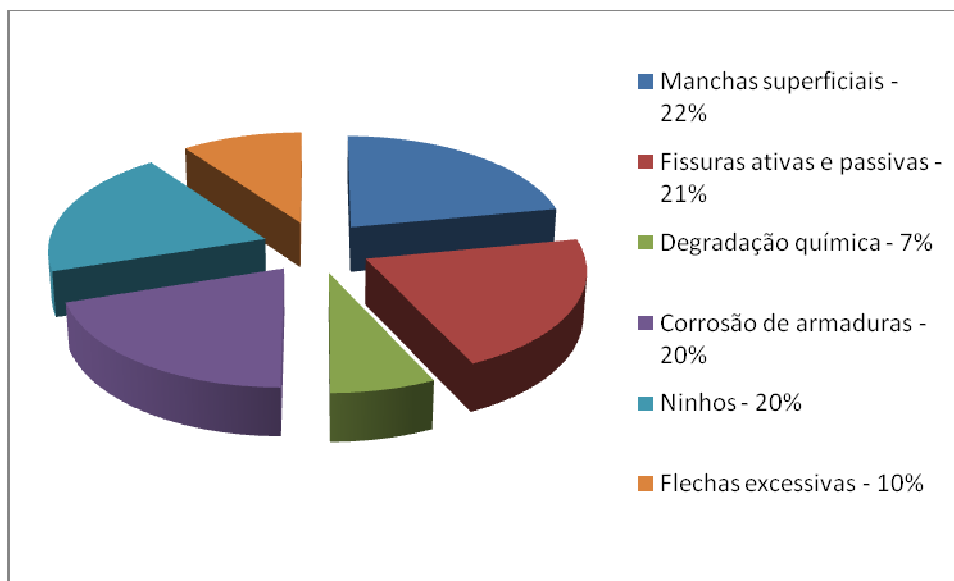


Gráfico 1 – Distribuição relativa da incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto aparente – HELENE (1992).

Para evitar o avanço desta corrosão podem ser empregadas diversas técnicas de proteção e recuperação da estrutura. Toda recuperação, reparo ou reforço é um processo de trabalho complexo, no qual é necessário ter acesso a todos os projetos relacionados ao empreendimento, realizar inspeções visuais, ensaios não destrutivos e destrutivos para determinar as causas geradoras do problema patológico e assim poder indicar uma terapia mais eficaz.

Estas técnicas podem variar desde um simples reparo superficial localizado de um elemento estrutural que não teve perda significativa de sua capacidade portante até a recuperação de um elemento completamente deteriorado.

Para a determinação de uma terapia eficaz, são necessários diversos ensaios e medidas para diagnosticar o problema patológico.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Qual a durabilidade dos ânodos de sacrifício instalados em estruturas de concreto armado em zona de variação de maré?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Verificar a durabilidade dos ânodos de sacrifício utilizados como proteção catódica em estruturas de concreto armado localizadas em zona de variação de maré.

1.2.2. Objetivos Específicos

Avaliar a durabilidade de ânodos de sacrifício em estacas de concreto armado em zona de variação de maré.

1.3. HIPÓTESE

Os ânodos de sacrifício têm durabilidade superior a 10 anos se atendidos os critérios de distribuição estabelecidos pelo fabricante.

1.4. JUSTIFICATIVAS

1.4.1. Tecnológicas

Os dados existentes sobre a durabilidade dos ânodos de sacrifícios são escassos e podem variar muito em função da agressividade do ambiente, da contaminação da estrutura, temperatura etc.

Assim sendo é importante aumentar o conhecimento sobre este assunto para possibilitar análises de custo benefício na implantação deste tipo de solução.

1.4.2. Econômicas

Ao lançar-se da proteção citada, será conferida à estrutura a durabilidade esperada por meio da proteção contra a corrosão do ambiente.

O custo da implantação desta proteção é inicialmente alto, porém em função de sua durabilidade, pode tornar a opção economicamente viável.

1.4.3. Sociais

Tratando-se de um porto público, a recuperação desta estrutura torna-se importante por manter e conferir durabilidade a um bem público, valorizando assim o emprego inicial de recursos e devolvendo à estrutura sua capacidade de atuação para benefício da sociedade.

1.4.4. Ecológicas

Solução ambientalmente correta, não gera resíduos e nem utiliza produtos químicos agressivos, bem como espera-se que conferira melhor resultado do que os tratamentos convencionais.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para atingir os objetivos desta pesquisa, foram seguidos, na ordem, os seguintes passos metodológicos:

- Ampla revisão bibliográfica que embasasse o conteúdo apresentado;
- Consulta de documentos subsidiassem a realização do trabalho, tais como projetos da estrutura, ensaios de outras datas, relatórios diversos e desenhos;
- Aplicação da técnica de proteção catódica nos reparos Tipo 1 e Tipo 2 com instalação de ânodos de monitorados;
- Por último, avaliação da durabilidade dos anodos instalados.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho apresenta 5 capítulos que visam aprofundar o estudo da durabilidade de ânodos em estruturas de concreto.

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como delineia 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 a corrosão em si, explicando mais detalhadamente sobre a passivação e despassivação das armaduras, mecanismos da corrosão, vida útil e proteção catódica.

O **Capítulo 3** trata sobre o estudo de campo empregado neste trabalho, apresentando a descrição da obra, classificação dos danos encontrados, plano de amostragem e os ensaios para diagnóstico, tais como teor de cloretos, sulfatos, resistência à compressão, profundidade de carbonatação, potencial elétrico de corrosão, agressividade da água etc.

O **Capítulo 4** apresenta a análise dos resultados deste estudo com base nos ensaios empregados e na metodologia de recuperação em si.

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

Neste capítulo foram apresentados o problema da pesquisa e os objetivos que motivaram a realização deste trabalho. Considerando-se a hipótese de, ao final dos esforços, conferir o consumo do ânodo de sacrifício e conseqüentemente estimar a sua durabilidade no ambiente no qual foram aplicados, foram então embasadas justificativas para o emprego da técnica de proteção catódica por ânodos de sacrifício.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados estudos relacionados ao trabalho com base em literatura abrangente do assunto.

2.1. CORROSÃO DE ARMADURAS

Para HELENE (2002) corrosão das armaduras de concreto é como o fenômeno de natureza eletroquímica que pode ser acelerado pela presença de agentes químicos externos ou internos ao concreto.

Segundo ANDRADE (2001), a corrosão das armaduras é caracterizada por ser um processo físico-químico gerador de hidróxidos e óxidos de ferro, chamados de produtos de corrosão, que por sua vez ocupam um volume significativamente superior ao volume original das barras metálicas. Esse produto pode ser identificado pela sua coloração marrom-avermelhada que, segundo METHA E MONTEIRO (1994), podem se expandir 600 % do volume do metal original. Segundo CÁNOVAS (1988 apud CASCUDO, 1997), esse aumento de volume pode gerar pressões que podem atingir valores de até 40 MPa.

Resumidamente corrosão é um processo eletroquímico, onde envolve corrente elétrica, e reações químicas de perda e de ganho de elétrons. Esse processo é denominado “pilha”, que por sua vez é considerada uma célula galvânica ou voltaica.

Para se gerar uma pilha eletroquímica é necessária um circuito fechado, onde haja uma diferença de potencial entre dois eletrodos (ânodo e cátodo). No ânodo ocorre a oxidação, ou seja, libera elétrons (corrosão), e no cátodo ocorrem as reações de redução, ou seja, recebe elétrons.

Esses eletrodos (ânodo e cátodo) devem estar envoltos por um eletrólito, que é o condutor (um líquido). Se retirarmos um desses componentes elimina-se a pilha e conseqüentemente, diminui a possibilidade de corrosão.

Para que haja corrosão é necessária a existência e a permanência de eletrólito, diferença de potencial e oxigênio.

O eletrólito permitir a mobilidade aos íons para que se possam combinar e assim formar os produtos da corrosão. No concreto armado o eletrólito é constituído pela solução aquosa retida nos poros do concreto saturado por produtos da hidratação que situam o pH da fase aquosa entre 12,5 e 13,5.

Segundo Andrade (1992) a diminuição da alcalinidade e presença de cloretos são essencialmente as duas causas, também conhecida como fatores desencadeantes, que podem dar lugar a camada passivante do aço.

A presença de uma quantidade suficiente de cloretos, que podem ter sido incorporados durante o preparo do concreto ou ter penetrada do meio externo durante o passar do tempo, ou por outros íons despassivante em contato com a armadura.

A diminuição da alcalinidade do concreto através de reações químicas geradas por substancias ácidas do meio em contato com o concreto.

A diferença de potencial pode ser originada por inúmeras situações como: diferenças de umidade e concentração salina, metais diferentes embutidos no concreto, etc.

O oxigênio é necessário porque participa das reações químicas envolvidas na formação da ferrugem (óxidos e hidróxidos de ferro). No entanto, a participação do oxigênio é dependente do teor de umidade do concreto: em caso de totalmente úmidos, a difusão de CO_2 é muito lenta e, conforme CASCUDO (1997), para que o oxigênio seja consumido ele precisa estar no estado dissolvido.

O oxigênio e a umidade são considerados como fatores acelerantes do processo de corrosão. Uma vez que a camada passivadora foi destruída e a armadura esta exposta, o oxigênio e a umidade são fatores que interferem no período de propagação seja mais ou menos rápido.

Assim como o equilíbrio das reações de corrosão dependem pH, o potencial do processo de corrosão depende do, equilíbrio das reações de corrosão, sendo assim, pode-se estabelecer uma relação em função do pH, representando graficamente como diagrama de Pourbaix para o Fe a 25°C, conforme é mostrado na Figura 1.

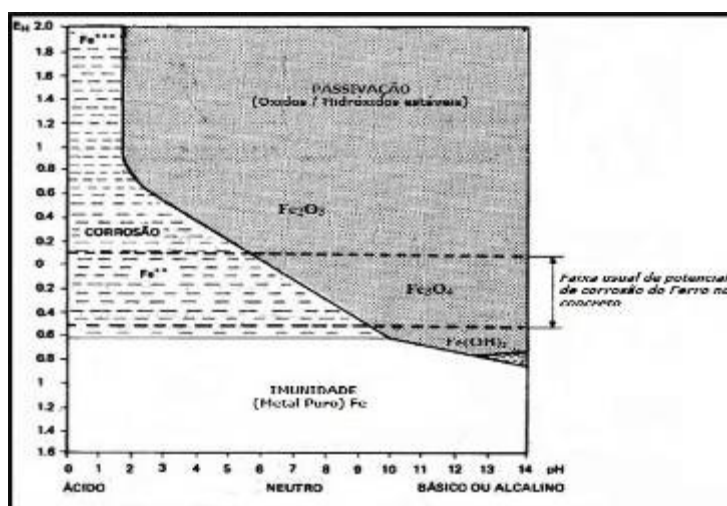


Figura 1 – Diagrama de equilíbrio termodinâmico para o sistema Fe-H₂O a 25°C (POURBAIX 1961)

O diagrama está dividido em três zonas: corrosão, passivação e imunidade. Na zona de imunidade, o metal não se corrói, permanecendo estável para qualquer valor de pH. A zona definida como passivação é onde o metal é recoberto por uma camada de óxidos e hidróxidos, que representa as condições em que são formados os estados passivantes, que atuam como uma barreira, impedindo a oxidação posterior. Na zona de corrosão, onde o pH e potencial eletroquímico estabelecem condições termodinâmicas para que os óxidos da capa passiva não sejam mais estáveis dando lugar a corrosão.

2.1.1. Passivação

A presença de hidróxidos de Cálcio (Ca(OH)_2), hidróxido de Sódio (NaOH) e hidróxido de Potássio (KOH) dissolvidos no concreto seja na face aquosa ou precipitados durante a hidratação do cimento, é o que confere ao cimento um alto teor alcalino, pH 12,5 a 13,5, o que contribui para a formação de uma camada protetora superficial no aço, denominada de camada passivadora.

Camada passivante, conforme NEVILLE (1997) se forma logo após o início da hidratação do cimento e, cuja composição vai do Fe_2O_4 ao Fe_2O_3 . Quando se trata de concreto armado pode-se dizer que essa camada é o primeiro obstáculo para ocorrência de corrosão. Na Figura 2 verifica-se exemplo gráfico de armadura passivada.

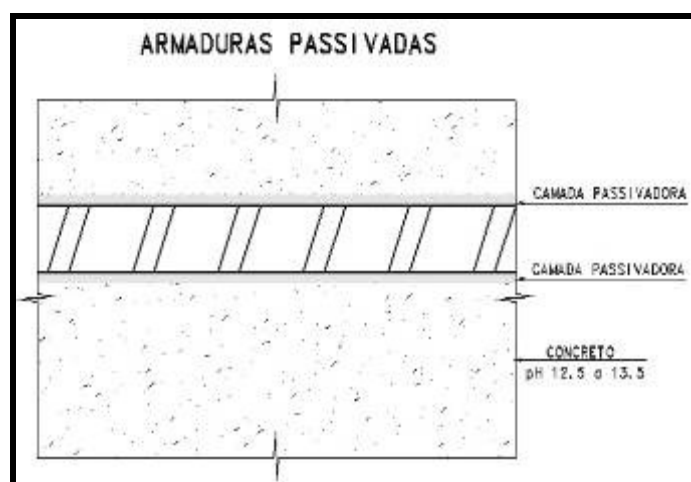


Figura 2 – Armadura passivada

2.1.2. Despassivação

É a perda, total ou parcial, da camada protetora (película passivadora) superficial da armadura interna no concreto.

A despassivação pode ocorrer por dois tipos de agentes agressivos, carbonatação e pela presença de cloretos, que podem iniciar o processo de corrosão da armadura.

A carbonatação ocorre pela ação do gás carbônico da atmosfera que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto, reduzindo seu pH para ordem de 9. A despassivação deletéria só ocorre de maneira significativa em ambientes de umidade relativa abaixo de 98% e acima de 60%, ou em ambientes sujeitos aos ciclos de molhagem e secagem, possibilitando a instalação da corrosão (HELENE, 1997).

A carbonatação do concreto ocorre em função da reação química entre os ácidos do meio ambiente e o líquido intersticial existente nos poros do material. Este líquido encontra-se saturado por hidróxidos de cálcio, além de outros compostos como hidróxido de sódio e potássio. O ácido carbônico (H_2CO_3), oriundo da reação entre gás carbônico e água, age como desencadeador da carbonatação do concreto, reagindo principalmente com o hidróxido de cálcio, dada a sua maior disponibilidade no material (CUNHA e HELENE, 2001). A formação dos carbonatos reduz o pH do meio (concreto). Com isso, a película passivadora da armadura se desfaz e, desde que estejam presentes o oxigênio e a umidade, o processo de corrosão poderá se instalar.

Os cloretos podem estar presentes por diversos motivos, como por exemplo, nos materiais constituintes do concreto, no uso de aditivos aceleradores contendo cloreto ou ainda devido às ações agressivas de atmosferas marinhas e ou industriais e de águas.

Os mecanismos principais de penetração de cloreto do meio externo são a capilaridade, a difusão e a permeabilidade.

Os cloretos apresentam-se em três formas no concreto: sob a forma de íons-livres, adsorvido na superfície dos poros; e quimicamente ligado ao aluminato tricálcico (C3A), formando cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$);.por tanto por maior que seja a capacidade de um concreto de se ligar quimicamente ou adsorver fisicamente íons cloretos, sempre haverá um estado de equilíbrio entre as três formas de ocorrência desses íons, conseqüentemente sempre existirá um certo teor de Cl^- livre na fase líquida do concreto.

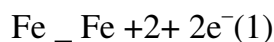
2.2. MECANISMOS DE CORROSÃO

No interior do concreto o processo de corrosão ocorre por mecanismos eletroquímicos, onde há uma reação química que envolve a condução de elétrons (cargas) entre diferentes regiões de um mesmo metal. Na região anódica ocorrem nas reações de perda de elétrons, enquanto na região catódica se processam as reações de consumo de elétrons. Os íons circulação pelo eletrólito, que no concreto é a solução contida nos seus poros

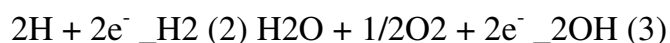
As reações de oxidação do metal ocorrem na região anódica, que consiste na liberação de íons metálicos para o eletrólito estabelecendo um fluxo de elétrons através do metal (eletrodo) para a região catódica.

Na região catódica ocorrem as reações de redução dos íons presentes no eletrólito (GONZÁLEZ et al, 1993). Em outras palavras, os íons de ferro (Fe^{2+}), com carga elétrica positiva no ânodo, passam para a solução, enquanto os elétrons livres (e^-), com carga elétrica negativa, passam pelo aço para o cátodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito e combina-se com a água e o oxigênio para formar os íons de hidroxila (OH^-) (GENTIL, 1996).

Na região anódica (corroída), a reação que ocorre é a dissolução do ferro (oxidação) (ANDRADE, 1992), conforme a equação abaixo:



As reações catódicas ocorrerão quando houver disponibilidade de oxigênio e do pH próximo à superfície do metal (ANDRADE, 1992), como representado pelas equações abaixo:



Um modelo proposto para corrosão é apresentado na Figura 3.

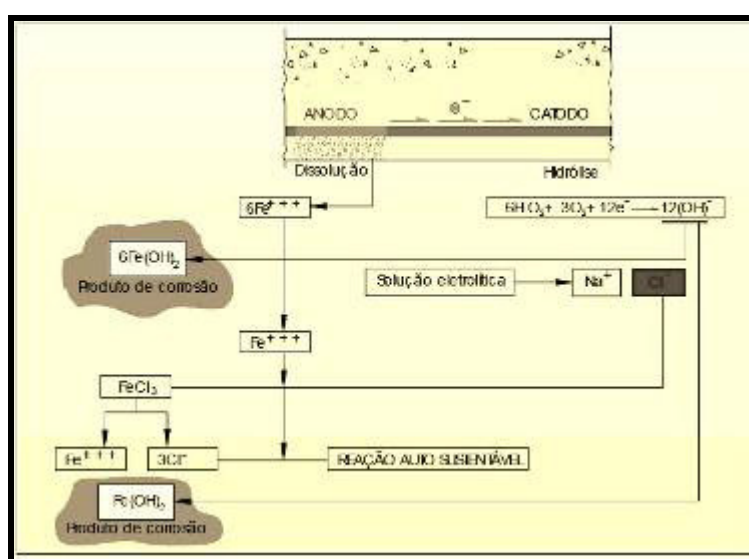


Figura 3 - Mecanismo de Corrosão. (Carmona, 1998)

2.3. VIDA ÚTIL

A primeira conceituação de vida útil para o caso particular da corrosão de armaduras foi proposta por TUUTTI (1982) onde pela primeira vez foram definidos o período de iniciação e o período de propagação da corrosão das armaduras no concreto.

A norma inglesa BS 7543 (1992) dá uma série de conceitos e critérios de projeto para levar em conta a durabilidade e a vida útil das edificações e segundo consta nessa norma sua origem é o capítulo IX do “Code of Practice 3” datado de 1950.

Um documento posterior é o ACI 365 (2000) que também apresenta o estado da arte na previsão de vida útil incluindo aspectos econômicos e análise de custo e ciclo de vida de estruturas de concreto armado.

Também em 2000 é publicada a primeira versão da norma ISO 15.686 sobre o planejamento de vida útil e que contempla os mesmos tópicos do ACI 365.

Vida útil é comumente definida como o período de tempo no qual a estrutura ou o componente estrutural pode cumprir sua função sem custos importantes de manutenção, ou seja, deverá estar sob manutenção preventiva mas, não deverá sofrer manutenção corretiva durante esse período, em outras palavras não poderá ser objeto de intervenções não previstas (CEB, 1990; BS, 1992; ACI, 2000).

De acordo com o modelo de vida útil de TUUTTI (1982 apud. CARMONA, 2005) e ampliado por HELENE (1993), a deterioração por corrosão de armaduras das estruturas de concreto pode ser modelada como um processo que comporta dois estágios (Figura).

O primeiro estágio, ao qual está associado o período de tempo t_0 , denominado período de iniciação ou despassivação, corresponde ao período de tempo que os agentes agressivos do ambiente levam para alcançar a armadura. O segundo estágio é denominado período de propagação e está associado ao período de tempo t (t_1 , t_2 , ou t_f) que corresponde ao tempo até a ocorrência de uma deterioração significativa, tanto do ponto de vista estético quanto de segurança, podendo ser o tempo correspondente ao aparecimento de manchas de produtos de corrosão, ao aparecimento de fissuras, à ocorrência de destacamentos do concreto de cobrimento ou até à ruptura parcial ou total da estrutura. A definição de t (t_1 , t_2 , ou t_f) depende muito da definição do nível de deterioração aceitável e portanto é bastante subjetiva.

Assim, a vida útil é igual a $t_0 + t$, sendo t definido arbitrariamente, em função da importância da obra e seu estado em (a) construções novas, (b) construções existentes e em bom estado de conservação ou (c) construções existentes e deterioradas, sendo possível distinguir pelo menos os tipos seguintes:

- Vida útil de projeto
- Vida útil de serviço ou de utilização
- Vida útil total
- Vida útil residual

O desempenho de uma estrutura em função do tempo, com base na literatura é apresentado na Figura 4.

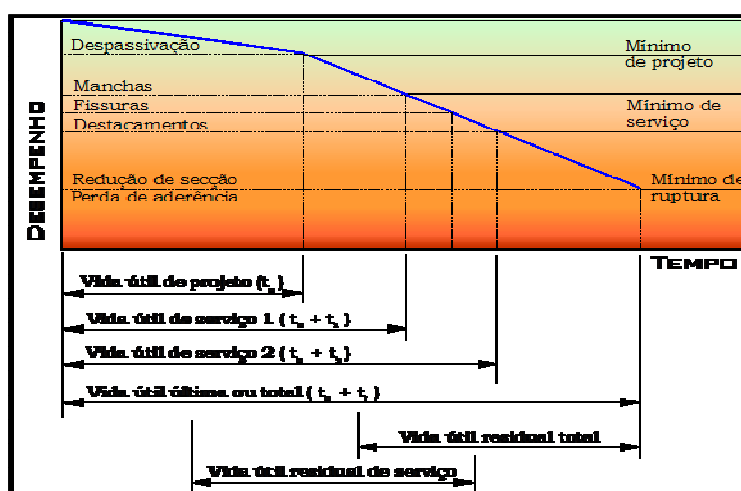


Figura 4 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto com relação à corrosão das armaduras de TUUTI (1982), ampliado por HELENE (1993) extraído de CARMONA (1998).

2.4. PROTEÇÃO CATÓDICA

Gentil (1996) mostra que, pela natureza eletroquímica da corrosão verifica-se que há um fluxo de corrente através do eletrólito e do metal, assim os cátions saem do ânodo ao mesmo tempo em que os elétrons se dirigem do ânodo para o cátodo seguindo um circuito metálico. A taxa de corrosão depende da intensidade da corrente que flui no sistema, dependendo essa intensidade da força eletromotriz total da pilha formada e das várias resistências ôhmicas e não-ôhmicas do circuito.

“Proteger catodicamente uma estrutura significa eliminar, por processo artificial, as áreas anódicas da superfície do metal fazendo com que toda a estrutura adquira comportamento catódico. Como consequência, o fluxo de corrente elétrica ânodo/cátodo deixa de existir e a corrosão é totalmente eliminada” (GENTIL, 1996).

Quando se aplica a proteção catódica, são três os mecanismos que podem ocasionar a redução da corrente:

- O potencial do metal atinge um valor tal que, em todas as áreas do metal só ocorre um processo catódico.
- O eletrólito próximo à superfície metálica se torna mais básico devido à redução dos íons hidrogênio, H^+ , ou redução do oxigênio.
- A elevação do pH pode causar a precipitação de substâncias insolúveis, $CaCO_3$ e $Mg(OH)_2$ que podem depositar-se sobre o metal produzindo camada protetora.

Baseados no mesmo princípio de funcionamento o de injeção de corrente elétrica na estrutura através de eletrólito, dois métodos são utilizados para a obtenção da proteção catódica: proteção catódica galvânica e proteção catódica por corrente impressa.

2.4.1. Proteção catódica galvânica

O fluxo de corrente elétrica fornecida origina-se da diferença de potencial existente entre o metal a proteger e outro escolhido como anodo e que tem potencial mais negativo na tabela de potenciais (GENTIL, 1996).

Os materiais mais utilizados como ânodos galvânicos são ligas de magnésio, zinco ou alumínio.

Em função da característica da estrutura a proteger e do tipo do eletrólito em contato com o material metálico, é utilizado um tipo de anodo. A Tabela 1 (GENTIL, 1996) apresenta aplicações típicas dos ânodos galvânicos.

Tabela 1 - Aplicações típicas dos ânodos galvânicos.

Ânodos	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 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.

Os ânodos galvânicos são utilizados, normalmente, para eletrólitos de muito baixa resistividade elétrica (até 3.000 Ω .cm), devido às pequenas diferenças de potenciais necessitando de circuitos de baixas resistências elétricas para a liberação da corrente de proteção catódica.

2.4.2. Proteção catódica por corrente impressa

O fluxo de corrente fornecido neste processo origina-se da força eletromotriz de uma fonte geradora de corrente elétrica contínua, alimentados com corrente alternada.

São utilizados ânodos especiais, inertes, para a dispersão da corrente elétrica no eletrólito, com características e aplicações que dependem do eletrólito onde são utilizados, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Aplicações típicas dos anodos inertes.

Grafite (14,5% Si)	Água do mar não-profunda e água doce
Ferro-silício (14,5% Si, 4,5% Cr)	Solos ou água com teor de cloreto inferior a 60 ppm
Chumbo-antimônio-prata (93% Pb, 6% Sb, 1% Ag)	Água do mar, suspensos, sem tocar o fundo do mar
Ferro-silício-cromo (14,5% Si, 4,5% Cr)	Solos, água do mar, fundo do mar ou água doce
Chumbo-antimônio-prata (93% Pb, 6% Sb, 1% Ag)	Água do mar, suspensos, sem tocar o fundo do mar
Titânio, nióbio ou tântalo platinizado (Ti-Pt, Nb-Pt ou Ta-Pt)	Solos, água doce, água do mar e concreto (na proteção das armaduras de aço)
Titânio revestido com óxido de metais nobres, como cério	Solos, água doce, água do mar e outros eletrólitos
Magnetita Solos, água doce e água do mar	Ferrita Solos, água doce e água do mar
Ânodo polimérico anodefex	Solos (tubulações nuas ou com revestimento deficiente)

Segundo Gentil (1996), a grande vantagem do método por corrente impressa é que a fonte geradora pode ter a potência e a tensão de saída de que se necessita, isso em função da resistividade elétrica do eletrólito 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.

Cascudo (1997) descreve o funcionamento de um sistema de proteção catódica por corrente impressa para estrutura de concreto:

- Coloca-se um sistema de ânodos junto à superfície de concreto, cobrindo com uma camada de concreto ou material condutor;
- O sistema de anodos é interligado ao terminal positivo de um retificador de corrente e as armaduras conectadas ao seu terminal negativo;
- Liga-se o retificador e logo é estabelecida uma diferença de potencial entre o sistema de anodos e as armaduras, que passam a funcionar como cátodos e ficam protegidas;
- A corrente impressa pelo sistema de anodos passa pelo concreto de cobrimento, chega às armaduras e retorna pelo pólo negativo do retificador, fechando o circuito.

No concreto os ânodos mais utilizados são de titânio platinizado, titânio expandido recoberto com óxidos metálicos mistos ou fios de cobre revestidos com um polímero condutor inerte.

“É consenso entre os pesquisadores que a proteção catódica é o único meio capaz de solucionar o problema da corrosão de armaduras em um meio altamente contaminado por cloretos; isto porque, como foi dito, o potencial do aço no concreto atinge o domínio de imunidade da corrosão e, mesmo com a presença de cloretos, a armadura estará protegida” (CASCUDO, 1997, p. 104).

Neste capítulo a bibliografia foi revista e apresentados estudos prévios introduzindo cada um dos ensaios realizados. A base teórica aqui levantada teve o intuito de explicar a metodologia de execução e a valia de cada um dos ensaios de campo do estudo de caso.

Definições importantes estão contidas de modo a subsidiar um maior entendimento do trabalho realizado no estudo de caso.

3. ESTUDO DE CASO

Avaliação da durabilidade de ânodos de sacrifício (proteção catódica) nas estacas, 226, 303, 310, 317, 324, 339, 346, 353, 354, com Reparos Tipo 1 e Reparo Tipo 2, com o intuito de proteger a estrutura contra corrosão pelos agentes agressivos do ambiente.

3.1. DADOS DA OBRA E ENSAIOS PRELIMINARES

A estrutura foi construída na década de 50, isolada do continente, ligada apenas por duas pontes de acesso em concreto, possui 567 m de comprimento, com plataformas de trabalho individuais, com 124 metros de comprimento e 14 metros de largura cada.

O restante da estrutura tem 4 metros de largura com 3 dolphins de amarração, além de outros 4 dolphins de amarração e atracação, dois destes na parte central do cais.

Inicialmente os Píeres foram construídos para recebimento de Petróleo, conseqüentemente para atração de navios petroleiros, função de consórcio entre a ESSO e a PETROBRÁS, iniciativa essa que foi desativada com a construção do Porto de São Sebastião

Atualmente a estrutura se encontra em um avançado estado de deterioração de 1458 estacas de seção retangular as quais sustentam uma estrutura de lajes maciças posicionadas acima do nível de variação de maré.

Os diversos danos observados no cais foram agrupados por tipos de maneira a sistematizar a abordagem do problema.

3.1.1. Classificação dos Danos estudados.

As estacas classificadas como “tipo 1” têm como característica geral a lavagem dos finos da pasta de cimento, na região de variação de maré, este dano pode ser superficial apresentado uma superfície rugosa com ou sem exposição do agregado até a perda de seção do concreto e ou da armadura. São exemplos de estacas “tipo 1” as Fotos 1 e 2.



Foto 1 – Estaca tipo 1, antes do reparo



Foto 2 – Estaca tipo 1, antes do reparo.

As estacas classificadas como “tipo 2” são estacas que apresentam danos na região de variação de maré, assim como as de tipo 1, o que diferencia a tipo 2 da do tipo 1 e a existência de ruptura junto à laje. A Foto 3 é um exemplo de estaca “tipo 2”.



Foto 3 – Estaca tipo 2, estaca antes do reparo

3.2. ENSAIOS PARA DIAGNOSTICO

O trabalho realizado em 2005 teve como finalidade específica apresentar e recomendar uma metodologia para restituição das características resistentes e de durabilidade da estrutura existente, sem incrementar a sua capacidade de carga.

Para se atingir esse objetivo houve a necessidade da realização de ensaios destrutivos e não destrutivos, os quais os resultados serão demonstrados a seguir, para com isso conseguir caracterizar a estrutura e o ambiente a sua volta.

3.2.1. RESISTÊNCIA DO CONCRETO

As resistências encontradas, da ordem de 45 MPa, indicam um concreto de características especiais em relação à tecnologia comum da época.

Levando em consideração a idade da estrutura e aspecto estatístico se pode concluir que o concreto empregado deve apresentar compacidade incompatível com o ambiente a que está exposta, o que será verificado com os ensaios de absorção de água a seguir

3.2.2. ÍNDICE DE VAZIOS APÓS SATURAÇÃO E FERVURA.

Obteve se uma media de 9,6 % do índice de vazios após saturação e fervura, o que de acordo com o Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de corrosión en Estructuras de Hormigón Armado CYTED/DURAR caracteriza a qualidade do concreto como moderada

3.2.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Este ensaio possibilita determinar o cobrimento de armaduras necessário para que um concreto atenda aos critérios de durabilidade

Foi obtida uma média de $5,3 \text{ mm/h}^{1/2}$, o que indica que para oferecer proteção adequada à armadura seriam necessários cobrimentos de concreto da ordem de 6 cm.

3.2.4. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ULTRASOM

Com este ensaio é possível medir a velocidade de propagação de ondas ultra-sonicas no concreto, a velocidade de propagação esta diretamente relacionada com a compacidade do material, portanto quanto mais compacto for o material maior será a velocidade de propagação

Obteve-se uma media de 4.375m/s o que classificam o concreto como de boa qualidade para as estacas

3.2.5. TEOR DE CLORETOS

A presença de íons cloreto no concreto aumenta em muito a velocidade da corrosão, e sua detecção é fundamental para um correto diagnóstico e definição da terapia a empregar. Para tal diagnóstico foram tiradas amostras do concreto em diferentes profundidades, de 0,0 a 0,2 cm, de 0,2 a 0,4 cm e de 0,4 a 0,6 cm.

Obteve-se as seguintes médias:

Para profundidade de 0,0 a 2,0 cm - 1,47 %

Para profundidade de 2,0 a 4,0 cm - 1,21 %

Para profundidade de 4,0 a 6,0 cm - 1,05 %

Com esses resultados podemos dizer que os teores de cloretos encontrados indicam elevada contaminação do concreto, com teores superiores aos limites de despassivação inclusive na profundidade da armadura.

Dada a diminuição da concentração com o aumento da profundidade fica claro que a contaminação ocorreu por influência do ambiente

3.2.6. TEOR DE SULFATOS

A presença de sulfatos provoca a formação de alguns produtos de caráter ácido, contribuindo para redução do pH do concreto e despassivação da armadura

Para profundidade de 0,0 a 2,0 cm - 1,90 %

Para profundidade de 2,0 a 4,0 cm - 1,26 %

Para profundidade de 0,4 a 0,6 cm - 1,34 %

Como referência o decreto n. 407/71 da República Portuguesa que fixa o limite de 3,5% em relação à massa de cimento para concreto simples armado e protendido podemos dizer que os valores encontrados estão abaixo do valor considerado como limite.

3.2.7. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Através desse ensaio é possível medir a profundidade de carbonatação no concreto, Em função dessa profundidade de carbonatação média e da idade da estrutura pode-se calcular o coeficiente de carbonatação concreto (k).

A profundidade de carbonatação era muito baixa, impossibilitando a medição, o que indica que a carbonatação do concreto não é um mecanismo de degradação preponderante para o caso.

3.2.8. POTENCIAL ELÉTRICO DE CORROSÃO

Através desse ensaio consegue se obter a diferença de potencial elétrico entre as armaduras da peça e o eletrodo de referência, com isso é possível analisar a probabilidade de existência de corrosão na estrutura.

As médias dos resultados obtidos estão na faixa entre 350mV a 600mV, o que demonstra uma elevada incidência de valores de potencial com probabilidade de corrosão maior que 90%.

3.2.9. UMIDADE RELATIVA DO AR, TEMPERATURA AMBIENTE E DA ÁGUA

Para se ter uma idéia do risco de corrosão no local se faz a necessidade desse ensaio, pois quanto maior o grau de saturação maior é a dificuldade do oxigênio em penetrar para o interior do concreto e a velocidade de corrosão é reduzida mesmo que esteja despassivada a armadura

Resultados obtidos:

Umidade do ar 70%, a temperatura ambiente é de 28,1 °C, e a temperatura da água é de 28,1 °C

De acordo com o CEB os valores médios medidos no local indica que o risco de corrosão de armaduras varia de leve a alto.

3.2.10. AGRESSIVIDADE DA ÁGUA

O meio aquoso em contato com o concreto pode produzir danos através de uma série de mecanismos ate chegar a corrosão de armaduras pela contaminação do concreto por íons agressivos.

Para se ter uma idéia da agressividade da água foi realizado uma serie de ensaios com base na classificação da agressividade feita pela norma CETESB L1007 - "Agressividade do Meio ao Concreto - Classificação".

Resultados obtidos: na tabela a baixo

Tabela 3 – Agressividade da água

CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA											
LOCALIZAÇÃO	AMOSTRA	pH	Resíduo Insolúvel (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	CO ₂ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	NO ₃ ⁻
TERMAG	A1	7,4	29.100	119,2	12.000	2.100	360	890	1,0	2,1	44
	A2	7,5	29.200	125,0	12.600	2.100	360	870	4,7	4,1	44
	A3	7,4	29.100	119,8	13.100	2.100	360	900	2,9	1,0	44
Médias	TERMAG	7,4	29.133	121,3	12.567	2.100	360	887	2,9	2,4	44

Agressividade nula com relação à carbonatação, troca iônica e lixiviação em função do pH e concentração de NH_3 .

Agressividade alta com relação ao fenômeno de lixiviação em função da baixa quantidade de sólidos dissolvidos.

A água é classificada como de agressividade muito forte ao concreto quanto à troca iônica e lixiviação pela elevada quantidade de magnésio existente.

Quanto à corrosão de armaduras a água é considerada de agressividade muito forte devido à elevada quantidade de cloretos.

3.3. TERAPIA PROPOSTA

As estacas danificadas por ações mecânicas deverão ser reparadas por meio de encamisamento, uma vez que sua capacidade resistente foi muito reduzida.

As estacas com elevada perda de seção de concreto e armaduras situadas periferias e próximas às juntas torna necessária uma reconstituição da seção. A solução adotada foi a mesmas das estacas danificadas por ações mecânicas, o encamisamento com adição de armadura.

Esse encamisamento além de devolver a estaca a sua capacidade portante tem a função de proteger as barras de aço do interior das estacas quanto à corrosão de armaduras, dificultando o acesso de oxigênio, visto que existe uma elevada potencialidade de corrosão nesses elementos.

Foi indicada uma proteção generalizada da estrutura por meio de revestimento e pintura, caso se queira diminuir a necessidade de conservação, conferindo uma proteção adicional a estrutura.

Foi dada prioridade na execução das metodologias de reparo e proteção propostas em função da necessidade do TGG (Terminal de Graneis do Guarujá) de realizar um planejamento financeiro de investimentos, dando maior importância aos danos que influem de forma mais significativa na segurança e durabilidade.

Tendo em vista a restituição das características resistentes e de durabilidade da estrutura existente, sem incrementar a sua capacidade de carga se utilizou da seguinte metodologia:

- Tipo 1: Encamisamento parcial de estacas com elevada perda de seção do concreto e armaduras, de acordo com a Figura 5.

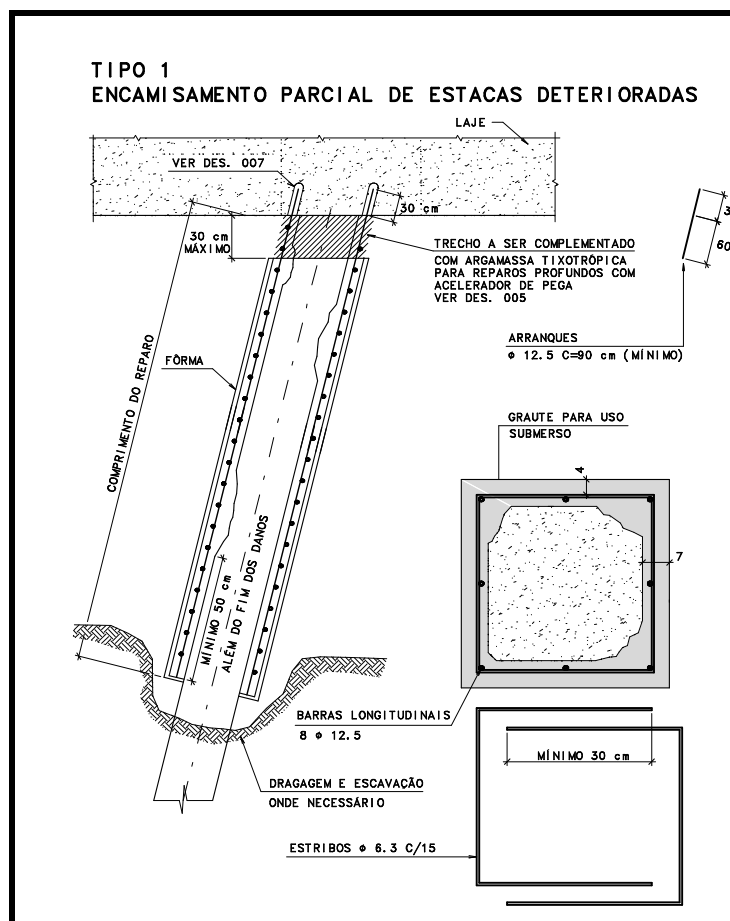


Figura 5 – Reparo tipo 1

- Tipo 2: Encamisamento parcial de estacas com ruptura junto à laje, conforme Figura 6.

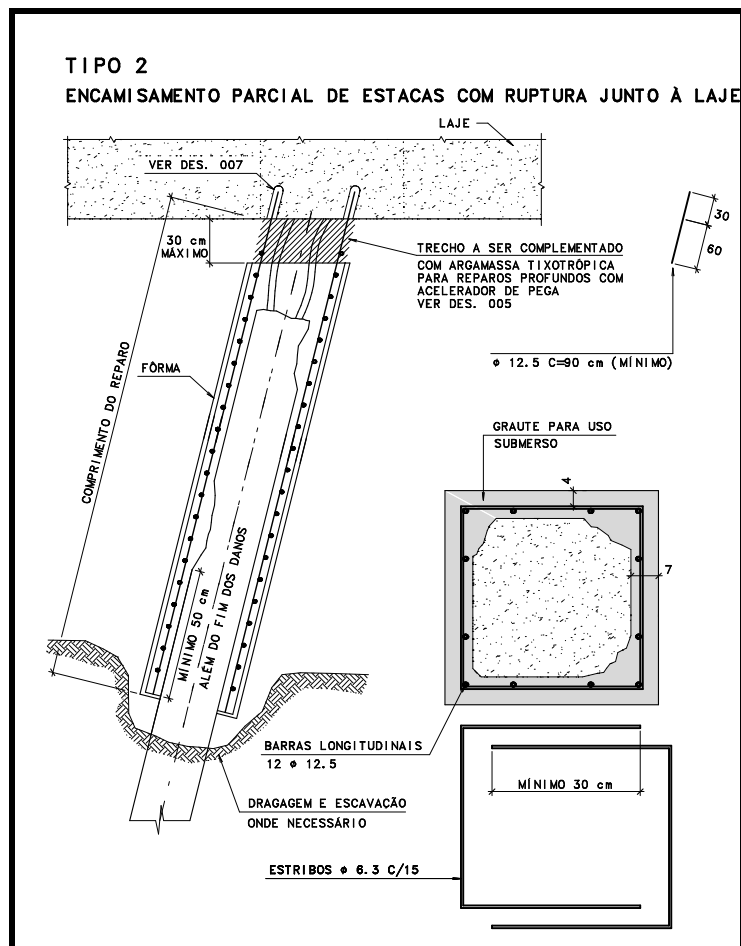


Figura 6 – Reparo tipo 2

- Tipo 3: Encamisamento parcial de estacas com ruptura abaixo do nível d'água, conforme Figura 7.

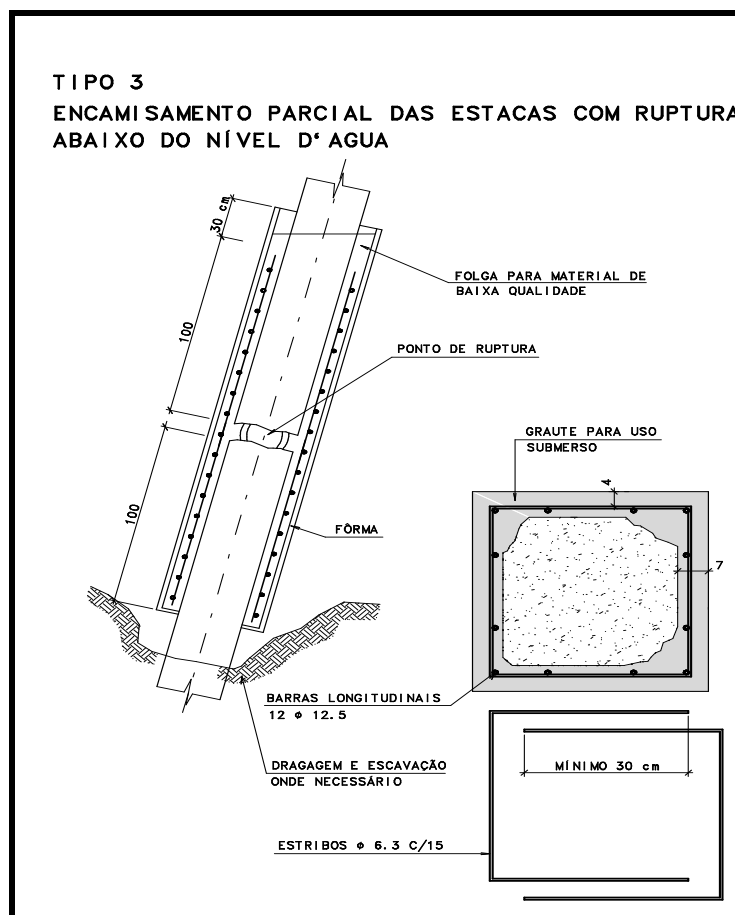


Figura 7 – Reparo tipo 3

- Tipo 4: Encamisamento parcial de estacas com corrosão de armaduras abaixo do nível d'água, de acordo com a Figura 8.

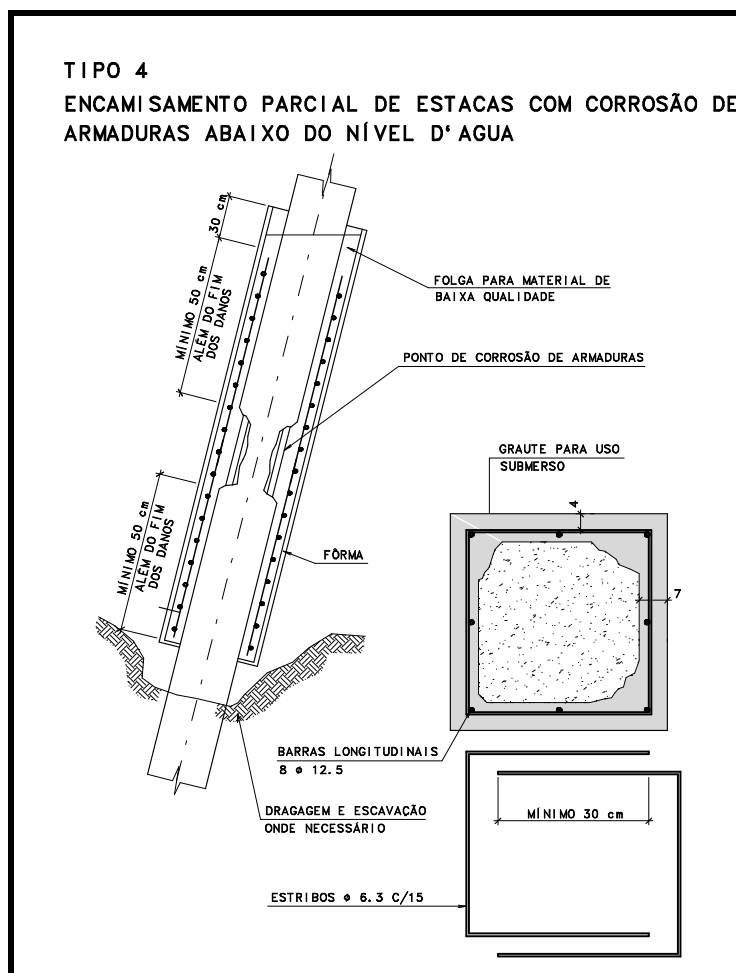


Figura 8 – Reparo tipo 4

- Tipo 5: Execução de reparos localizados em áreas de variação de maré de estacas e face inferior das lajes, incluindo complementação de armaduras, conforme Figura 9.

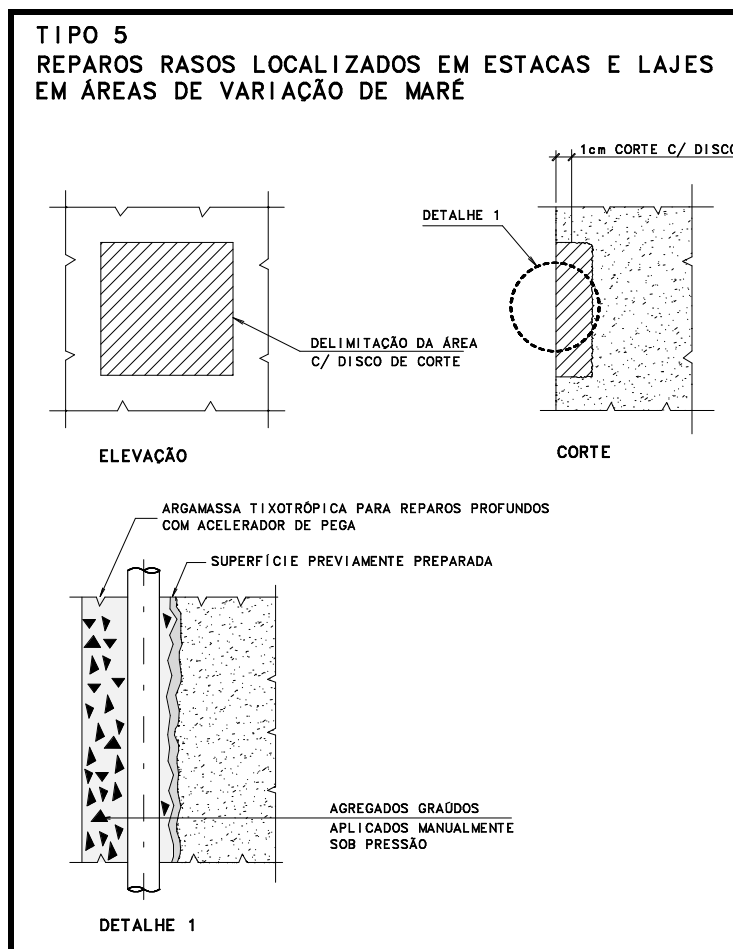


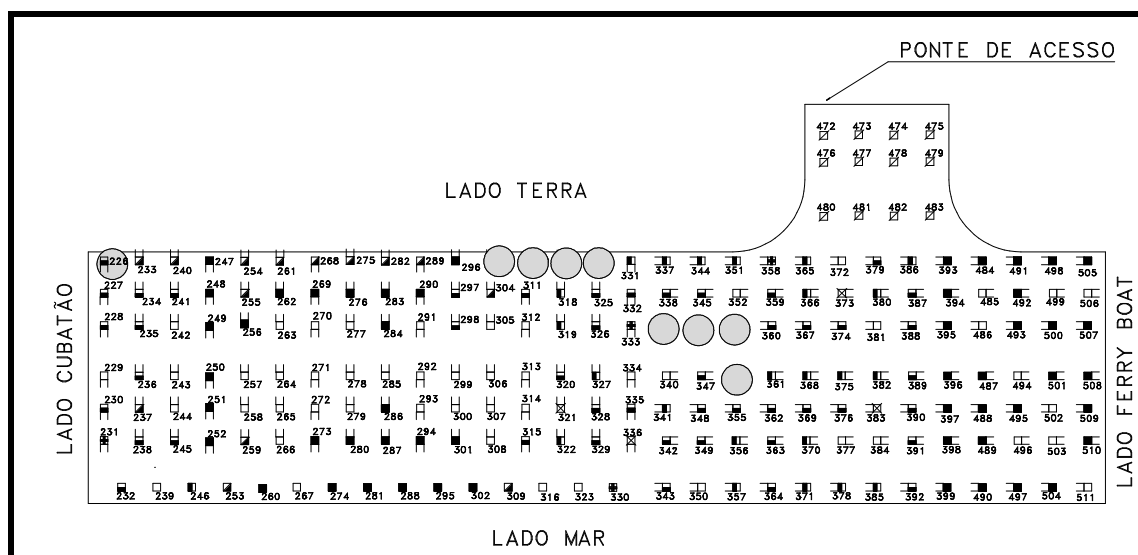
Figura 9 – Reparo tipo 5

A terapia apresentada nos itens acima foi importante para embasar a execução dos reparos introduzidos nos itens seguintes. Foi possível também verificar que para cada diferente tipo de dano, foi estabelecida uma terapia diferenciada.

3.4. EXECUÇÃO DOS REPAROS

O presente trabalho visa unicamente aos reparos em estacas classificadas como tipo 1 e tipo 2, pois estes reparos se referem a estacas localizadas na faixa de variação de maré, onde estão sujeitas a constante ataques de agentes agressivos existentes no meio como observado nos ensaios realizados anteriormente e pelo escorrimento do material depositado na parte superior do piso, o qual se dilui na água de chuva e penetra pelas mesmas, provocando danos nas estacas. A exceção são as estacas periféricas nas regiões onde existem os paramentos verticais que impedem a ação direta dos agentes agressivos sobre as estacas.

A Figura 10 mostra em destaque a localização das estacas cujo os ânodos para monitoração foram instalados.



Com o intuito de obter um incremento de vida útil nas estacas reparadas utilizou-se um sistema de proteção catódica. Esse sistema é caracterizado pela utilização distribuída ao longo do reparo de pastilhas de zinco (anodo de sacrifício).

Para o correto funcionamento do sistema o fabricante determina através de um cálculo como se deve proceder a distribuição dos ânodos na estrutura a ser protegida.

As equações originais para o espaçamento das unidades são derivadas da definição da densidade de corrente elétrica por metro quadrado de área de superfície de aço, isto é, a corrosão das armaduras é controlada pela aplicação de uma corrente elétrica externa. O valor da corrente externa requerida depende da superfície de aço a ser protegido.

Para calcular o consumo, o espaçamento e o raio de atuação de ânodos de um elemento estrutural qualquer em concreto armado, é necessário saber simplesmente a área superficial de aço e de concreto que se deseja calcular.

De acordo com o fabricante em questão, após inúmeras análises em laboratórios e em campo, os mesmos chegaram a um consenso de que cada ânodo (pastilha com 60g de zinco) protege uma área superficial de aço de $0,26\text{m}^2$, sendo assim o consumo de pastilhas pode ser calculado conforme a Equação 1 a seguir:

$$C_{xp} = \frac{A_s}{0,26}$$

Equação 1 – Consumo de pastilhas

Onde: C_{XP} - Consumo de unidades de Galvashield XP;

A_s - Área superficial de aço por metro linear do elemento.

Demonstrativo de calculo considerando o estudo em questão:

DADOS:

ESTACA ORIGINAL

Face da estaca = 0,44 m

Armadura Principal = 4 ϕ 32 mm

Estribo não existente

Cobrimento = 3 cm

ESTACA RECUPERADA

Face da estaca = 0,58 m

Armadura Principal = 8 ϕ 12,5 mm

Estribo = ϕ 6,3 a cada 15 cm

Cobrimento = 4 cm

As - Área superficial de aço por metro linear do elemento

$$A_s = (8\pi 1,25 \times 100) + (4\pi 3,2 \times 100) + (7\pi 0,63 \times (48 \times 4)) = 0,980 \text{ m}^2$$

$$C_{xp} = \frac{A_s}{0,26} \Rightarrow C_{xp} = \frac{0,980}{0,26} \Rightarrow C_{xp} = 3,8 \text{ Unidades}$$

Para calcular a variação do poder de cobertura de cada unidade de Galvashield XP em função das diferentes relações superfície de aço/superfície de concreto, considerando todas as outras variáveis constantes foi usada a Equação 2.

Esta cobertura deve ser entendida como a proteção fornecida às armaduras devido à introdução do zinco no processo eletroquímico da corrosão metálica. Isto ocorre porque o zinco apresenta eletronegatividade superior ao aço, oxidando primeiro.

$$R_{xp} = \sqrt{\frac{1}{10 \times A_s / A_c}}$$

Equação 2 – Variação do poder de cobertura em função da superfície

A_c - Área superficial de concreto por metro linear do elemento

$$A_c = (4 \times 0,58) \times 1,0 = 2,32 \text{ m}^2$$

R_{xp} - Raio de cobertura de uma unidade de Galvashield XP

$$R_{xp} = \sqrt{\frac{1}{(10 \times A_s) / A_c}} \Rightarrow R_{xp} = \sqrt{\frac{1}{(10 \times 0,98) / 2,32}} \Rightarrow R_{xp} = 0,49m$$

O espaçamento deve ser calculado considerando uma vez e meia o raio de proteção, devido a importância de se manter uma sobreposição do raio de proteção, pois nas extremidades a influência da pastilha pode perder rendimento devido à distribuição do aço no elemento estrutural, que na verdade é tridimensional. Devido ao contato entre a armadura principal e os estribos, este circuito fechado possibilita a proteção das armaduras de todo elemento, desde que a corrente possa fluir entre as barras de aço mais distantes. Desta forma, para garantir a proteção do elemento todo, deve-se determinar o espaçamento entre as unidades de Galvashield XP conforme a Equação 3.

$$S_{XP} = 1,5 \times R_{XP}$$

Equação 3 – Espaçamento entre as unidades de pastilha

Sxp - Espaçamento entre unidades de Galvashield XP

$$S_{XP} = 1,5 \times R_{XP} \Rightarrow S_{XP} = 1,5 \times 0,49 \Rightarrow S_{XP} = 0,73 \text{ m}$$

O fabricante ainda recomenda, além do uso do equacionamento indicado acima, considerar uma limitação máxima da distância entre as pastilhas, que deve ser de 0,75m para elementos com grande área plana, como lajes, paredes diafragma, pilares-parede, dentre outros, e de 0,60m para elementos como vigas, pilares e pilaretes.

Embora essa metodologia seja alheia ao nosso conhecimento, todos os passos foram feitos conforme indicação do fabricante.

Tomando como base os cálculos indicados pelo fabricante, e respeitando as limitações impostas pelo mesmo a distribuição do reparo ficou da forma como apresentado na Figura 11.

Sxp - Espaçamento entre unidades de Galvashield XP 60 cm

Rxp - Raio de cobertura de uma unidade de Galvashield XP= 49cm

Ver Figura 11e Figura 12:

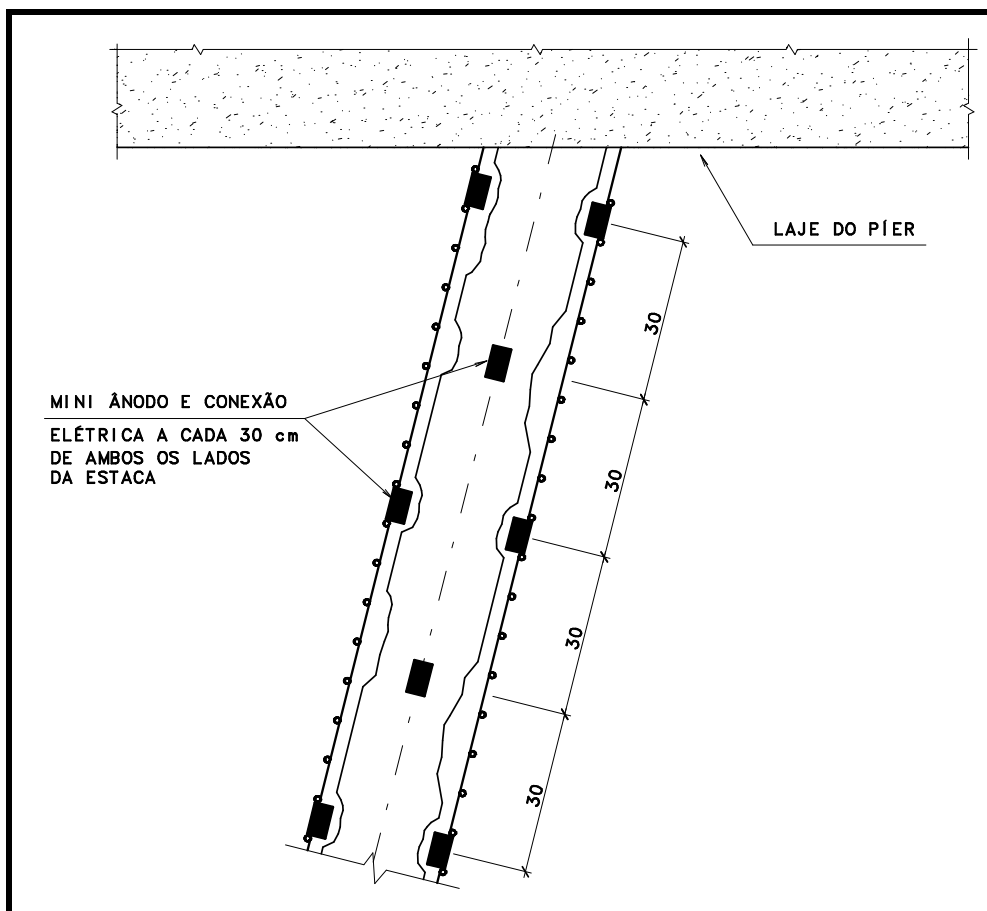


Figura 11 – Vista do corte da distribuição e montagem dos ânodos

A distribuição dos ânodos respeitou o disposto na Figura 12, sendo que raio de influência dos mesmos está apresentado na Figura 13.

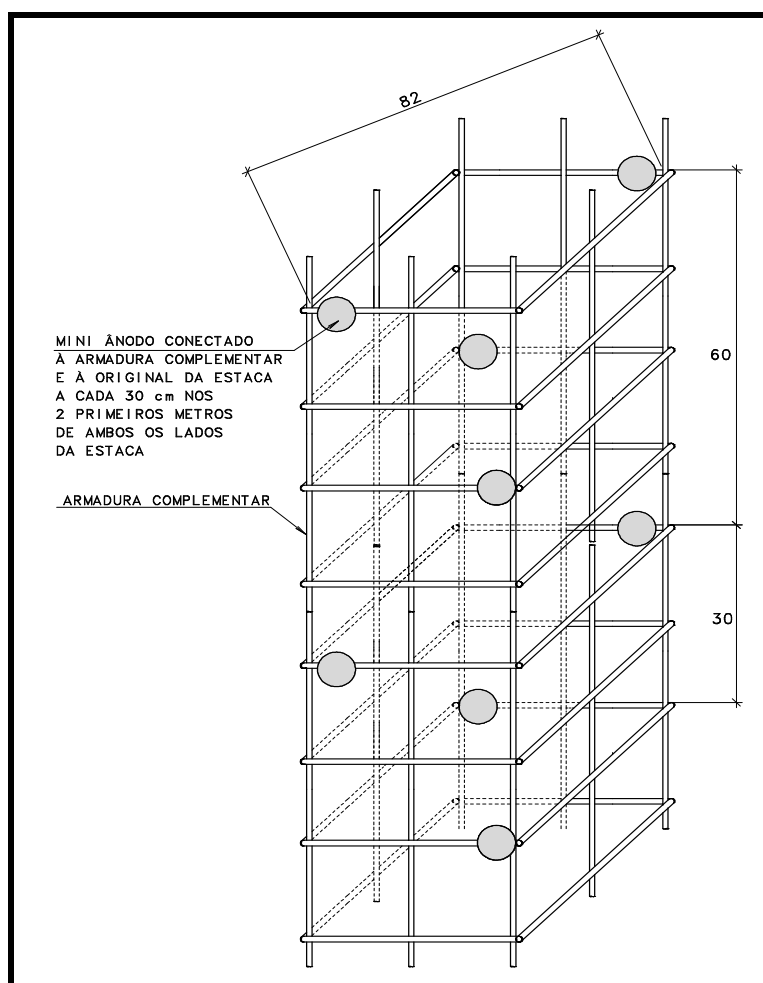


Figura 12 – Vista em perspectiva da distribuição e montagem dos ânodos

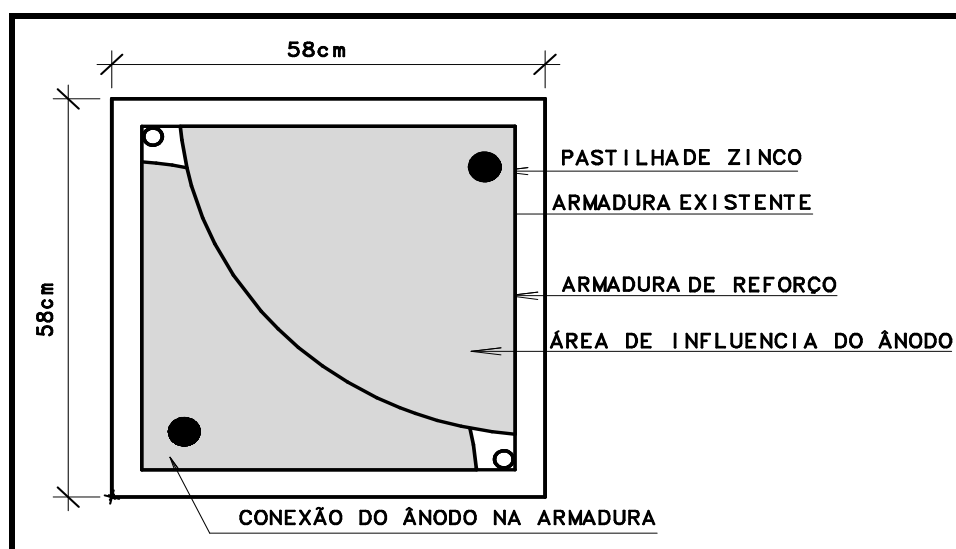


Figura 13 – Vista em planta do raio de influência do ânodo

No próximo item se descreve o procedimento utilizado para recuperação das estacas.

3.4.1. Remoção Mecanizada da Vida Marinha

Toda a vida marinha ou substâncias aderidas à estaca tiveram de ser retiradas, conforme Foto 4 em que a estaca é raspada com espátulas específicas. Na sequência, Foto 5, é apresentada uma estaca cuja limpeza foi concluída.



Foto 4 – Limpeza das estacas



Foto 5 – Estaca cuja limpeza foi concluída

3.4.2. Escarificação das Estacas

No entorno da estaca, foram detectadas placas de concreto soltas. Estacas placas foram todas removidas até atingir o substrato são. Na Foto 6, é apresentado um exemplo de estaca sendo escarificada.

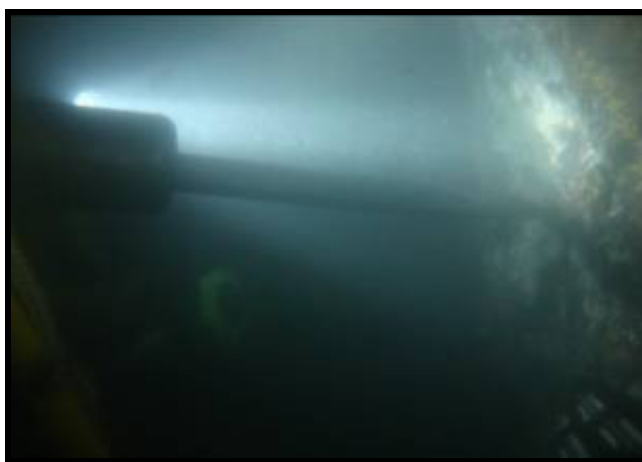


Foto 6 – Estaca em fase de escarificação

3.4.3. Abertura de espaços ao redor da armação

A armação das estacas estaca em parte fixa ao concreto e em parte solta. Ao redor das barras foram abertos os espaços de modo que a mesma fosse deixava livre de qualquer impedimento físico. Na Foto 7, é apresentada uma estaca com acesso ainda não liberado. Nas Foto 7 eFoto 8, a estaca já está liberada, com detalhe para a última, em que a mão do trabalhador pode passar por trás da armação. O intuito desta tarefa é garantir que o reparo por vir alcançará plenamente a armadura.



Foto 7 – Armação impedida



Foto 8 – Armação livre de impedimentos de acesso



Foto 9 – Espaço aberto ao redor da armação

3.4.4. Limpeza com Hidrojato

Visando garantir uma limpeza completa da armação, todas as barras expostas foram limpas com máquina hidrojateadora de alta pressão, possibilitando que todo resíduo de corrosão fosse retirado na íntegra, permanecendo a armação com sua coloração típica, conforme Foto 10.



Foto 10 – Armação limpa após hidrojateamento



Foto 11 – Coloração típica da armadura

3.4.5. Fixação dos Arranques da Armadura Complementar

Para uma correta fixação dos arranques da armadura complementar, a laje foi perfurada, conforme apresentado nas Foto 12 e Foto 13.



Foto 12 – Perfuração da laje e fixação de arranques



Foto 13 – Perfuração da laje e fixação de arranques

3.4.6. Ancoragem Química dos Arranques

Visando uma fixação dos arranques com maior resistência possível, foi optado pela ancoragem química dos mesmos, conforme Foto 14 e Foto 15.



Foto 14 – Ancoragem química dos arranques



Foto 15 – Ancoragem química dos arranques, outro exemplo.

3.4.7. Montagem de Base de Forma das Estacas

Para a correta fixação das formas do encamisamento das estacas, foi necessário a construção de bases próprias para tal, conforme as Foto 16, Foto 17 e Foto 18.



Foto 16 – Base de forma, vista superior



Foto 17 – Base de forma, vista lateral



Foto 18 – Base de forma instalada na estaca

3.4.8. Montagem da Armadura Complementar e Instalação de Ânodos de Sacrifício

Foram utilizados espaçadores para garantir o correto espaçamento da armação e cobrimento mínimo de 4,0cm, bem como a instalação dos ânodos de sacrifício. Vide Foto 19 com a confecção da armação, Foto 20 com a inserção dos espaçadores e ânodos de sacrifício e Foto 21 com a armação posicionada ao redor da estaca e sobre a base da forma.



Foto 19 – Confecção da armação



Foto 20 – Colocação dos espaçadores e ânodos



Foto 21 – Armação posicionada na estaca

3.4.9. Montagem e Instalação de Formas

Na montagem de formas especiais, foram deixado uma folga de no Maximo 30 cm entre a forma e a laje para complemento com argamassa estrutural tixotrópica.

Nas Foto 23 e Foto 24 vê-se o momento de instalação da forma na estaca.



Foto 22 – Fabricação das formas nos berços



Foto 23 – Forma pronta para instalação`



Foto 24 – Instalação da forma



Foto 25 – Ajustes da forma na estaca

3.4.10. Instalação do Dispositivo de Acompanhamento dos Ânodos

Nas Foto 26, Foto 27, Foto 28, Foto 29, Foto 30, e na Figura 14 é apresentado o processo de instalação dos dispositivos de acompanhamento do desempenho dos ânodos.



Foto 26 – Dispositivos de acompanhamento

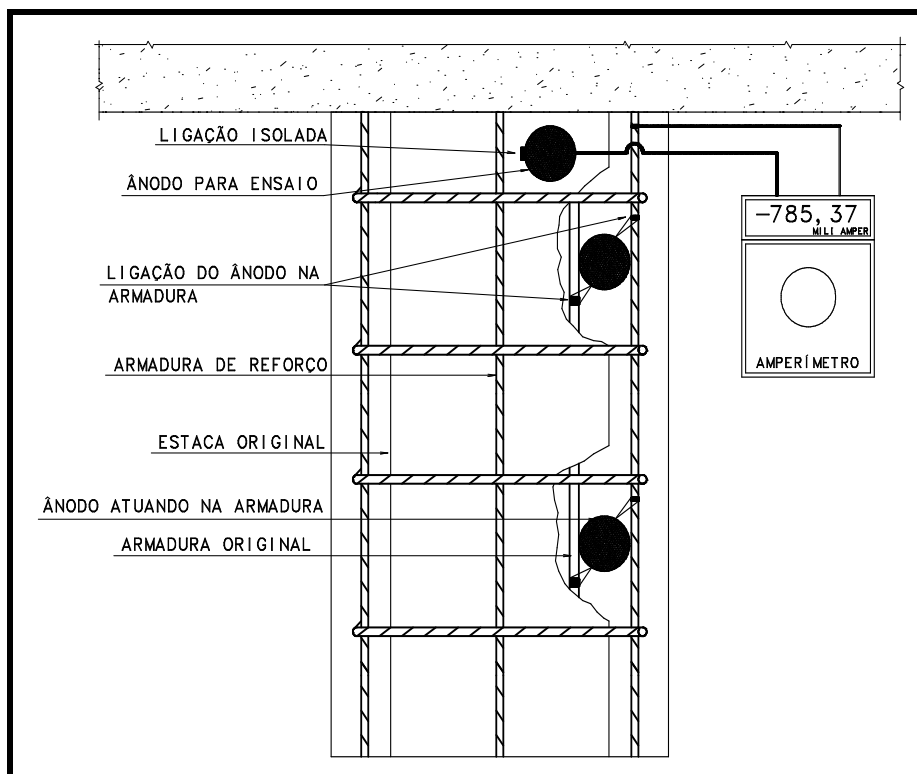


Figura 14 – Esquema para leitura



Foto 27 – Fixação com ancoragem química



Foto 28 – Fixação com ancoragem química



Foto 29 – Detalhe do ânodo instalado e do espaçador



Foto 30 – Instalação do dispositivo

3.4.11. Preenchimento das Formas com Graute Submerso

Para o preenchimento das formas, foi escolhido um material com agregados finos de modo a envolver por completo a armação e também facilitar o bombeamento. Nas Foto 31, Foto 32 e Foto 33 é apresentado o controle tecnológico do graute. Na Foto 34, a estaca é apresentada depois da desforma.



Foto 31 – Verificação da temperatura da água



Foto 32 – Verificação da temperatura do graute



Foto 33 – Moldagem de corpos de prova



Foto 34 – Estaca desformada

3.4.12. Complemento Final com Argamassa Estrutural

Na complementação do trecho final (30 cm laje e reparo) foi utilizado argamassa tixotrópica para reparos profundos com acelerador de pega e inserção de agregado graúdo (brita 1).



Foto 35 – Complemento final com argamassa tixotrópica

3.4.13. Monitoração do Desempenho

Para análise dos dados inicialmente foram escolhidas 9 estacas (ver Tabela 4), porem devido a complexidade da execução dos reparos e a instalação dos dispositivos para medição, e prazo para conclusão do estudo, só foi possível obter mais de uma leitura nas estacas 226, 303, 310, 317, 324, as quais serviam de base para esse estudo.

Tabela 4 - Estacas a serem analisadas

ESTACA	DATAS	
	Recuperação	Instalação dos Ânodos
E-226	24/09/10	24/09/10
E-303	14/08/08	18/08/10
E-310	21/05/10	18/08/10
E-317	01/11/08	18/08/10
E-324	21/05/10	18/08/10
E-339	10/11/10	10/11/10
E-346	10/11/10	10/11/10
E-353	10/11/10	10/11/10
E-354	25/11/10	24/11/10

Durante as leituras realizadas nas estacas, no mesmo dia, a variação de umidade e temperatura entre as estacas foram irrisórias por isso para efeito de caracterização consideramos a umidade relativa do ar 65% e a temperatura ambiente 31⁰C.

A corrente galvânica foi verificada com posicionamento do aparelho na estrutura, como demonstrado na Foto 36.



Foto 36 - Leitura da corrente galvânica

Os resultados obtidos dos ensaios para determinação da corrente galvânica estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados obtidos

ESTACA	Medidas em micro Ampères (μA)		
	28/out/10	08/nov/10	29/nov/10
226	722	1.245	1.114
303	424	1.010	530
310	584	1.340	360
317	1.146	1.440	1.240
324	876	1.326	830

3.4.14. Cálculo da vida útil do ânodo

Com base na equação de Faraday¹ para perda da massa, consegue se estimar o tempo necessário para uma determinada corrente consumir uma determinada massa, no caso massa de zinco utilizada como anodo de sacrifício.

Dados para calculo:

1 A (um Ampère) = 1 C/s (um Coulomb por segundo)

Peso da pastilha de zinco utilizada = 60 g

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 28/10/10 (722 µA) na estaca 226.

$$(1) \quad m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica } (g/mol)}{n \times \text{cons. Faraday } (C/mol) \times (e \times u)}$$

Equação 4 – Equação de Faraday

$$m = \frac{0,000722(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 3,40E-7.g/s$$

$$(2) \quad T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada } (g)}{\text{Massa consumida } (g/s)} = \frac{60(g)}{3,40E-7(g/s)} =$$

≅ 5,6 anos

¹ Michael Faraday (1791-1867) Físico e químico britânico. Suas contribuições ao Eletromagnetismo equivalem-se as de Isaac Newton à Mecânica. Determinou o sentido das linhas de força em um campo elétrico, contribuiu para o princípio da corrente elétrica induzida e suas equações serviram de base para a determinação das Equações de Maxwell



Foto 37 – Pesagem da pastilha de zinco

Tabela 6 – Dados para análise pela Lei de Faraday

LEI DE FARADAY DADOS GERAIS					
Constante de Faraday (F)	Pastilha de zinco (g)	Peso Molecular Zinco (g/mol)	Valencia do material (n)	e	u
96522	60	65,39	2	0,9	0,8

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 08/11/10 (1245 μA) na estaca 226.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica (g/mol)}}{n \times \text{const. Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,001245(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 5,86E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida, portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{5,86E-7(g/s)} =$$

$$\cong 3,2 \text{ anos}$$

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 29/11/10 (1114 μA) na estaca 226.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica (g/mol)}}{n \times \text{cons.Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,001114(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 5,24E-7.g/s$$

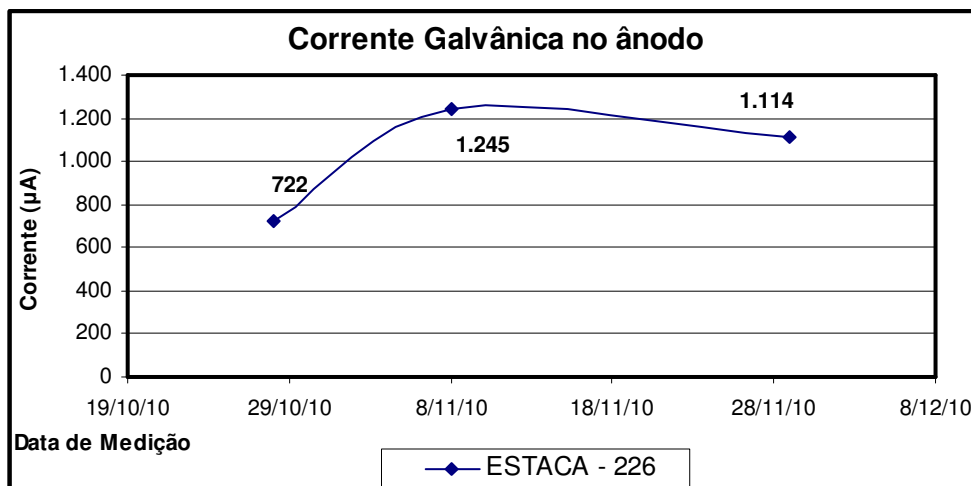
Massa de zinco consumida é de , portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{5,24E-7(g/s)} = \cong 3,6 \text{ anos}$$

Tabela 7 – Dados da estaca 226, estimativa de vida útil dos ânodos

ESTACA - 226				
Data	Corrente (μA)	Massa Consumida (g/s)	Vida útil (segundos)	Vida útil (Anos)
28/10/10	722	3,40E-07	1,8E+08	5,6
8/11/10	1.245	5,86E-07	1,0E+08	3,2
29/11/10	1.114	5,24E-07	1,1E+08	3,6
MÉDIA	1.027	4,83E-07	1,3E+08	4,2
MAXIMO	722	3,40E-07	1,0E+08	3,2
MÍNIMO	1.245	5,86E-07	1,8E+08	5,6

Gráfico 2 – Corrente galvânica no ânodo – estaca 226



Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 28/10/10 (424 µA) na estaca 303.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica (g/mol)}}{n \times \text{cons.Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,000424(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 2,00E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida é de, portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{2,00E-7(g/s)} = \cong 9,5 \text{ anos}$$

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 08/11/10 (1010 µA) na estaca 303.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica (g/mol)}}{n \times \text{cons.Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,001010(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 4,75E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida, portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{4,75E-7(g/s)} = \cong 4,0 \text{ anos}$$

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 29/11/10 (530 μA) na estaca 303.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica (g/mol)}}{n \times \text{cons.Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,000530(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 2,49E-7.g/s$$

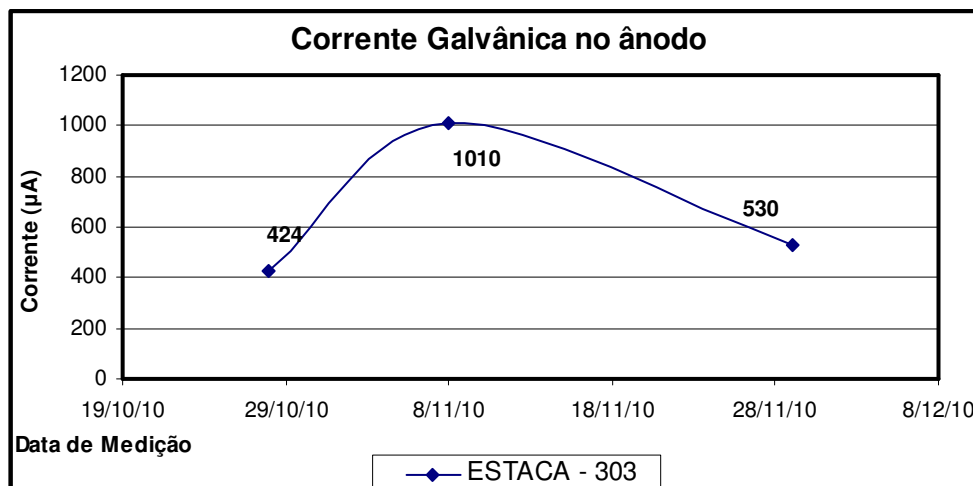
Massa de zinco consumida é de , portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{2,49E-7(g/s)} = \cong 7,6 \text{ anos}$$

Tabela 8 – Dados da estaca 303, estimativa de vida útil dos ânodos.

ESTACA - 303				
Data	Corrente (μA)	Massa Consumida (g/s)	Vida útil (segundos)	Vida útil (Anos)
28/10/10	424	1,99E-07	3,0E+08	9,5
8/11/10	1010	4,75E-07	1,3E+08	4,0
29/11/10	530	2,49E-07	2,4E+08	7,6
MEDIA	655	3,08E-07	2,2E+08	7,1
MAXIMO	424	1,99E-07	1,3E+08	4,0
MÍNIMO	1.010	4,75E-07	3,0E+08	9,5

Gráfico 3 – Corrente galvânica no ânodo – estaca 303



Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 28/10/10 (584 µA) na estaca 310.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica (g/mol)}}{n \times \text{cons.Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,000584(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 2,75E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida é de, portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{2,75E-7(g/s)} = \cong 6,9 \text{ anos}$$

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 08/11/10 (1340 µA) na estaca 310.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica (g/mol)}}{n \times \text{cons.Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,001340(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(c/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 6,30E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida, portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{6,30E-7(g/s)} = \cong 3,0 \text{ anos}$$

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 29/11/10 (360 μ A) na estaca 310.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica (g/mol)}}{n \times \text{cons.Faraday (c/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,000360(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(c/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 1,69E-7.g/s$$

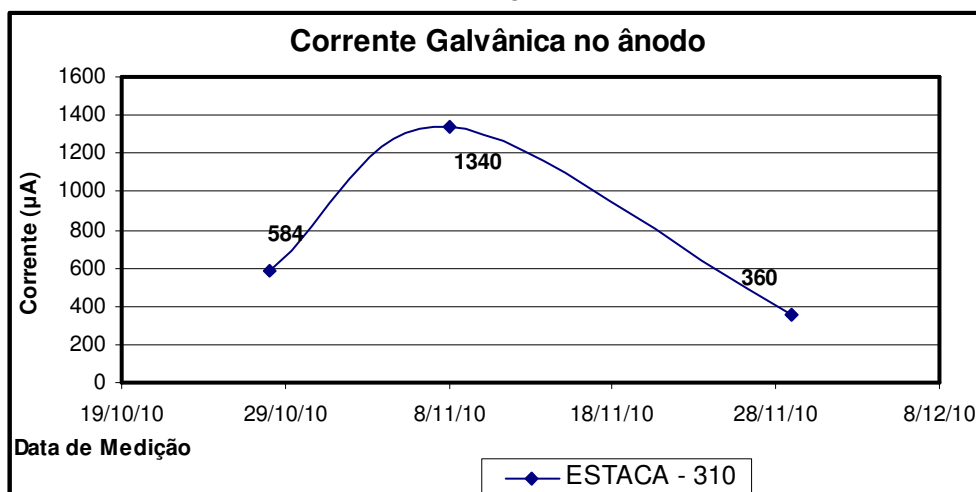
Massa de zinco consumida é de, portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{1,69E-7(g/s)} = \cong 11,2 \text{ anos}$$

Tabela 9 – Dados da estaca 310, estimativa de vida útil dos ânodos.

ESTACA - 310				
Data	Corrente (µA)	Massa Consumida (g/s)	Vida útil (segundos)	Vida útil (Anos)
28/10/10	584	2,75E-07	2,2E+08	6,9
8/11/10	1340	6,30E-07	9,5E+07	3,0
29/11/10	360	1,69E-07	3,5E+08	11,2
MEDIA	761	3,58E-07	2,2E+08	7,1
MAXIMO	360	1,69E-07	9,5E+07	3,0
MÍNIMO	1.340	6,30E-07	3,5E+08	11,2

Gráfico 4 – Corrente galvânica no ânodo – estaca 310



Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 28/10/10 (1146 µA) na estaca 317.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica (g/mol)}}{n \times \text{cons. Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,001146(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 5,39E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida é de, portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{5,39E-7(g/s)} = \cong 3,5 \text{ anos}$$

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 08/11/10 (1440 μA) na estaca 317.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atomica (g/mol)}}{n \times \text{cons.Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,001440(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 6,77E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida, portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{6,77E-7(g/s)} = \cong 2,8 \text{ anos}$$

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 29/11/10 (1240 μA) na estaca 317.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atomica (g/mol)}}{n \times \text{cons.Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,001240(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 5,83E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida é de, portanto:

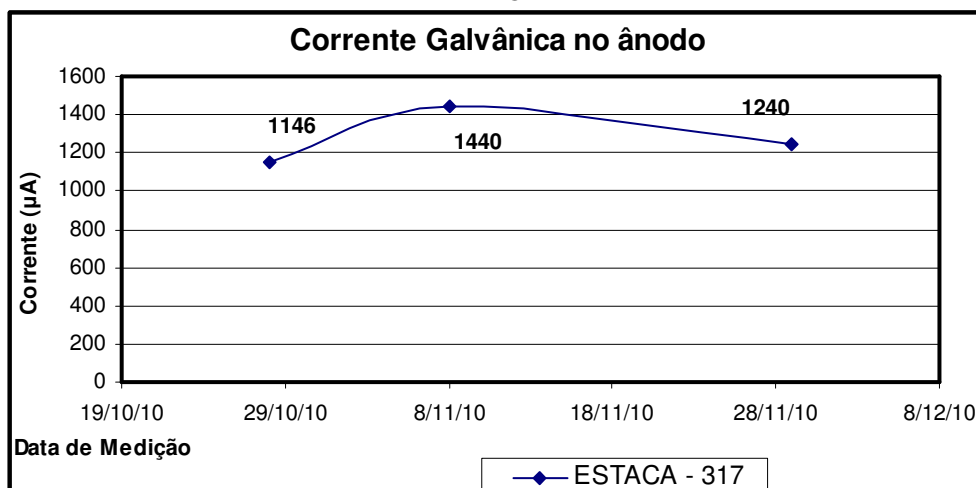
$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60 (g)}{5,83E-7 (g/s)} =$$

$\cong 3,3$ anos

Tabela 10 – Dados da estaca 317, estimativa de vida útil dos ânodos.

ESTACA - 317				
Data	Corrente (μA)	Massa Consumida (g/s)	Vida útil (segundos)	Vida útil (Anos)
28/10/10	1146	5,39E-07	1,1E+08	3,5
8/11/10	1440	6,77E-07	8,9E+07	2,8
29/11/10	1240	5,83E-07	1,0E+08	3,3
MEDIA	1.275	6,00E-07	1,0E+08	3,2
MAXIMO	1.146	5,39E-07	8,9E+07	2,8
MÍNIMO	1.440	6,77E-07	1,1E+08	3,5

Gráfico 5 – Corrente galvânica no ânodo – estaca 317



Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 28/10/10 (876 μA) na estaca 324.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica } (g/mol)}{n \times \text{cons.Faraday}(C/mol) \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,000876(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 4,12E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida é de , portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada } (g)}{\text{Massa consumida } (g/s)} = \frac{60(g)}{4,12E-7(g/s)} = \cong 4,6 \text{ anos}$$

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 08/11/10 (1326 μA) na estaca 342.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica } (g/mol)}{n \times \text{cons.Faraday}(C/mol) \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,001326(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 6,24E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida, portanto:

$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada } (g)}{\text{Massa consumida } (g/s)} = \frac{60(g)}{6,24E-7(g/s)} = \cong 3,0 \text{ anos}$$

Equação de Faraday para carga galvânica lida no dia 29/11/10 (830 μA) na estaca 342.

$$m = \frac{q(C/s) \times \text{Massa Atômica (g/mol)}}{n \times \text{cons.Faraday (C/mol)} \times (e \times u)}$$

$$m = \frac{0,000830(C/s) \times 65,39(g/mol)}{2 \times 96.500(C/mol) \times (0,9 \times 0,8)} = 3,90E-7.g/s$$

Massa de zinco consumida é de, portanto:

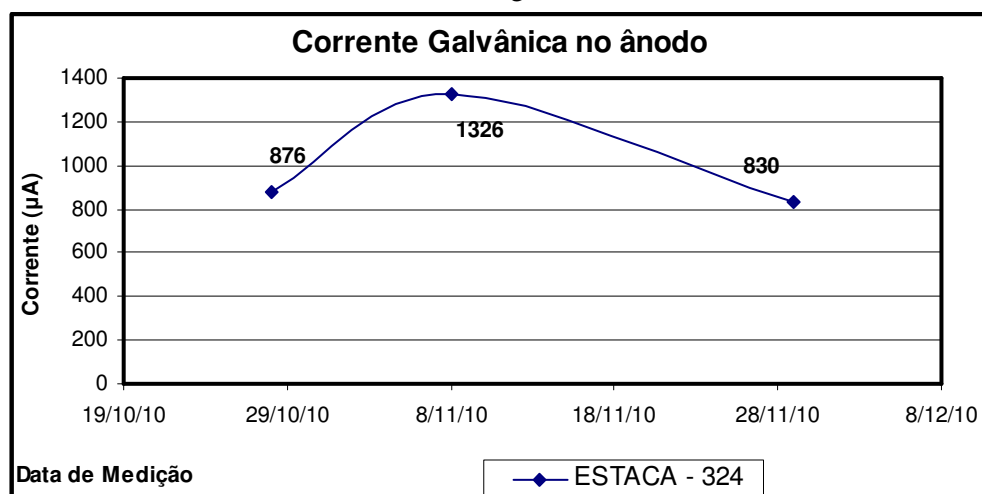
$$T = \frac{\text{Massa da Pastilha utilizada (g)}}{\text{Massa consumida (g/s)}} = \frac{60(g)}{3,90E-7(g/s)} =$$

$\cong 4,9$ anos

Tabela 11 – Dados da estaca 324, estimativa de vida útil dos ânodos.

ESTACA - 324				
Data	Corrente (μA)	Massa Consumida (g/s)	Vida útil (segundos)	Vida útil (Anos)
28/10/10	876	4,12E-07	1,5E+08	4,6
8/11/10	1326	6,24E-07	9,6E+07	3,0
29/11/10	830	3,90E-07	1,5E+08	4,9
MEDIA	1.011	4,75E-07	1,3E+08	4,2
MAXIMO	830	3,90E-07	9,6E+07	3,0
MÍNIMO	1.326	6,24E-07	1,5E+08	4,9

Gráfico 6 – Corrente galvânica no ânodo – estaca 324



4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

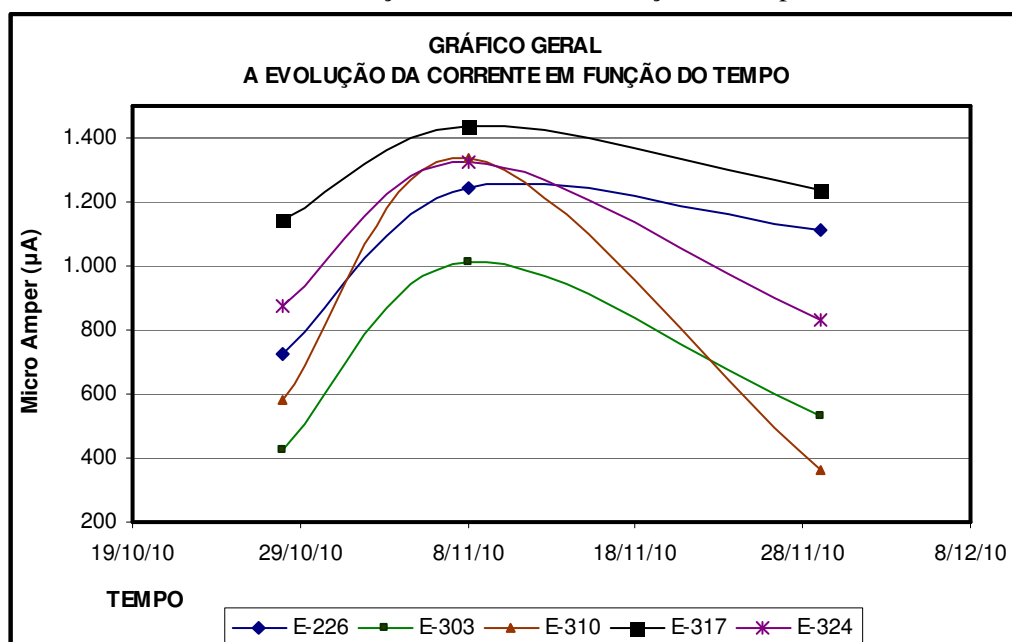
Os dados apresentados nos itens anteriores seguem aqui resumidos para melhor compreensão. Na Tabela 12 são vistos os resultados das medidas de corrente nas estacas

Tabela 12 – Resumo dos resultados das medidas de corrente (Amperagem) nas estacas

ESTACA	Recuperação	Colocação Ânodo	Medidas em micro Ampères (μA)		
	Data		28/10/10	08/11/10	29/11/10
E-226	24/09/10	24/09/10	722	1.245	1.114
E-303	14/08/08	18/08/10	424	1.010	530
E-310	21/05/10	18/08/10	584	1.340	360
E-317	01/11/08	18/08/10	1.146	1.440	1.240
E-324	21/05/10	18/08/10	876	1.326	830
E-339	10/11/10	10/11/10	0	0	725
E-346	10/11/10	10/11/10	0	0	694
E-353	10/11/10	10/11/10	0	0	776
E-354	25/11/10	24/11/10	0	0	565
Média			750	1.259	759
Desvio Padrão			277	162	278
Cof Variação			37%	13%	37%

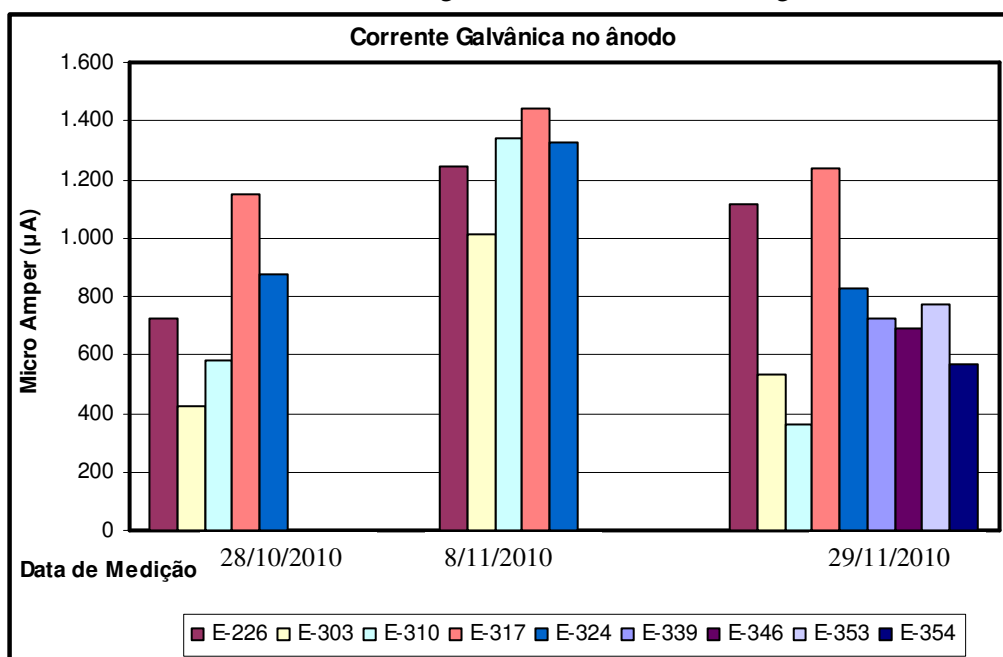
Na Tabela 12 verifica-se uma queda da corrente passante a partir da segunda medição (29/Nov./10), fato melhor apresentado pelo Gráfico 7 em que a queda é relacionada com a medição realizada.

Gráfico 7 – Evolução da corrente em função do tempo



No Gráfico 8, verifica-se, agora com enfoque nas estacas e um comparativo entre elas, a queda da corrente passante nos ânodos

Gráfico 8 – Corrente galvânica no ânodo, resumo geral



Através da realização de medições e testes foram buscadas informações para comprovação do consumo da pastilha de zinco, e de posse desses dados e com a utilização dos métodos de calculo existentes procurou-se determinar a estimativa provável de acréscimo de vida útil na estrutura reparada.

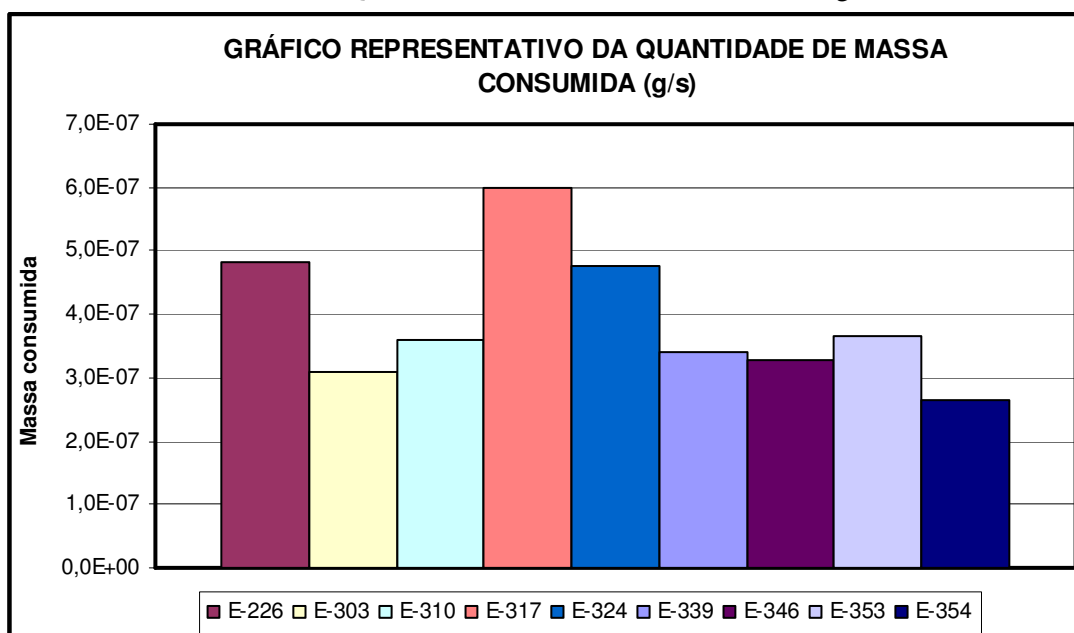
O consumo da pastilha de zinco é apresentado na Tabela 13, onde são relacionadas as estacas reparadas, a corrente passante ao longo das medições e a massa consumida até então

Tabela 13 – Resumo dos resultados das medidas de corrente e massa consumida

ESTACA	Recuperação Data	Colocação Ânodo	Medidas em micro Ampères (μ A)			Massa Consumida (g/s)
			28/out/10	08/Nov/10	29/Nov/10	
E-226	24/09/2010	24/09/2010	722	1.245	1.114	4,8E-07
E-303	14/08/2008	18/08/2010	424	1.010	530	3,1E-07
E-310	21/05/2010	18/08/2010	584	1.340	360	3,6E-07
E-317	01/11/2008	18/08/2010	1.146	1.440	1.240	6,0E-07
E-324	21/05/2010	18/08/2010	876	1.326	830	4,8E-07
E-339	10/11/2010	10/11/2010	0	0	725	3,4E-07
E-346	10/11/2010	10/11/2010	0	0	694	3,3E-07
E-353	10/11/2010	10/11/2010	0	0	776	3,7E-07
E-354	25/11/2010	24/11/2010	0	0	565	2,7E-07
Média			750	1.259	759	3,91E-07
Desvio Padrão			277	162	278	1,06E-07
Cof Variação			37%	13%	37%	27%

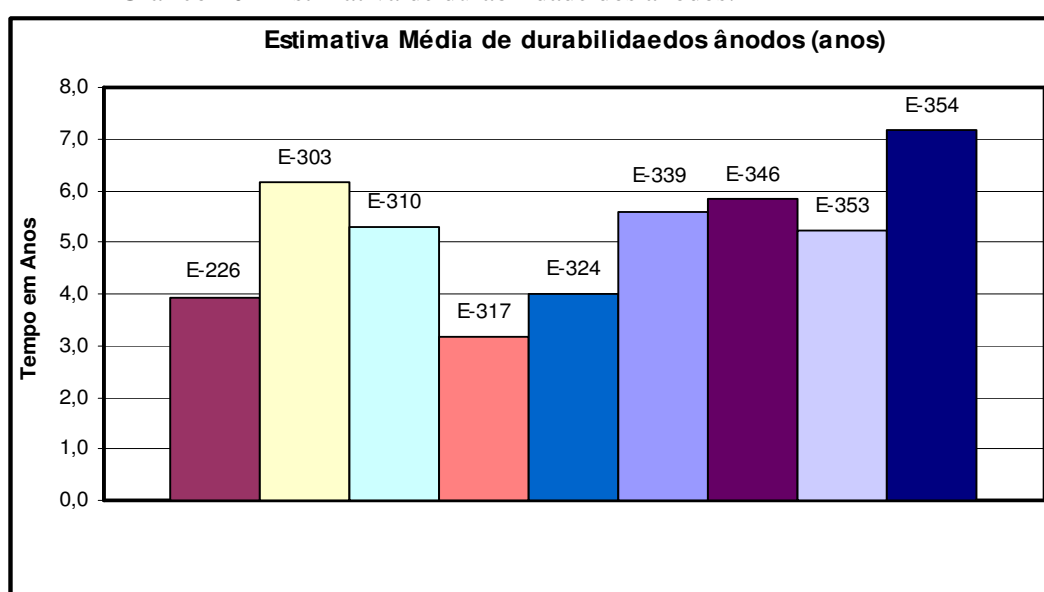
Analisando a Tabela 13, constata-se o consumo de massa maior na estaca 317, e menor na estaca 354. Estes dados são melhor visualizados no Gráfico 9

Gráfico 9 – Quantidade de massa consumida, resumo geral



Como citado, tomando como referência o consumo de massa do ânodo apresentado no Gráfico 9, foi possível estimar o aumento de vida útil das estrutura, cujos dados foram lançados no Gráfico 10

Gráfico 10 – Estimativa de durabilidade dos ânodos.



Como comentado anteriormente, verifica-se que a massa dos ânodos instalados na estaca 317 teve consumo consideravelmente maior que as demais estacas. Por outro lado, a estaca 354 apresentou o menor consumo de massa.

Analisando o Gráfico 10 e relacionando os dados aos do Gráfico 9, verifica-se que quanto maior o consumo de massa do ânodo, menor será a vida útil daquela estrutura, o que denota que a estaca está sofrendo ataque mais agressivo quando comparada às demais.

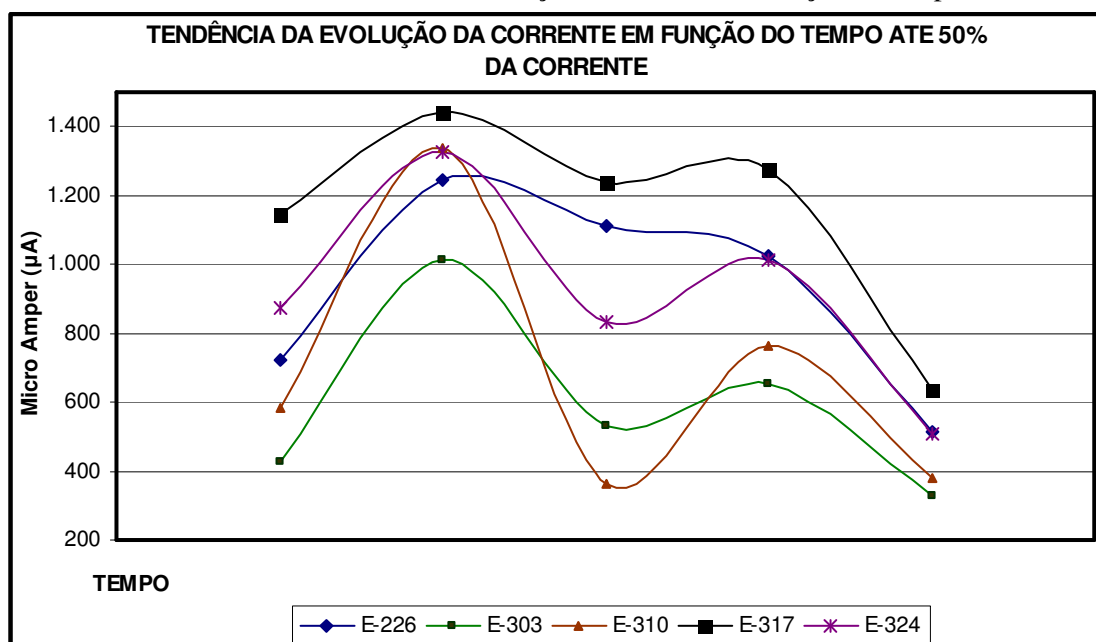
Tomando este fato, foi possível explicar sua ocorrência uma vez que a estaca 317 é a única de todo o campo amostral que sofre com escorrimento de material depositado na face superior do piso, o qual é diluído pela água pluvial e penetra com maior facilidade na estaca em questão.

Com estudos que embasaram este trabalho, constatamos que a queda de corrente deverá continuar ocorrendo ao longo do tempo, o que

Importante citar que o aumento de vida útil apresentado no Gráfico 10 não deve ser entendido como o aumento de vida útil final da estaca, apenas foi tomada uma referência como se os dados de consumo de massa e transmissão de corrente então obtidos fossem os dados finais, ou seja, como se estes valores fossem estagnados, o que não considera-se como verdade tomando por base os estudos que embasaram este trabalho que conduzem ao fato de que a corrente seguirá em queda constante ao longo dos anos, conferindo ainda maior vida útil a estaca.

Em adição ao apresentado anteriormente, foi elaborado o Gráfico 11, que apresenta uma tendência estatística da evolução da corrente passante em função do tempo.

Gráfico 11 - Tendência da evolução da corrente em função do tempo



O Gráfico 11 corrobora os estudos que subsidiaram a realização deste trabalho, ou seja, estima-se que a corrente passante pelos ânodos diminua ainda mais com o passar dos anos e, por conseguinte, ocorra também uma queda na massa consumida dos ânodos, o que conferirá maior vida útil à estacas

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho trouxe informações importantes para a avaliação da durabilidade de ânodos de sacrifício aplicados em estrutura de concreto armado em zona de variação de maré, por meio de medidas de corrente galvânica liberada pelos ânodos de sacrifício empregados nos reparos. Os ensaios experimentais permitiram as seguintes conclusões:

Embora ainda seja cedo para conclusões definitivas os resultados apresentados no Gráfico 7, mostraram que existe uma tendência de significativa redução e estabilização da corrente galvânica após um pico inicial, conforme já constatado por outros pesquisadores (SERGI, 2009).

Com essa redução de corrente a vida útil dos ânodos será superior ao calculado com as correntes iniciais. Em trabalhos realizados por WHITMORE (2009) a queda de corrente chegou a 75% após cerca de 4 anos da instalação dos ânodos.

Se levarmos em conta que a corrente galvânica representativa seja da ordem de 50% da corrente inicial a vida útil do ânodo seria superior a 20 anos WHITMORE (2009).

Após esse período é muito provável que tenha continuidade a corrosão do aço original das estacas reparadas e início da corrosão da armadura adicional, posto que a contaminação após o consumo do ânodo dará condições para tal.

De todas as formas, supondo se que seja efetiva a proteção em toda a zona de variação de maré, a vida útil do ânodo implica em um ganho igual em durabilidade dos reparos, posto que sem estes a deterioração passasse a acontecer em pouco tempo da conclusão dos reparos.

Cabe salientar ainda que a terapia originalmente proposta incluía uma proteção superficial geral das estacas, aumentando ainda mais a durabilidade dos reparos, dadas as dificuldades executivas que geram baixos cobrimentos, fissuração dos materiais de reparo e outras falhas.

Essa corrosão do aço original se dará a taxas inferiores às existentes antes do reparo, dada a proteção oferecida pelo encamisamento realizado o que reduz o acesso de oxigênio do meio externo para o interno.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

Continuidade da monitoração da corrente galvânica para possibilitar estimativas mais realistas da vida útil dos ânodos.

Verificação da influencia da umidade e da temperatura durante as leituras da corrente galvânica.

Outras medidas eletroquímicas como diferença de potencial e intensidade elétrica de corrosão complementada com inspeções destrutivas para verificação das condições dos ânodos e das armaduras.

Acompanhamento visual do desempenho das estacas reparadas para detectar qualquer anomalia de comportamento.

Verificação da corrente atuante em um mesmo elemento em diferentes regiões como, por exemplo, nas áreas emersas e nas imersas.

Verificação e ou comparação do comportamento de um mesmo sistema em diferentes meios de agressividade como ambientes marinhos, zona rural, zona industrial, zona urbana, etc.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Corrosion of Metal in Concrete**. Reported by ACI Committee 222. ACI Journal, Jan-Feb , p. 3-31, 1985

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **Standart Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method – G57:95a** (reapproved 2001). Annual Book of ASTM Standard, V. 3.2., 2002.

ANDRADE, Carmen. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Trad. Antonio Carmona Filho & Paulo Helene. São Paulo, PINI, nov. 1992. 105p. ISBN 85-7266-040-2

ANDRADE, J. C. **Extrações de testemunhos na Região Metropolitana do Recife pela empresa TECOMAT Ltda**. Recife, Dez/2006: Depoimento verbal.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - NBR 6118:2007. **Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado**. Rio de Janeiro.

_____. NBR 12655:2006. **Concreto – Preparo, Controle e Recebimento**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 7680:2007. **Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Durability of Buldings and Bulding Elements, Products and Components**. BS 7543. Londres, 1992.

CANOVAS, F.M. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo, Pini, 1988.

CARMONA, A. F. **Metodologia para Recuperação, Proteção e Determinação da Vida Útil Residual de Estruturas de Concreto em Meio Fortemente Agressivo**. São Paulo, 1998. 199p Tese (Doutorado) – Instituto Mackenzie.

CARMONA, T. G. **Modelos de Previsão da Despassivação das Armaduras em Estruturas de Concreto Sujetas a Carbonatação**. São Paulo, 2005. 91p Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. São Paulo: Ed. Pini, 1997.

COMITE EURO INTERNACIONAL du BETON. **CEB-FIP Model Code 1990. Design Code.** Lausanne, CEB, May, 1993. (Bulletin D'Information, 213-214).

CUNHA, A.C.Q.; HELENE, P.R.L. **Despassivação das Armaduras de Concreto por Ação da Carbonatação.** São Paulo, 2001. 100p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

EWINS, A. J. **Resistivity Measurements in Concrete.** British Journal of Non-Destructive Testing. V. 32, n.3, Mar, 1990.

FIGUEIREDO, Enio J. P. (1994). **Avaliação do Desempenho de Revestimentos para Proteção da Armadura contra a Corrosão através de Técnicas Eletroquímicas - Contribuição ao Estudo de Reparo de Estruturas de Concreto Armado.** Tese (Mestrado) 1º. e 2º. Volumes. São Paulo.

GENTIL, V. **Corrosão.** 3ªed.rev. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2003.

GONCALVES, A., ANDRADE, C., CASTELLOTI, M. **Procedimentos de reparos e proteção de armaduras.** In: HELENE, P. Manual de Reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: Multipla, 2003.

GONZALES, J.A.; OTERO, E.; FELIÚ, S. ; LÓPEZ, W. Initial Steps of Corrosion in the Steel/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + Cl^- System: The Role of Heterogeneities on the Steel Surface and Oxygen Supply. **Cement and Concrete Research.** V.23, n. 1, 1993.

HAMASSAKI, L. T. **Ensaio não-destrutivo: um diagnóstico completo.** Técnica, São Paulo, PINI, n. 6, p. 30-33, set/out. 1993.

HELENE, P.; PEREIRA, F. (Edit). **Manual de Reabilitação de Estruturas de Concreto, Reparo, Reforço e Proteção.** São Paulo: RED REHABILITAR, 2003. 718p. ISBN 85-903707-2-0

HELENE, Paulo R. do Lago (1984). **Avaliação da resistência à compressão de estruturas através de testemunhos cilíndricos de concreto.** In: III SIMPÓSIO SOBRE NORMALIZAÇÃO DE CIMENTO CONCRETO E AGREGADOS. São Paulo. Anais... São Paulo: ABNT/CB -18.

HELENE, Paulo. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, Universidade de São Paulo USP/PCC, 1993. (Tese de livre docência)

HELENE, Paulo. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo, PINI, IPT, 1986. 45p.

HELENE, Paulo. **Vida útil das estruturas de concreto.** Anais: 4º Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções e 6º Congresso de Controle da Qualidade, CON-PAT 97. Porto Alegre, UFRGS, 21 a 24 out. 1997.

ISAIA, G. C. (Edit.) **Concreto:** Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. 1600p. ISBN 85-98576-04-2

LICHTENSTEIN, Norberto B. **Patologia das Construções: Procedimento para a Formulação do Diagnóstico de Falhas e Definição de Conduta Adequada à Recuperação de Edificações.** São Paulo, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil PCC/USP, 1985. (Dissertação de Mestrado)

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **CONCRETO – Microestrutura, Propriedades e Materiais.** Espírito Santo, 2006. Ipsis Gráfica e Editora.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** 2. ed. São Paulo: Ed. Pini, 1997.

RINCÓN, Oladis. **Manual for inspecting, evaluating and diagnosing corrosion in reinforced concrete structures.** Ibero-american Program “Science and Technology for Development CYTED, Thematic Network XV.B Durability of Rebars”, August 2000. 204p. (em ingles) ISBN 980-296-541-3.

TROCÓNIS, O.; ROMERO, A.; ANDRADE, C.; HELENE, P.; DÍAZ, I. **Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion en estructuras de hormigón armado.** CYTED – Programa Iberoamericano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento. Rede Temática XV. Durabilidade da armadura – DURAR, 1997.

TUUTTI, K. Corrosion os Steel in Concrete,Stokholm,1982. 469p. **Swedish Cement and Concret Research**, Fo nº 504.

SERGI, GEORGE **Ten Year Results of Galvanic Sacrificial Anodes en Steel Reinforced Concrete.** EUROCORR, 6-10 September, Nice, France, 2009.

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

_____. **VECTOR CORROSION TECHNOLOGIES – DISTRIBUTOR TRAINING – MAY 17 – 18,2010. TAMPA,FL USA**