

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

BLENDA SILVA RIZÉRIO

ESTUDO SOBRE PROTEÇÃO CATÓDICA EM ESTRUTURA DE CONCRETO
ARMADO POR ANODOS DE SACRIFÍCIO

UBERLÂNDIA

2020

BLENDA SILVA RIZÉRIO

ESTUDO SOBRE PROTEÇÃO CATÓDICA EM ESTRUTURA DE CONCRETO
ARMADO POR ANODOS DE SACRIFÍCIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para a obtenção do título
de bacharel na Faculdade de Engenharia Civil
pela Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi

UBERLÂNDIA

2020

BLENDA SILVA RIZÉRIO

ESTUDO SOBRE PROTEÇÃO CATÓDICA EM ESTRUTURA INDUSTRIAL DE
CONCRETO ARMADO POR ANODOS DE SACRIFÍCIO

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA GRADUAÇÃO NA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi

Prof. Dr. Joseph Salem Barbar

Prof. Dr. Paulo Roberto Cabana Guterres

UBERLÂNDIA

2020

RESUMO

ESTUDO SOBRE PROTEÇÃO CATÓDICA EM ESTRUTURA INDUSTRIAL DE CONCRETO ARMADO POR ANODOS DE SACRIFÍCIO

A adoção da técnica de proteção catódica às estruturas de concreto armado aplicada por ânodos de sacrifício adequados, é ainda pouco usual no Brasil, o que decorre, em parte, do desconhecimento sobre o seu princípio de funcionamento e da ausência de sistemas e normas nacionais disponíveis para aplicação. Trata-se de um método recomendado quando há preocupações relacionadas à corrosão das armaduras de aço-carbono devido a recorrente contaminação do concreto, seja por carbonatação, seja por íons cloreto ou por corrosão localizada. É um método que demonstra versatilidade e eficiência, na medida em que serve tanto a ações preventivas para que se evite corrosão, quanto para diminuir o processo em curso. Seu princípio técnico é pautado no processo eletro químico da pilha galvânica de corrosão, inerente ao fundamento da proteção catódica cujo esclarecimento e dimensionamento são pretendidos neste trabalho. O trabalho é complementado pelo estudo de caso da aplicação da técnica de proteção catódica em uma estrutura de concreto armado destinado ao resfriamento de efluente de uma fábrica de ácido cítrico da cidade de Uberlândia. Caso este, cujo acompanhamento presencial e acompanhado do autor sucedeu-se somente durante processo executivo da operação, com posse do laudo técnico das condições patológicas da edificação e ensaios prévios realizados. Constatou-se, por meio do caso prático, a versatilidade do método para estruturas em meios agressivos e estabeleceu-se a prerrogativa de uma análise futura para que se comprove sua proteção.

Palavras-chave: Corrosão, armadura, proteção catódica, proteção galvânica, ânodos de sacrifício.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito elétrico de uma pilha simples.....	4
Figura 2 - Processo de oxidação e redução na armadura de concreto armado	5
Figura 3 - Corrosão localizada	6
Figura 4 - Novas regiões anódicas pós “recuperação” localizada convencional	7
Figura 5 – Curva típica de decaimento de potencial após desligamento da corrente de proteção	10
Figura 6 – Seção de uma estrutura de concreto armado recuperada com utilização de pastilha galvânica.....	12
Figura 7 – Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico simplificado e sistema Fe-H ₂ O a 25°C.....	12
Figura 8 - Comportamento esquemático do aço do concreto contaminado por pite a 20°C	13
Figura 9 – Identificação das estruturas estudadas	17
Figura 10 – Esquema de funcionamento da construção	17
Figura 11 – Relatório com índices de concentração das substâncias presentes no tanque	18
Figura 12 – Mecanismo de corrosão do aço em um pilar com face esquerda exposta à intempérie devido a íons cloreto.....	19
Figura 13 – Desgaste sobre linha d’água na parte interna do reservatório	20
Figura 14 – Armadura da estrutura exposta evidenciando baixo cobrimento da armadura na região	20
Figura 15 – Vista aproximada do sulco	21
Figura 16 – Umidade na face externa da parede causada pelo sulco.....	21
Figura 17 – Umidade ao redor dos furos para passagem de tubulação PVC	22
Figura 18 – Ensaio de carbonatação na parede de concreto	23
Figura 19 – Gráfico comparativo da Resistividade e Corrente de corrosão	24
Figura 20 - Princípio de funcionamento do equipamento <i>Resipod</i>	25
Figura 21 – Pontos escolhidos para teste de resistividade	25
Figura 22 - Relação potencial e taxa de corrosão	27
Figura 23 - Fundamento da medição de potencial pelo equipamento.....	27
Figura 24 - Mapa de potencial da parede do reservatório	28
Figura 25 - Ânodo galvânico para proteção em concreto.....	30

Figura 26 – Layout padrão para conexão em série	31
Figura 27 - Localização das armaduras através da leitura no equipamento Profoscope	32
Figura 28 - Detalhe do teste de bancada	32
Figura 29 - Teste de bancada com conexão em série	33
Figura 30 - Detalhe da instalação da unidade do ânodo de sacrifício	33
Figura 31 - Detalhe do sistema de proteção catódica instalado no concreto	34
Figura 32 - Teste de continuidade	34
Figura 33 - Acabamento do sistema com argamassa especial	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro comparativo entre serviços de recuperação estrutural para corrosão	8
Tabela 2- Valores de polarização para concentração de cloreto no concreto armado	11
Tabela 3 - Sugestões de densidade de correntes para diversas condições do concreto/armadura	16
Tabela 4 - Relação entre resistividade e probabilidade de corrosão	26
Tabela 5 - Valores de referência de potencial para corrosão	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	CORROSÃO	3
2.1.1	Conceito de Corrosão	3
2.1.2	Corrosão no Concreto Armado	4
2.1.3	Corrosão por pites: a corrosão localizada	6
2.2	PROTEÇÃO CATÓDICA.....	7
2.2.1	Contexto internacional	7
2.2.2	Comparação com outros serviços tradicionais	8
2.2.3	Normas	9
2.2.4	Princípios da Proteção Catódica.....	11
2.2.5	Dimensionamento da proteção catódica por ânodos de sacrifício.....	14
3	ESTUDO DE CASO: TORRE DE RESFRIAMENTO DE FÁBRICA DE ÁCIDO CÍTRICO.....	16
3.1	DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES.....	16
3.2	INSPEÇÃO E ENSAIOS REALIZADOS.....	18
3.2.1	Inspeção do reservatório e das torres	18
3.2.2	Ensaio de carbonatação	22
3.2.3	Ensaio de resistividade elétrica	24
3.2.4	Ensaio de potencial de corrosão das armaduras.....	26
3.3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA CATÓDICO.....	29
3.4	PROCEDIMENTOS DE INSTALAÇÃO DOS ÂNODOS DE SACRIFÍCIO PARA PROTEÇÃO CATÓDICA EM UMA DAS TORRES	31
3.5	DISCUSSÃO DO CASO.....	35
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
5	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
	ANEXO A.....	41

1 INTRODUÇÃO

A corrosão galvânica é uma patologia grave a afetar a construção civil desde o princípio da utilização do concreto armado e protendido. Tal ocorrência patológica é razão de altos custos globais acarretados pela perda de material deteriorado, perda de estruturas comprometidas, pela manutenção e recuperação de obras com o processo corrosivo em curso, somado ao elevado volume incidente deste processo deletério. Por estas razões, a corrosão nas armaduras é uma das principais manifestações patológicas estudadas na construção civil e industrial, com amplo acervo de estudos (RODRIGUES, 2005 *apud* NORMA SHRP – S 359, 1994).

A proteção catódica para concretos armados por corrente galvânica surgiu como uma ferramenta a mais no combate à corrosão. Trata-se de uma técnica cujo princípio é relativamente simples e bem antigo. Vastamente usado em cascos de navios, equipamentos e estruturas marítimas, a tecnologia foi então adaptada para estruturas em concreto armado e protendido em ambiente aéreo.

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

Este trabalho é relevante pois destaca-se das soluções clássicas e comuns ao tratamento da corrosão na armadura do concreto. Estes muitas vezes questionáveis, visto a recorrência usual da corrosão em estruturas já tratadas (RODRIGUES, 2000). Um dos fatores que atrapalham o tratamento da corrosão é a utilização de massas cimentícias e pinturas comuns. A proteção catódica, quando dimensionada e executada de maneira correta oferece garantia mais confiável no combate à corrosão.

Dentro do tema abordado no trabalho, objetivou-se o esclarecimento do processo corrosivo na armadura do concreto e sua correlação com o princípio da proteção catódica de maneira coerente e coesa. Por conseguinte, o fornecimento das diretrizes necessárias ao dimensionamento de um sistema de proteção catódica por ânodos de sacrifício em estruturas aéreas de concreto armado. Por fim, o estudo de

um caso da aplicação da técnica de proteção catódica em uma estrutura de ambiente industrial acompanhado pela autora.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CORROSÃO

2.1.1 Conceito de Corrosão

Os registros mais antigos que se têm acesso sobre descrições do fenômeno corrosão são as palavras de Plato (427 – 347 a.C), descrevendo-a como um elemento arenoso que se separava do metal. Segundo esclarecimentos mais atuais de Monge (2000, p. 21), a corrosão é dada por um processo eletroquímico no qual envolve reações químicas (trocas de elétrons) e corrente elétrica (fluxo de carga por um condutor) ao mesmo tempo.

O processo corrosivo pode ser compreendido por uma célula eletrolítica ou galvânica, que consiste em dois eletrodos com duas reações químicas: uma que cede elétrons (íons metálicos carregados positivamente) e outra que recebe elétrons (íons não metálicos carregado negativamente). Há, então, um fluxo de elétrons e íons em um meio solúvel em prol da neutralidade elétrica da célula (GENTIL, 2003).

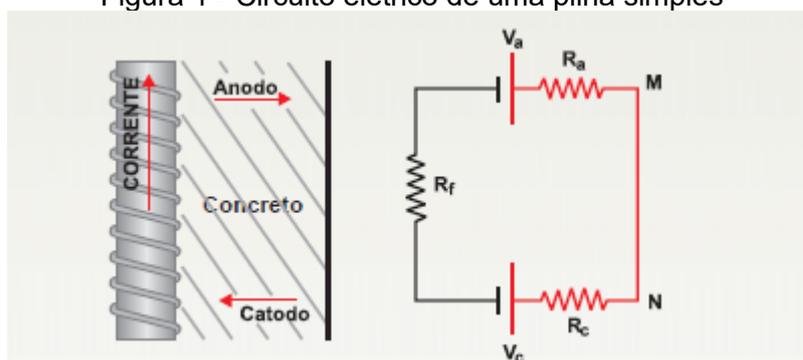
Os componentes desta pilha eletroquímica estão simplifiadamente listados abaixo, conforme Rodrigues (2005, p.4):

- Anodo – onde acontece a oxidação (corrosão), quando a corrente elétrica, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito;
- Catodo – onde acontece a redução, provocada pelos elétrons (cargas negativas), de onde sai a corrente elétrica;
- Eletrólito – condutor, normalmente líquido, de íons que transportam a corrente elétrica do anodo para o catodo
- Circuito metálico – ligação necessária para o fluxo de elétrons no sentido anodo-catodo.

A pilha quando tem qualquer um de seus componentes extraídos, é eliminada e, com ela, as possibilidades de corrosão caem. Como a barra metálica é o próprio elemento anódico, ele não deve ser retirado e sim protegido com revestimentos protetores e/ou proteção catódica (RODRIGUES, 2005).

Há uma variação de potencial no metal do concreto causada por diversos fatores nas propriedades desse aço. A superfície das barras que compõem a armadura tornam-se, então, grandes áreas catódicas e anódicas, ou seja, uma pilha de corrosão, conforme representação da Figura 1 (MONGE, 2000).

Figura 1 - Circuito elétrico de uma pilha simples



Fonte: MONGE, (2000)

Então, a pilha é representada por uma diferença de potencial entre seus eletrodos em circuito aberto – força eletromotriz. Tem-se que:

$$E_{pilha} = E_{catodo} - E_{anodo}$$

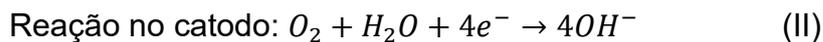
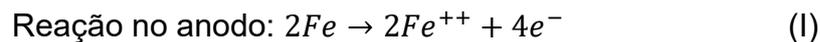
2.1.2 Corrosão no Concreto Armado

Estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil (NBR 6118, it. 6.1, 2014).

A corrosão no concreto armado implica severamente sobre as condições de estabilidade e durabilidade da estrutura, pois é um processo de destruição total, parcial, superficial ou estrutural que pode acometer no material concreto ou na armadura do concreto. No caso deste trabalho, o objeto de estudo é a corrosão na armadura, que traz como primeira consequência a perda de aderência na interface barra-concreto, perdendo-se assim boa parte da característica tração fornecida pela barra ao concreto dimensionada para a segurança da estrutura.

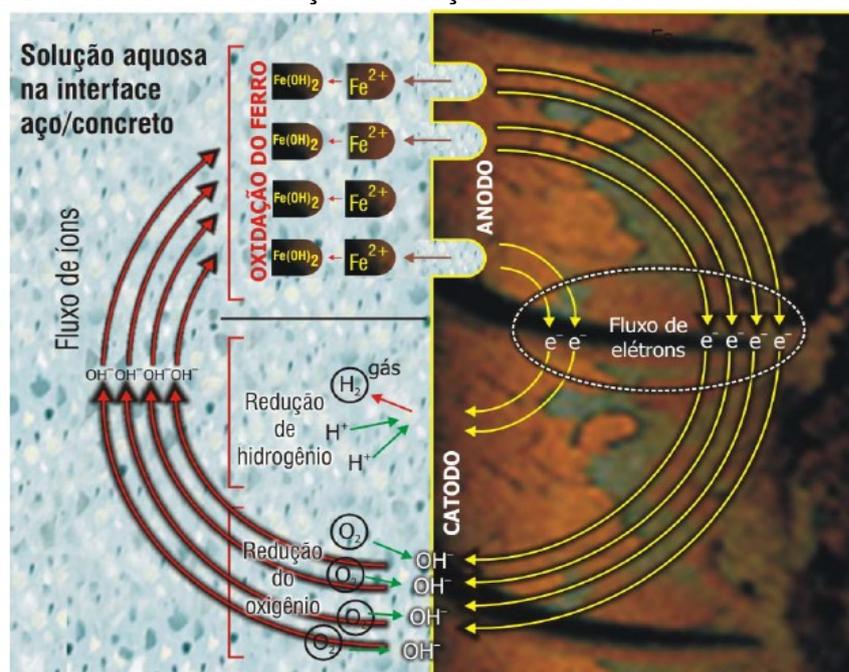
A ferrugem é o processo eletroquímico que surge logo em seguida a perda da aderência da barra ao concreto. Ela é caracterizada pela oxidação do ferro, que se expande devido ao volume maior requerido pelos óxidos, gerando sobretensões que podem resultar em fissuras e problemas estruturais graves, que reduzem o tempo de vida da estrutura gerando grandes perdas econômicas.

O concreto tem como proteção às armaduras seu pH básico – em torno de 12,5 e uma barreira física, entretanto sua característica pseudo-sólida, um material poroso que a depender das condições climáticas, do nível de agressividade do ambiente e das condições no qual ele foi produzido, invariavelmente terá a umidade adentrada (RODRIGUES, 1996). Na presença da água, acontece um fluxo de elétrons que define uma corrente elétrica que alimenta as duas reações (I e II) expostas a seguir (GENTIL, 2003):



Ambas as reações acontecem simultaneamente: enquanto o íon ferroso Fe^{++} , principal elemento do aço, desloca-se do anodo para o catodo, o íon hidroxila OH^{-} vem no sentido contrário, carregado de cargas negativas (GENTIL, 2003), como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Processo de oxidação e redução na armadura de concreto armado



Fonte: RODRIGUES, (2005) *apud* GLASS, G. K., BUENFELD, N. R., (p.1001, 1997).

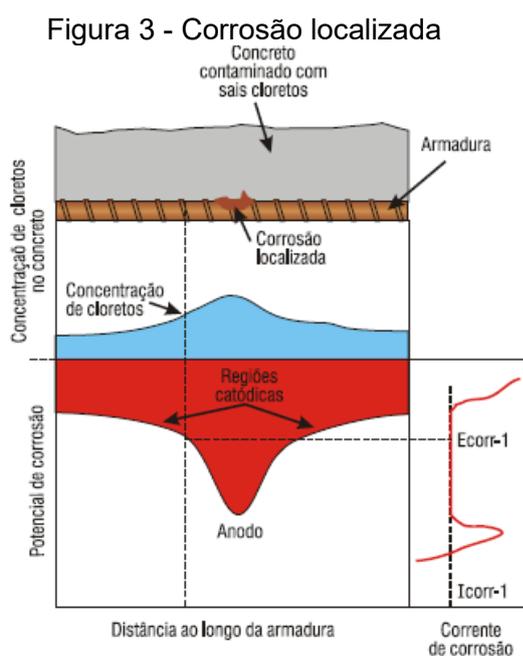
O concreto armado ainda conta com riscos patológicos devido à corrosão iniciados por contaminação de íons cloro, sulfatos e ainda ao processo de carbonatação, muito comum em ambientes com alto teor de poluição.

2.1.3 Corrosão por pites: a corrosão localizada

A corrosão por pite é um tipo de corrosão extremamente localizada, a qual cria pequenos orifícios que penetram o aço. Ela ocorre devido a perda da passivação de uma pequena área do aço, que se torna anódica comparada a outra vasta área, então, catódica (SCIENTIA, 2000 *apud* VALMONT, 1998).

Segundo Monge (2000, p. 15), essa corrosão acontece quando a concentração de hidróxidos - película passiva na superfície da armadura - é superada. Três fatores são os responsáveis pelo seu desencadeamento: concentração de hidróxidos nos poros adjacentes, concentração de outros íons negativos e existência de correntes galvânicas que influenciam no fluxo de cloretos para áreas anódicas.

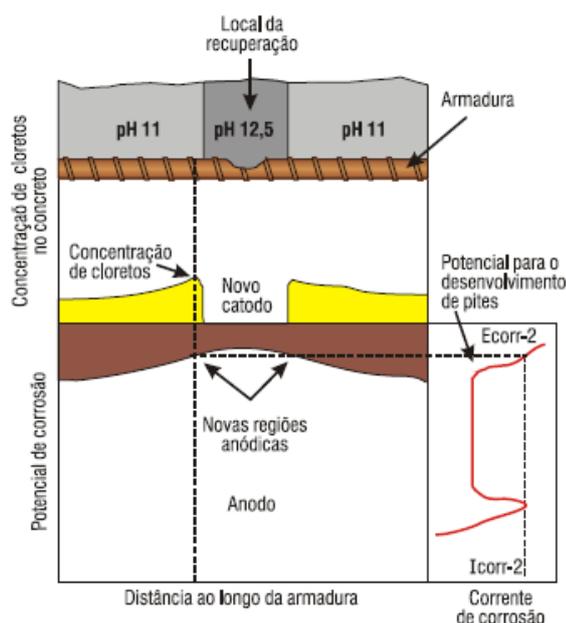
A Figura 3 mostra a corrosão localizada na armadura por contaminação de sais cloreto. Nota-se, também na ilustração, as áreas catódicas e do anodo através da curva potencial de corrosão (RODRIGUES, 2005).



Fonte: RODRIGUES, (2005) *apud* PAGE, C. L., SERGI, G., (2000).

Ressalta-se ainda, na Figura 4 a seguir, a ineficiência dos trabalhos convencionais de recuperação por meio de argamassas pré-fabricadas. Nas regiões vizinhas ao local recuperado, cria-se picos de concentração de os íons cloreto (em amarelo), transformando-os em novas áreas potenciais ao desenvolvimento de pite, pois tornam-se anódicas comparados à região tratada, dando início a uma nova pilha corrosiva (RODRIGUES, 2005 *apud* PAGE, C. L., SERGI. G., 2000).

Figura 4 - Novas regiões anódicas pós “recuperação” localizada convencional



Fonte: RODRIGUES, 2005 *apud* PAGE, C. L., SERGI, G., 2000.

2.2 PROTEÇÃO CATÓDICA

2.2.1 Contexto internacional

Tradicionalmente, o método da proteção catódica é direcionado a estruturas metálicas, submersas ou enterradas, especialmente no que tange a proteção de cascos de navios e tubulações enterradas. Entretanto, a construção civil também vem sendo beneficiada pela técnica protetiva à corrosão. Foi adotada pela primeira vez em 1973 em uma ponte na Califórnia, Estados Unidos, devido a um grave processo corrosivo que lhe afligia. Além dos casos de estruturas em caso de degradação, a proteção catódica também é utilizada para casos preventivos em estruturas novas (ARAUJO, PANOSSIAN, & LOURENÇO, 2013 *apud* BEAMISH, S.; EL-BELBOL, S. 1998).

Segundo Araujo, Panossian e Lourenço (2013, p. 187) *apud* Broomfield (1994), “até 1994 havia mais de um milhão de metros quadrado de proteção catódica aplicadas em estruturas de concreto nos Estados Unidos e Canadá e, provavelmente, outro milhão, ou mais, no resto do mundo”. E dados de Pedferri (1996) informam que “até 1996 a proteção catódica já tinha sido aplicada em cerca de 500.000 m² de estruturas de concreto com corrosão induzida por cloretos e 140.000 m² de estruturas novas, estas últimas na maioria estruturas protendidas”.

Dentre todas as condições as quais estão expostas as estruturas de concreto, a proteção catódica é majoritariamente aplicada às estruturas de concreto atmosféricas propensas à ação de íons cloreto, comumente localizadas em ambientes industriais e marinhos (ARAUJO, PANOSSIAN, & LOURENÇO, 2013).

2.2.2 Comparação com outros serviços tradicionais

No Brasil, não é comum o uso da técnica catódica em estruturas de concreto expostas em ambiente de alta agressividade, como o caso tratado neste trabalho. Normalmente, o que é realizado é a adoção de critérios rígidos de projeto, como elevada espessura de cobrimento e especificação da qualidade alta para o concreto. Para casos patológicos com deterioração das estruturas, o usual é a adoção de técnicas tradicionais de recuperação e tratamento superficial do concreto.

A tabela 1 traz um quadro dos serviços disponíveis no mercado para recuperação estrutural em decorrência da corrosão nas armaduras do concreto. É possível comparar as técnicas, e dentre seus respectivos prós e contras, designar a melhor conforme o caso. Entre os destaques, é notável a alta durabilidade das técnicas relacionadas à proteção catódica em detrimento às demais técnicas.

Tabela 1 - Quadro comparativo entre serviços de recuperação estrutural para corrosão

1. Recuperação estrutural convencional	2. Utilização de revestimentos (normalmente epóxicos)
<ul style="list-style-type: none"> - Não interrompe corrosão; - Acarreta barulho, entulho e paralizações; - É comum cobrar-se de R\$ 1.000,00 a R\$ 2.000,00/m³; - Usualmente, requer novos serviços após 5 anos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Revestimentos não interrompem a corrosão, apenas impedem a penetração de agentes contaminantes e água; - É comum cobrar-se de R\$ 20,00 a R\$ 50, 00/m³.
3. Inibidores de corrosão (migração)	4. Proteção catódica com malha de titânio
<ul style="list-style-type: none"> - Não oferecem qualquer garantia; 	<ul style="list-style-type: none"> - Proteção catódica com malha de titânio;

<ul style="list-style-type: none"> - Não há como comprovar que o material aplicado adentra no concreto em direção à armadura, interrompendo a corrosão; - É comum cobrar-se de R\$ 20,00 a 50,00/m³. 	<ul style="list-style-type: none"> - Durabilidade de 20 a 30 anos; - Não é aplicada em locais onde há apenas corrosão localizada; - Requer manutenção e monitoramento constantes; - Requer revestimento e proteção; -Custo em torno de R\$ 520,00/m² para pontes e R\$ 750,00/m² em estruturas marítimas.
<p>5. Proteção catódica com Jaqueta G (RECUPERAR nº 25)</p>	<p>6. Proteção catódica com Pastilha Galvânica (RECUPERAR nº33)</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Usada apenas em estacas marítimas, na zona de variação da maré; - Durabilidade superior a 30 anos; - Aplicação rápida, tendo comprimento em cerca de 2m; - Custo em torno de R\$ 4.500,00/estaca. 	<ul style="list-style-type: none"> - Durabilidade em torno de 15 anos; - Aplicada em qualquer estrutura, principalmente marítima; - Custo em torno de R\$ 15,00/unidade.

Fonte: RODRIGUES, (2000)

O fato é que, na prática, as técnicas e critérios tradicionais utilizados para a proteção da armadura nem sempre atentam a garantia e durabilidade da estrutura, especialmente para ambientes agressivos. Portanto, trabalhos como este que visam “novas” tecnologias são justificados e bem vindos.

2.2.3 Normas

São duas as normas encontradas para proteção catódica em concreto armado: a norma *NACE RP International 02990-90 – “Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures”* e a norma *SHRP-S-359 – “Criteria for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Elements”*.

O fundamento de ambas é estabelecer critérios para aceitação dos serviços de proteção catódica, essencialmente, valores de potencial mínimo para proteção do metal. Elas são necessárias, pois o valor prático do potencial de proteção varia de acordo com o eletrólito existente (RODRIGUES, 2005).

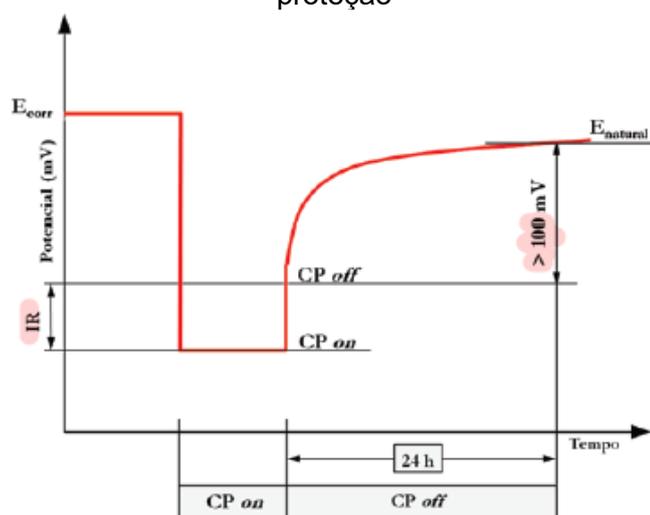
A norma NACE RP 0290-90 propõe o critério de 100 mV de despolarização para estruturas atmosféricas com indícios de corrosão. Segundo Araujo, Panossian e Lourenço (2013, p. 189):

“(…) a corrente de proteção a ser adotada deve ser tal que, no local mais anódico em cada área de 50 m², o potencial da polarização catódica real seja

de no mínimo, 100 mV. Em obras integras ou pouco contaminadas com cloreto, com potenciais mais positivos que -200 mV (eletrodo CSC), não há necessidade de adoção deste valor limite mínimo de polarização”.

A Figura 5 explica a aplicação deste critério: sendo E_{corr} , valor de potencial sem proteção da armadura; CP_{on} valor atingido pós proteção catódica; CP_{off} , valor atingido logo após desativação da corrente de proteção – explicado pela interferência de resistência do meio (queda ôhmica). O tempo de decaimento mencionado de 4 horas é o padrão. Porém, este tempo pode ser insuficiente para atingir a estabilização do potencial. Nesses casos, tempos maiores podem ser adotados, chegando a 24 h e $E_{natural}$ o valor que o potencial tende a retomar para constância (PEDEFERRI, 1996).

Figura 5 – Curva típica de decaimento de potencial após desligamento da corrente de proteção



Fonte: Raupach e Bruns, (2002)

A norma NACE 02990-90 propõe que a diferença de potencial natural e *off* ($E_{natural} - E_{off}$) apontadas na Figura 6, chamada de potencial de despolarização, seja maior ou igual a 100 mV (ARAUJO, PANOSSIAN, & LOURENÇO, 2013).

A norma SHRP-S-359, por sua vez, é mais flexível ao correlacionar o potencial de despolarização e a concentração de íons Cl^- presente no concreto armado. Ela não menciona qualquer outro íon, se não o cloreto e apresenta relação conforme Tabela 2 abaixo.

Tabela 2- Valores de polarização para concentração de cloreto no concreto armado

Valores de [Cl ⁻] em função do ΔE	
Concentração de íon Cl ⁻ (kg/m ³ de concreto)	Potencial de Depolarização ou polarização necessária (mV)
< 0,6	0
0,6 – 1,2	60
1,2 – 3,0	80
3,0 – 6,0	100
6,0 – 12,0	150

Fonte: RODRIGUES, 2005 *apud* SHRP-S-359,1994

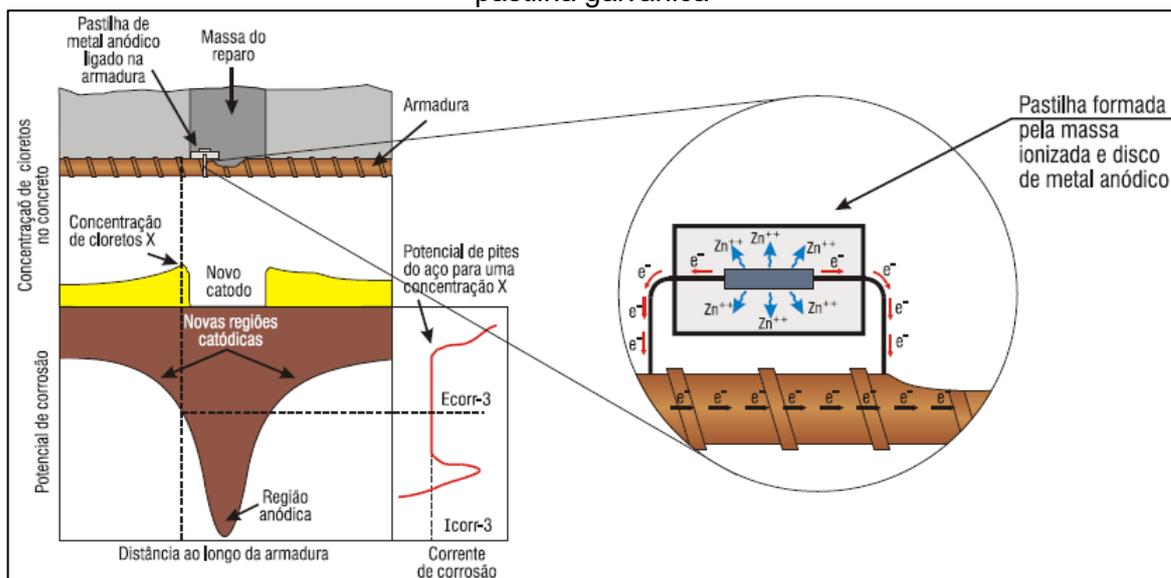
2.2.4 Princípios da Proteção Catódica

O fundamento da proteção catódica, de forma simples, é definido pela redução ou supressão do processo corrosivo pela conversão das armaduras em áreas catódicas. Isso é feito por imposição de uma corrente galvânica ou impressa para que o potencial da interface aço/concreto caia para valores mais negativos que seu potencial natural de corrosão (ARAUJO, PANOSSIAN, & LOURENÇO, 2013).

A pilha de corrosão acontece na armadura com o advento de uma superfície anódica e outra catódica, sob condições já mencionadas anteriormente. O gradiente de potencial existente entre eles impele uma corrente de corrosão galvânica que flui do cátodo para o ânodo. Esta dinâmica resulta na perda de metal na área anódica, de forma generalizada ou localizada – corrosão por pites (RODRIGUES, 2005) (GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R., 1997).

A intenção da proteção catódica, então, é impor uma corrente galvânica superior a corrente corrosiva, para redirecioná-la a um metal mais ativo (nova área anódica) e, assim, proteger toda a área comprometida. A Figura 6 é um exemplo de estrutura recuperada através de um disco de metal anódico (zinco) que redireciona o fluxo iônico no eletrólito (RODRIGUES, 2005).

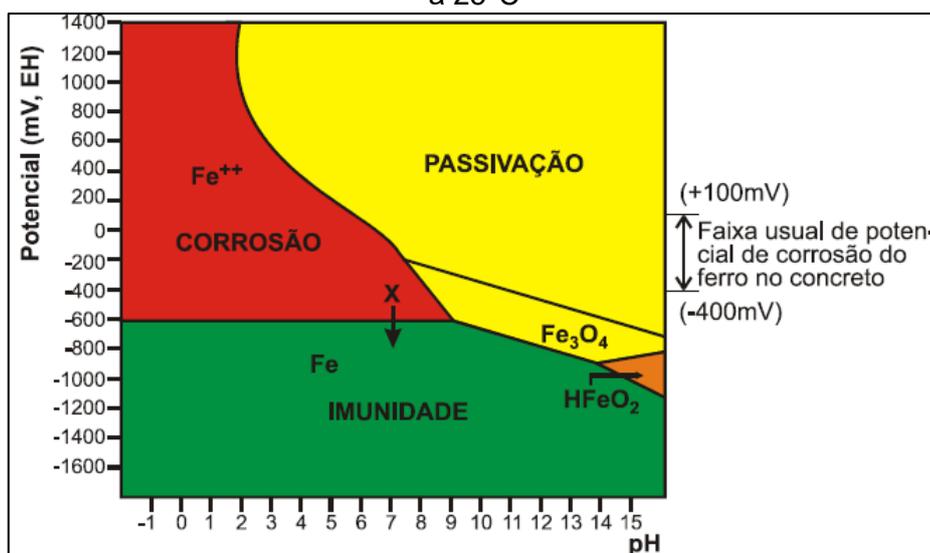
Figura 6 – Seção de uma estrutura de concreto armado recuperada com utilização de pastilha galvânica



Fonte: RODRIGUES, (2005) *apud* PAGE, C. L., SERGI, G., (2000).

Comumente citado nos estudos referentes à proteção catódica, os diagramas de Pourbaix explicita a relação do sistema ferro-água, água a 25°C entre potencial, pH e as curvas de polarização, que delimita os domínios: Corrosão, Passivação e Imunidade, como ilustra a Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico simplificado e sistema Fe-H₂O a 25°C



Fonte: Rodrigues, (2005) *apud* Glass e Buenfeld, (1997)

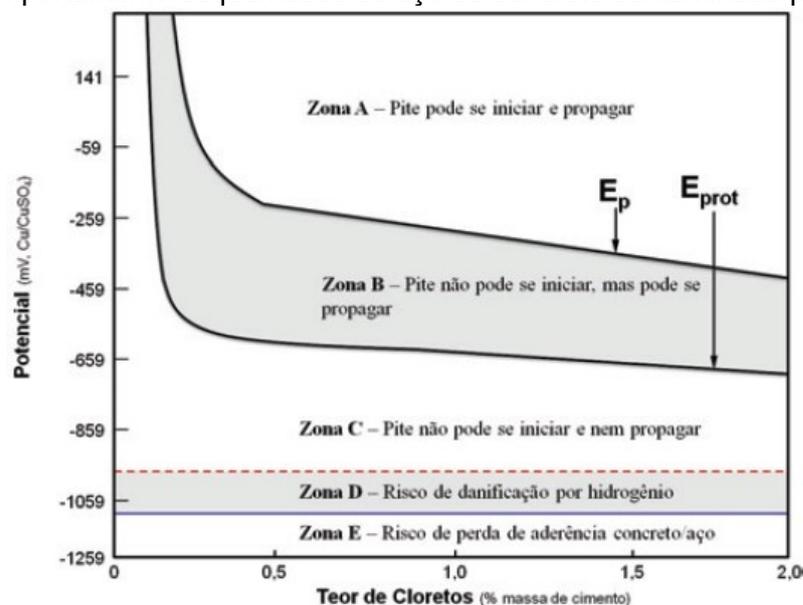
Por meio do diagrama de Pourbaix, nota-se que o aço se mantém passivo para pH elevado (em torno de 13), usual para concreto íntegro inclusive dentro da

faixa destacada como potencial de corrosão. Esse domínio (em amarelo) é caracterizado pela presença de Fe_3O_4 ou Fe_2O_3 (GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R., 1997).

Para o padrão eletrodo de hidrogênio (EH), a faixa potencial de corrosão do ferro no concreto (de +100 mV a -400 mV) entra de fato na zona patológica (domínio em vermelho) quando seu pH é reduzido por contaminante, seja ele qual for. Então, neste momento, a proteção catódica faz induzir uma mudança de potencial para valores mais negativos até que se atinja o domínio da imunidade (em verde). Deste modo, o processo de corrosão é interrompido (ARAUJO, PANOSSIAN, & LOURENÇO, 2013).

De forma análoga, têm-se a Figura 8, com o comportamento esquemático do aço em concreto frente à corrosão por pite. São curvas potenciais que separam zonas de risco da propagação da patologia. E para interromper a propagação por pite, basta baixar o potencial até que atinja um valor abaixo de E_p (potencial de pite) para que saia da zona A, menor ainda que E_{prot} (potencial de proteção de pite), e alcance a zona de segurança (zona C) (ARAUJO, PANOSSIAN, & LOURENÇO, 2013 *apud* PEDEFERRI, P, 1996; EM ISSO 12696, 2008).

Figura 8 - Comportamento esquemático do aço do concreto contaminado por pite a 20°C



Fonte: (ARAUJO, PANOSSIAN, & LOURENÇO, 2013) *apud* Pedferri, (1996)

Há dois métodos usuais para a proteção catódica: por corrente impressa ou galvânica. A segunda é o sistema estabelecido pela ligação de um metal mais ativo

– zinco, alumínio, magnésio e liga destes materiais, à armadura imerso no eletrólito. Esse metal, então, torna-se a área anódica “sacrificando-se” pela estrutura, agora, catódica em um novo sistema de pilha galvânica planejado. Por isso o nome, ânodo de sacrifício (RODRIGUES, 2005).

Estes anodos de sacrifício devem seguir algumas exigências tais quais as listadas abaixo:

- bom rendimento teórico da corrente em relação à massa a ser consumida;
- a corrente não deve diminuir com o tempo;
- não é recomendado que o rendimento prático da corrente seja muito inferior ao teórico;
- potencial de corrosão da liga metálica do anodo deve ter potencial de corrosão suficientemente negativo;
- alta eficiência do anodo – não deve conter impurezas para que o próprio não entre em corrosão. Por isso, o baixo teor de ferro e adição de alumínio e cádmio ao zinco;
- estado ativo para a corrosão uniforme do anodo para evitar sua passivação. Adiciona-se mercúrio ou índio em anodos de ligas de alumínio para reduzir tal efeito (RODRIGUES, 2005, *apud* CHRISTOPHER, L.P.; SERGI, G., 2000).

Os anodos de sacrifício utilizados em estruturas de concreto armado aéreas são, na sua maioria, formados por discos de ligas metálicas combinadas, imersos em uma massa cimentícia rica em sal de lítio, cujo fim é promover e sustentar a atividade do metal anódico (RODRIGUES, 2004). Tal massa tem na sua composição a presença dos íons de lítio, cujo função é interromper qualquer reação entre o álcali do cimento e os agregados do concreto, paralelamente a ação do sal de lítio (LiNO_3) que com sua característica higroscópica, mantém a interface anodo-massa cimentícia úmida e condutiva (RODRIGUES, 2005 *apud* PAGE, C. L., SERGI, G., 2000).

2.2.5 Dimensionamento da proteção catódica por ânodos de sacrifício

O primeiro fator de interesse para a seleção dos anodos é estudar as características da estrutura a ser protegida, depois a identificação do eletrólito em

contato com o material metálico. Metais puros muito ativos, como o zinco e alumínio, não são recomendados para eletrólitos de baixa resistividade como o concreto, pois passivam-se facilmente. Estes metais são designados para estruturas metálicas imersas *offshore*. Para o concreto o ideal é que haja uma combinação entre estes metais (zinco, alumínio, índio, por exemplo) com suas devidas proporções (GENTIL, 2003).

Para que haja o dimensionamento do sistema, inicialmente é necessário avaliar e mapear a estrutura de concreto armado ou protendido quanto a um possível estado de corrosão. Para tal, são listados a seguir os testes necessários:

- Análise de cloretos (Chlor-Test) e pH (lápiz medidor);
- Mapeamento dos deslocamentos, fissuras e trincas existentes;
- Espessura da camada de recobrimento do concreto;
- A área real ou estimada da armadura;
- Os potenciais de corrosão (semi-pilha CPV-4);
- Verificação da continuidade elétricas das armaduras (CPV-4);
- Resistividade elétrica do concreto (RESI);
- Carbonatação (Carbo-detec) (RODRIGUES, 2000, p.5).

Segundo Rodrigues (2000), o fator mais importante ao dimensionamento da proteção catódica, fora a condição concreto/armadura, é a densidade (mA/m^2) da corrente, definida pela corrente que corre da pilha de corrosão por unidade de área do anodo de sacrifício para cessar a corrosão. Entretanto, há pouca informação sobre o assunto. Deve-se considerar que a densidade da corrente a ser utilizada no sistema não dependa do tipo de proteção catódica a ser empregado, por isso a necessidade do conhecimento da resistividade do concreto (eletrólito), cuja área da superfície é tão mais importante ao dimensionamento quanto a da armadura.

A melhor maneira para se estabelecer a densidade da corrente a ser empregada é através de testes. Ela pode variar de 4 mA/m^2 até 90 mA/m^2 a depender da taxa de corrosão no ponto de aplicação. Ainda assim, a tabela 3 abaixo serve de parâmetro nesta busca (RODRIGUES, 2000).

Tabela 3 - Sugestões de densidade de correntes para diversas condições do concreto/armadura

Estado do concreto que envolve as armaduras	Densidade de corrente em mA/m ² de armadura
Alcalino, sem corrosão e pouco oxigênio	0,1
Alcalino, estrutura sem corrosão, mas com ambiente que poderá comprometer	1,3
Alcalino, presença de cloretos, concreto seco e de boa qualidade, recobrimento adequado, mas com poucos sinais de corrosão	3 - 7
Cloretos presentes, humidade constante, concreto de baixa qualidade, pouco recobrimento e presença de corrosão	8 - 20
Altos níveis de cloretos, estrutura sujeita a imersão e secagem com altos níveis de oxigenação, calor, recobrimento inadequado e bastante corrosão	30 - 50

Fonte: Rodrigues (2000)

3 ESTUDO DE CASO: TORRE DE RESFRIAMENTO DE FÁBRICA DE ÁCIDO CÍTRICO

O caso apresentado compreende um projeto complexo de revitalização de uma estrutura fabril com diversos sintomas patológicos, dentre eles a corrosão, foco substancial neste trabalho.

É importante esclarecer que o projeto teve três fases até o presente momento: fase da perícia e ensaios (2018), fase dos cálculos e dimensionamento (2018) e fase executiva (2019). A autora teve um período de acompanhamento presencial do caso em 2019, portanto, não teve participação efetiva no dimensionamento e cálculos realizados no que se refere ao laudo técnico mencionado no texto a seguir, mas sim acesso a eles e acompanhamento fiscal da parte executiva.

3.1 DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES

O caso estudado neste trabalho é uma estrutura em concreto armado destinada ao resfriamento de efluente de uma fábrica de ácido cítrico localizado no distrito industrial no município de Uberlândia. Trata-se uma construção inaugurada em maio de 2000, com aparentes sintomas patológicos da construção civil. A construção compreende duas torres de resfriamento paralelas separadas por um reservatório com dimensões e formatos conforme figuras 9 e 10.

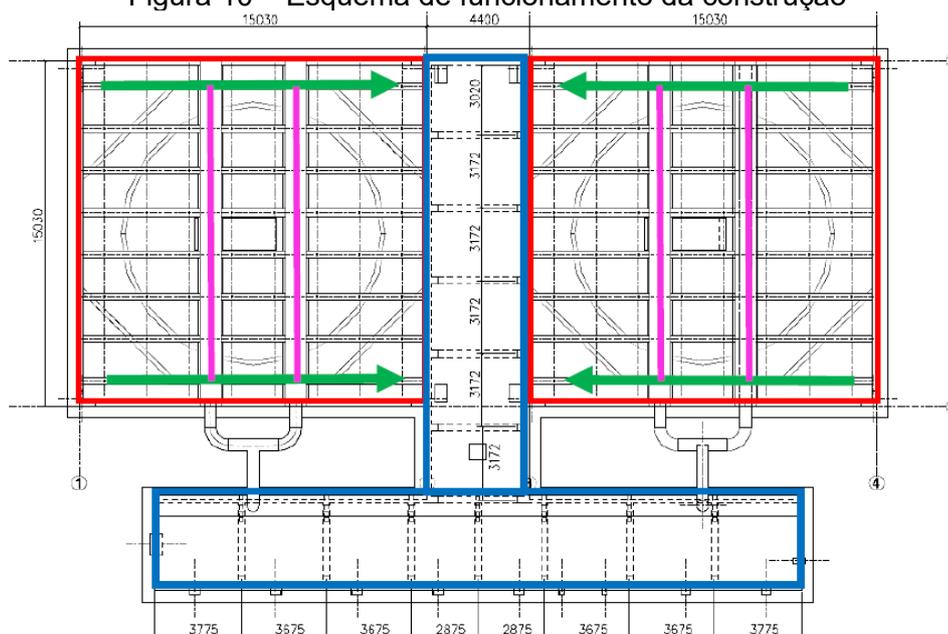
Figura 9 – Identificação das estruturas estudadas



Fonte: Laudo técnico M (2018)

O sistema opera em um circuito fechado (figura 10): a água quente que chega da fábrica entra por duas calhas de concreto (linhas em rosa) e se dissipa quando passa pelas aletas de gotejamento (“colmeia”) resfriada por ventiladores (um para cada torre, dois no total) em direção às calhas laterais de concreto (setas verdes), para finalmente ser encaminhada ao reservatório em formato T (M Engenharia S/S LTDA, 2018).

Figura 10 – Esquema de funcionamento da construção



Fonte: Laudo técnico M (2018)

3.2 INSPEÇÃO E ENSAIOS REALIZADOS

3.2.1 Inspeção do reservatório e das torres

Não há nenhum outro contaminante tão extensivamente documentado como agente da corrosão quanto os cloretos na literatura, portanto a contribuição deletéria dos cloretos é evidente e indubitável. Sua participação é ampla dentro do processo corrosivo, da despassivação das armaduras até as reações em si (RODRIGUES, 2005).

A figura 11 apresenta a composição físico-química do efluente, indicando que ele tem um pH praticamente neutro e que contém íons livres de cloro e cloreto, portanto acarretam certa agressividade ao concreto.

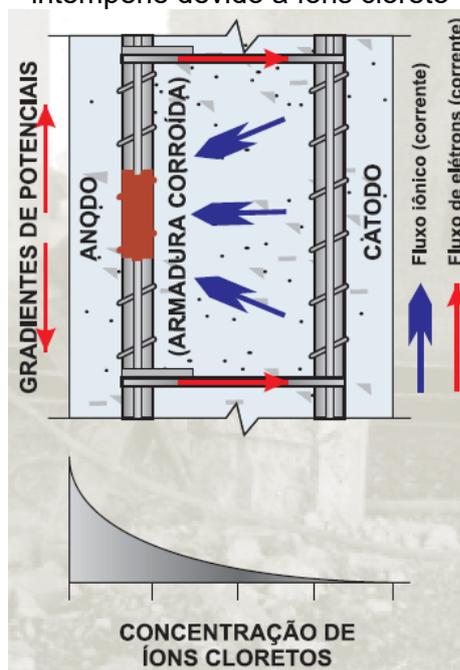
Figura 11 – Relatório com índices de concentração das substâncias presentes no tanque

Parameter	Unit	Jul 02-J ul 08	Jul 09-J ul 15	Jul 16-J ul 22	Jul 23-J ul 29	Jul 30-A ug 05	Aug 06- Aug 12	Aug 13- Aug 19	Aug 20- Aug 26	Aug 27- Sep 02	LCL	UCL
pH	pH	8.231	8.257	8.304	8.265	8.438	8.463	8.306	8.367	8.424	8	8.5
Conductividade	µS/cm	1573.71 4	--	1587.68	1892.27 8	1070.86 8	1163.53 5	1174.40 7	1158.75 1	1102.98 9	50	1500
ORP	mV	545.078	528.535	538.787	543.919	547.529	539.652	538.006	530.022	529.833	400	645
Ortofosfato sem Filtracao	ppm	6.6	6.175	5.84	14.75	6.075	5.8	6.36	4.545	5.275	5	8
Ortofosfato Filtrado 0.22u	ppm	6.1	5.265	5.575	13.18	5.655	5.225	5.685	4.165	5.07	3	6
Alcalinidade Total	ppm	128.2	138.0	123.4	128.5	180.2	215.6	90.3	159.05	162.8	10	500
Calcio	ppm	89.05	113.865	115.385	127.52	120.835	111.94	121.31	110.55	95.24	50	200
Magnesio	ppm	8.83	11.735	13.59	14.63	18.155	9.715	10.67	9.125	6.48	0	150
Cloreto	ppm	131.96	109.345	133.39	160.135	126.955	149.085	138.025	160.0	129.345	5	150
Cloro Residual Livre	ppm	0.2	0.7	0.6	0.1	1.05	0.7	1.35	1.2	1.05	0.5	1.5
Ferro Total	ppm	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0	3.0

Fonte: Laudo técnico M (2018)

Os dados sobre a concentração do componente cloro é importante para o caso de contaminação pelo meio externo por íons cloreto, pois pode desencadear ações deletérias na armadura do concreto, como explica a Figura 12. A concentração de íons cloreto tende a diminuir exponencialmente ao longo da camada de revestimento do concreto, da superfície às armaduras (DERRIEN, F; et al., 1990). O campo elétrico é formado (anodo e catodo) devido ao alto gradiente de concentração iônica. Por conseguinte, o aço corrói pelo mecanismo galvânico das pilhas de concentração (MONGE, 2000).

Figura 12 – Mecanismo de corrosão do aço em um pilar com face esquerda exposta à intempérie devido a íons cloreto



Fonte: MONGE, 2000

Em setembro de 2018 houve um breve período de paralisação da fábrica para esvaziamento do reservatório para avaliação completa das paredes externas e internas da estrutura. Constatou-se estado geral da estrutura do reservatório satisfatório. No entanto foram encontradas áreas pontuais de corrosão na parte superior das paredes internas do reservatório (Figura 13), que não recebeu tratamento impermeabilizante como ocorrido no restante do tanque. Então, fica evidente o ataque sofrido por vapores do efluente e oxigênio sobre a linha d'água e, por conseguinte, nota-se pontos de corrosão em armaduras, essencialmente de estribos nas vigas e pilares (M Engenharia S/S LTDA, 2018).

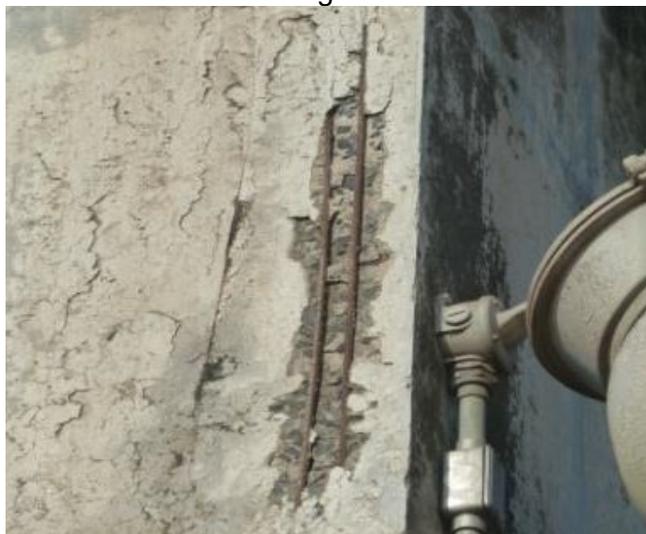
Figura 13 – Desgaste sobre linha d'água na parte interna do reservatório



Fonte: Laudo técnico M (2018)

Foi levantado um mapeamento das áreas com deslocamentos, fissuras e trincas, como essas mostradas na figura 14.

Figura 14 – Armadura da estrutura exposta evidenciando baixo cobrimento da armadura na região



Fonte: Laudo técnico M (2018)

A constatação do recobrimento, muitas vezes menor que 1 cm, da estrutura provou-se inadequado e em desacordo com o preconizado pela atual NBR 6118:2014, considerando-se o meio agressivo no qual a construção está inserida. A frequência da patologia também apontou falhas no controle de qualidade quanto à execução da obra.

Foi verificado um sulco (Figura 15) na parte interna de uma das torres, à aproximadamente 1 metro acima da laje horizontal e coincidente a uma emenda de fôrma e/ou junta de concretagem.

Figura 15 – Vista aproximada do sulco



Fonte: Laudo técnico M (2018)

Fica evidente, na figura 16 a umidade aflorada na parede externa da torre provocada pela percolação da água através do sulco da figura 16 e será nessa face e a da parede da torre análoga que, futuramente, será instalado o tratamento catódico.

Figura 16 – Umidade na face externa da parede causada pelo sulco



Fonte: Laudo técnico M (2018)

A figura 17 mostra a umidade aparente ao redor da tubulação PVC, somada a falta de impermeabilização da laje na parte superior e vedação apropriada, são fatores propulsores do processo corrosivo na armadura.

Figura 17 – Umidade ao redor dos furos para passagem de tubulação PVC



Fonte: Laudo técnico M (2018)

3.2.2 Ensaio de carbonatação

A carbonatação é um processo decrescente ocasionado pela hidratação progressiva do cimento e pelos produtos gerados pela própria reação (CaCO_3), que colmatam os poros superficiais do concreto, dificultando cada vez mais o contato com agentes deletérios CO_2 (o mais comum, do ar poluído) e de gases ácidos como SO_2 e H_2S (RODRIGUES, 2005 *apud* PAGE, C. L., SERGI. G., 2000).

A reação é descrita por:



Assim que precipitado o CaCO_3 , o pH do meio, em temperatura ambiente, cai para ordem de 9,4, interferindo, substancialmente, nas condições de estabilidade química da película passivadora. Então, foi proposto o intervalo limite de pH entre 11,5 e 11,8, abaixo do qual a película protetora do aço não é garantida (RODRIGUES *apud* (DERRIEN, F; et al., 1990).

Uma característica relevante ao processo em debate é a “frente de carbonatação”: uma zona claramente delimitada, de pH menor que 9 (carbonatação) que avança sobre o concreto ainda básico, com pH maior que 12 (não carbonatado). A comparação da espessura desta zona à do cobrimento da armadura é importante para que se evite a despassivação do aço (DERRIEN, F; et al., 1990).

O ensaio para carbonatação é simples e eficaz, comumente adotado para as estruturas em concreto. A matriz cimentícia carbonatada sofre queda do pH, transformando-se num meio ácido. Aplica-se sobre a área em análise uma solução incolor alcoólica de fenolftaleína, cujo contato com meio básico o faz mudar para a cor rosa (concreto não carbonatado) e com meio ácido permanece incolor (concreto carbonatado).

Foram encontradas profundidades médias de carbonatação em torno de 24 mm, como esta ilustrada na figura 18, excedendo ao valor de cobrimento de grande parte das armaduras existentes nos elementos estruturais.

Figura 18 – Ensaio de carbonatação na parede de concreto



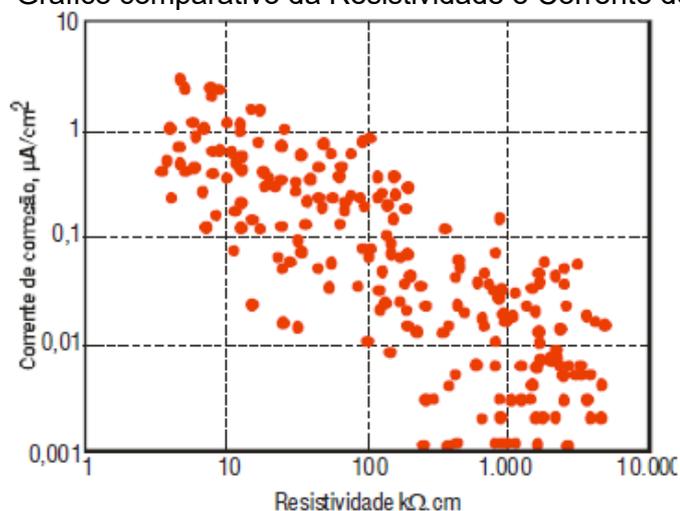
Fonte: Laudo técnico M (2018)

Conclui-se então, que parte majoritária da armadura da estrutura está exposta ao risco da corrosão, portanto demandam intervenções adequadas a fim de se precaver o agravamento dos danos à estrutura (Laudo técnico M, 2018).

3.2.3 Ensaio de resistividade elétrica

A resistividade iônica é um fator muito citado para a proteção catódica, pois ela norteia o processo de corrosão. Segundo a lei de ohm ($U = R.i$), resistência e corrente são grandezas inversamente proporcionais, por isso em meios com resistividade alta a condutividade é menor. A figura 19 traz o gráfico comparativo da resistividade do concreto e velocidade de corrosão (RODRIGUES, 2005, *apud* CHRISTOPHER, L.P.; SERGI, G., 2000).

Figura 19 – Gráfico comparativo da Resistividade e Corrente de corrosão



Fonte: Journal of performance of constructed facilities (1999)

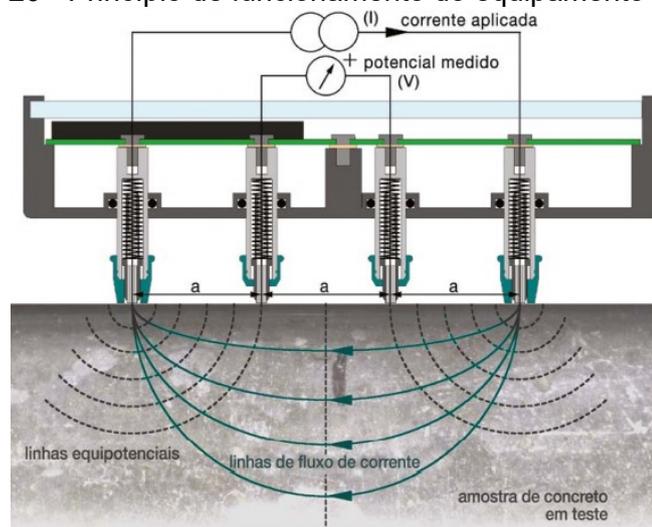
A resistividade do meio é um parâmetro essencial à função eletroquímica e está condicionado ao teor de umidade, permeabilidade e grau de ionização do eletrólito atuante no meio. Concretos com alto teor de umidade, oferecem baixa resistividade, podendo alcançar velocidades máximas de corrosão, sem que, no entanto, sature seus poros dificultando o acesso a oxigênio, essencial à redução do processo (RODRIGUES 2005, *apud* CHRISTOPHER, L.P.; SERGI, G., 2000).

Para altos teores de umidade, a massa cimentícia atua como o eletrólito da pilha galvânica. Do contrário, em dias ensolarados e o concreto seco, a resistividade elétrica aumenta e o fluxo da corrente corrosiva diminui nas armaduras (CHRISTOPHER, L.P.; SERGI, G., 2000).

O teste de resistividade foi feito com o equipamento *Resipod*, da marca suíça *Proceq*. É um aparelho de sonda *Wenner* de 4 pontos, não destrutivo, de grande acurácia. A figura 20 traz um esquema explicativo do princípio de medição do

equipamento: aplica-se uma corrente às sondas externas (I), enquanto as internas (V) medem a diferença de potencial (Proceq SA, 2017).

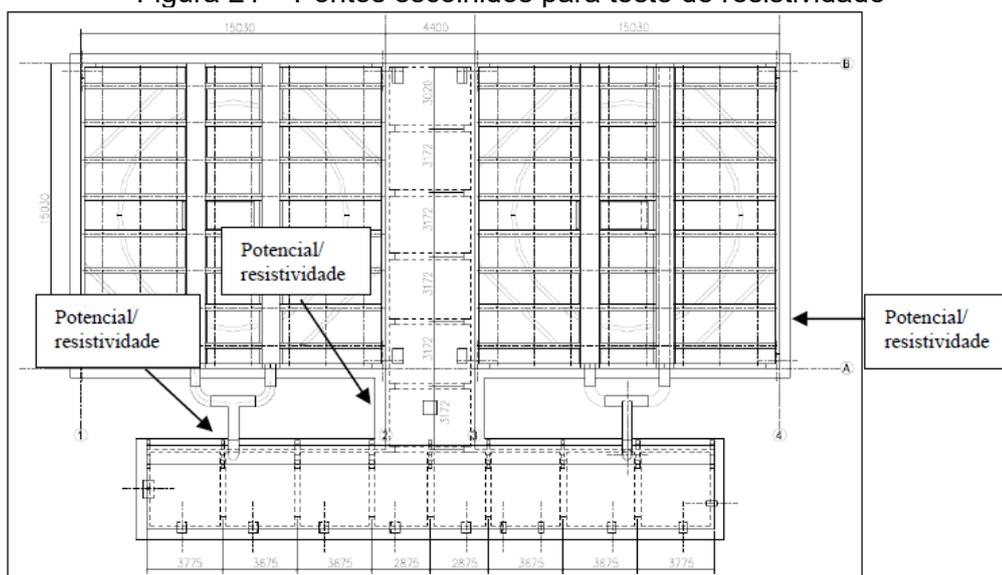
Figura 20 - Princípio de funcionamento do equipamento *Resipod*



Fonte: Proceq SA, (2017)

Foram determinados pontos estratégicos da estrutura, de maneira que melhor representassem as condições gerais das patologias existentes na instalação, conforme ilustrado na figura 21. A realização do ensaio em toda superfície da estrutura era desnecessária e inviável em muitos pontos.

Figura 21 – Pontos escolhidos para teste de resistividade



Fonte: Laudo técnico M (2018)

Os dados técnicos fornecidos pelo equipamento foram interpretados de acordo com os critérios estabelecidos pelo Comitê Euro-Internacional do Beton-CEB – CEB192 e a despassivação do aço foi medido de acordo com a tabela 4 do CEB12.

Tabela 4 - Relação entre resistividade e probabilidade de corrosão

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

Fonte: UHLIG'S, (2000)

O diagnóstico dado pelo laudo aos valores obtidos nas medições – valores estes não apresentados em documento, foi uma baixa tendência do concreto ao processo corrosivo segundo sua resistividade (M Engenharia S/S LTDA, 2018).

3.2.4 Ensaio de potencial de corrosão das armaduras

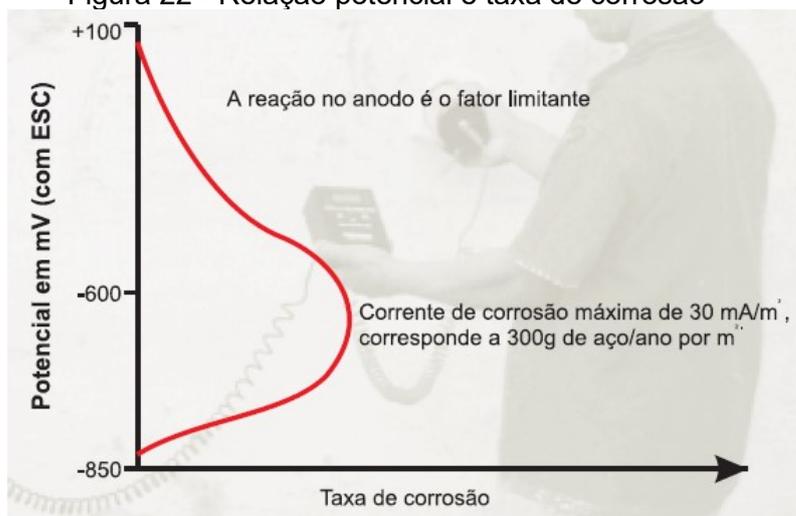
A movimentação dos íons deve-se, se não aos gradientes de concentração, a uma voltagem elétrica designada por um gradiente de potenciais entre anodo e catodo que promove a corrosão. É possível medir a voltagem elétrica existente através de um “eletrodo de referência” externo (semi-pilha), a fim de se mapear esta força potencial no concreto. O mais usual é o eletrodo de cobre sulfato de cobre (ESC), semi-pilha referência para as normas ASTM C876-91¹ e *British Standard 7361*² definirem os níveis de corrosão (MONGE, 2000).

O valor do potencial encontrado pela semi-pilha na superfície do concreto é influenciado por fatores externos como incidência solar, variação da temperatura e da umidade. A taxa de corrosão que ocorre no concreto armado ou protendido depende das reações no anodo. Isso implica na velocidade da reação: quanto mais negativo o potencial, mais rápida é a corrosão. O ápice do processo corrosivo acontece para um potencial de -600mV com o ESC, como justifica a Figura 22 (MONGE, 2000).

¹ Define concentração limite de concentração de íons cloreto entre 0,15-0,10% por peso de cimento.

² Define concentração limite de concentração de íons cloreto igual a 0,36 por peso de cimento.

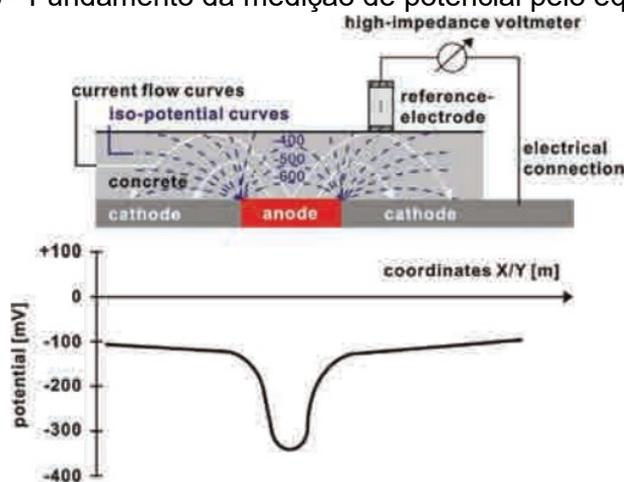
Figura 22 - Relação potencial e taxa de corrosão



Fonte: MONGE, 2000

O fator limitante no gráfico que faz com que o processo corrosivo zere novamente e o potencial fique ainda mais negativo é a falta de oxigênio. Ressalta-se, aí a ineficiência do método da semi-pilha para ocorrência de corrosão em avaliações feitas em concreto de alta qualidade, seco, ou mesmo outra qualidade sob intensa incidência solar no momento do exame. Pois os valores de potenciais encontrados serão altos ou positivos podendo mascarar a realidade do processo (MONGE, 2000). A leitura do potencial foi realizada pelo equipamento *Canin+*, da Proseq. Este aparelho contém um eletrodo de referência, composto por uma meia célula de cobre e sulfato de cobre (ESC), conectado por um voltímetro de alta impedância ($R = 10 \text{ M}\Omega$) à armadura, orientado por uma grade (sistema de eixos x e y) sobre a superfície do concreto, conforme ilustra a figura 23.

Figura 23 - Fundamento da medição de potencial pelo equipamento



Fonte: Proseq, (2009).

O ensaio foi realizado em locais considerados estratégicos e representativos. Foram medidos potenciais nas superfícies dos pilares do reservatório, paredes de elevação da torre e reservatório. Os valores potenciais encontrados no mapeamento foram relacionados à corrosão em acordo com os critérios propostos pela ASTM C-876, como na tabela 4.

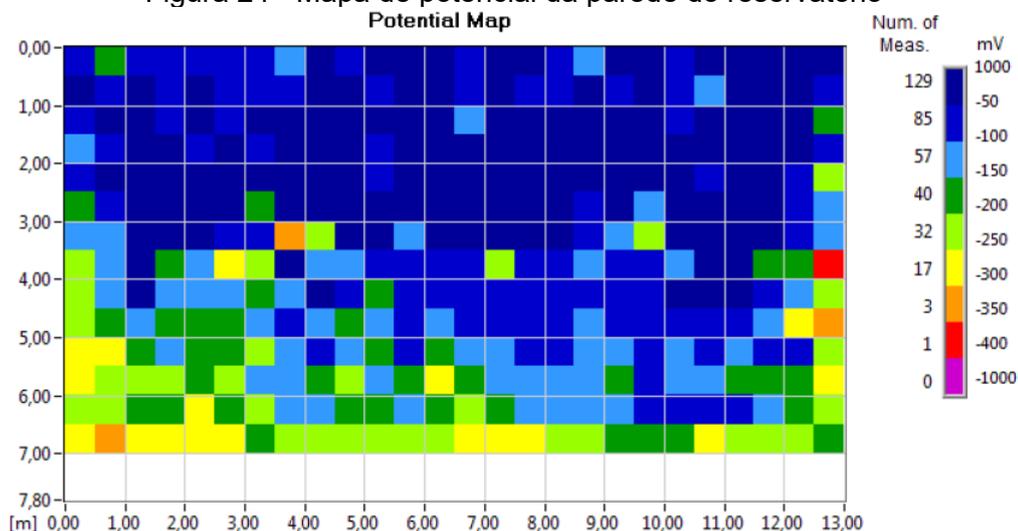
Tabela 5 - Valores de referência de potencial para corrosão

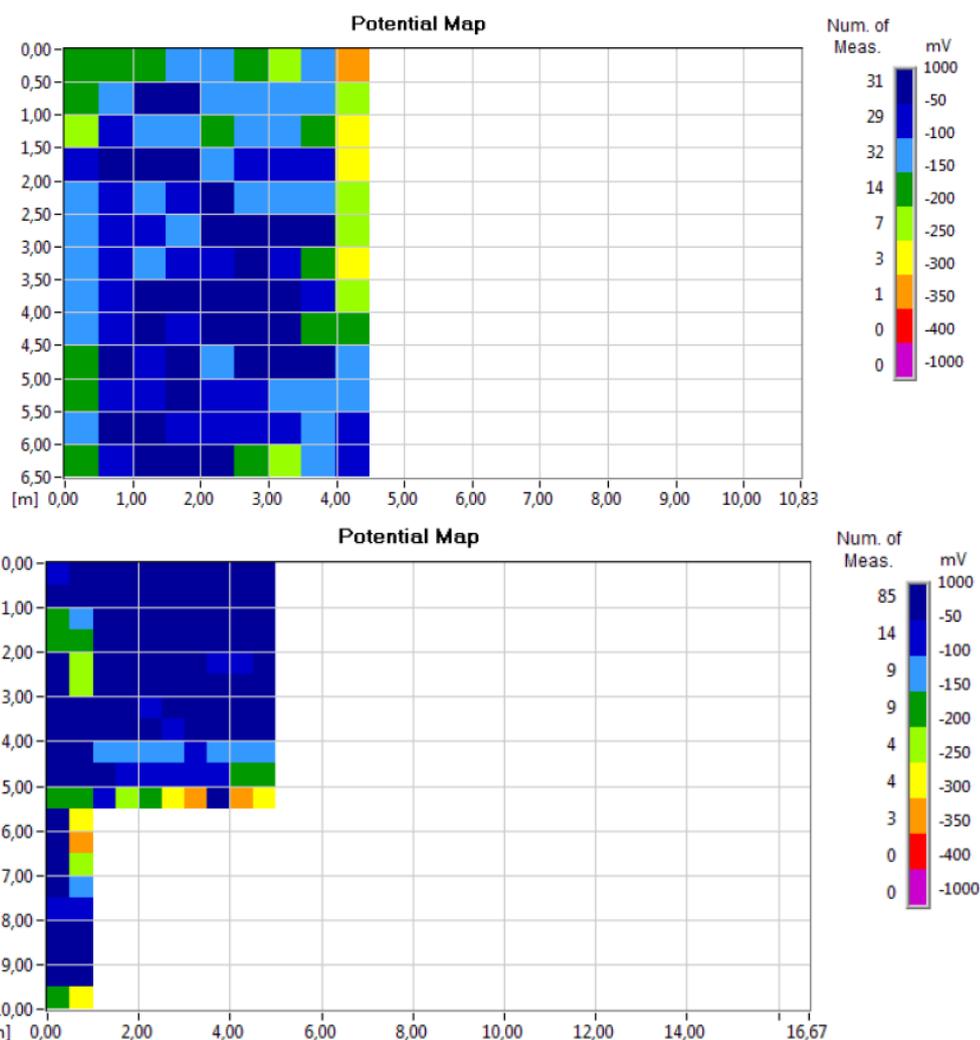
Medida do Potencial (mV/ECSC)	Probabilidade de Corrosão (%)
Maior que - 200	Menor que 10%
-200 à -350	Incerto
Menor que -350	Maior que 90%

Fonte: Laudo técnico M, 2018

Alguns dos mapas potenciais fornecidos pelo equipamento são como este da Figura 24, cuja função é diferenciar as áreas anódicas (zonas potencialmente em corrosão) e as demais áreas catódicas.

Figura 24 - Mapa de potencial da parede do reservatório





Fonte: Laudo técnico M (2018)

A comparação da leitura dos mapas (figura 24) e a tabela 4, permitiu análise de diversos pontos acima de -200 mV, portanto em condições incertas de corrosão (5 a 95%). Deixou claro, também a existência de áreas pontuais de corrosão que necessitam de medidas de controle específicas. Os mapas evidenciaram zonas delimitadas de corrosão nas paredes. A maioria destas áreas estão circunscritas a locais onde as armaduras apresentam-se com baixo recobrimento e áreas com deslocamentos de concreto.

3.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA CATÓDICO

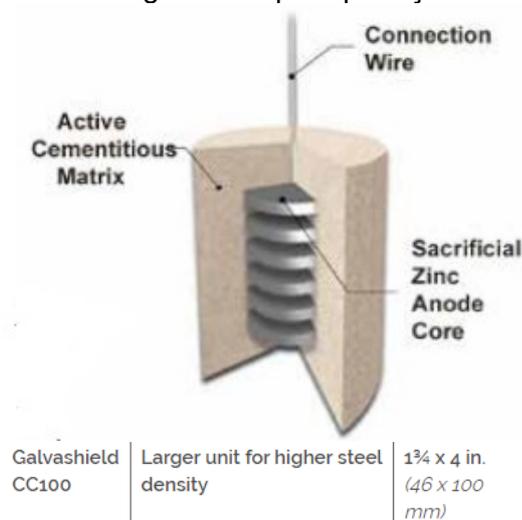
Dentre as duas vertentes do sistema de proteção catódica, julgou-se apropriado para este caso, a utilização do método por ânodos de sacrifício, essencialmente por se tratar de uma estrutura aérea. Após análise da perícia e

ensaios realizados, foi decidido que o sistema de proteção catódica seria implantado nos elementos estruturais de duas faces externas das torres de resfriamento. O laudo técnico M (2018) utilizou os seguintes parâmetros para o dimensionamento:

- corrente requerida para proteção das armaduras;
- capacidade total da corrente fornecida pelo ânodo durante sua vida útil.

Foram escolhidos os ânodos *Galvashield® CC100* da empresa *Vector Corrosion*, ilustrados na figura 25.

Figura 25 - Ânodo galvânico para proteção em concreto

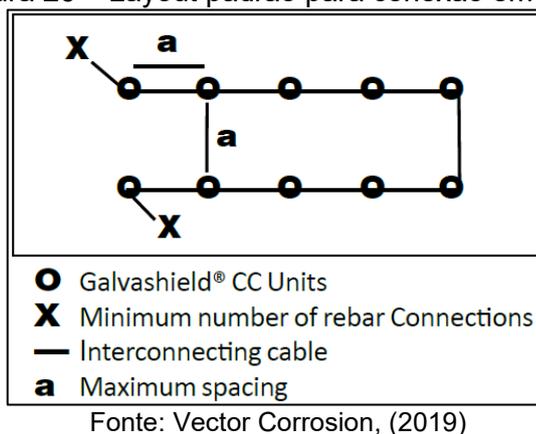


Fonte: Vector Corrosion, (2019)

O tamanho ou tipo do dispositivo varia com base na vida útil pretendida, que pode variar de 10 a 30 anos. O ânodo é composto por pastilhas de zinco envoltas por uma massa álcali ativada com pH em torno de 14 a fim de que se mantenha o metal em atividade anódica. Uma vez instalado, o zinco do ânodo corrói preferencialmente à barra adjacente, sendo ela protegida por controle de proteção galvânica (Vector Corrosion, 2015). A instalação da rede de ânodos gera uma corrente elétrica que possibilita a mitigação da atividade corrosiva em curso. Dada as análises promovidas perante aos ensaios e vistorias foi determinado a instalação do sistema de proteção catódica somente em uma das faces de cada torre de resfriamento.

Foram instalados 180 ânodos de sacrifício em elementos de pilares, em conforme a configuração preconizada pelo fabricante, indicado na figura 26.

Figura 26 – Layout padrão para conexão em série



É especificada uma distância máxima ('a') entre os ânodos Galvashield® ('O') e o número máximo de conexões ('X') a um mesmo fio "norteador", dimensionados de acordo com dados fornecidos por tabelas do fabricante.

3.4 PROCEDIMENTOS DE INSTALAÇÃO DOS ÂNODOS DE SACRIFÍCIO PARA PROTEÇÃO CATÓDICA EM UMA DAS TORRES

Um dos critérios envolvidos na escolha do produto a ser utilizado para a proteção catódica foi o preparo prévio do concreto necessário à aplicação do sistema. Os ânodos Galvashield® não requerem que o concreto seja escarificado para exposição da sua armadura em grandes extensões, por isso de sua seção transversal, dando agilidade e facilidade ao serviço.

A disposição dos ânodos foi elaborada conforme descrição do escopo, detalhada no Anexo A, com formato e área adequados à proteção da estrutura e garantia da durabilidade adequada ao tempo de manutenção periódica. O primeiro passo da instalação foi identificar a localização das barras de aço no concreto da parede a ser trabalhada através do aparelho *Profoscope*, da marca *Proceq*, como ilustra a Figura 27. Tal procedimento foi necessário para que os ânodos ficassem centralizados a, no mínimo, 100 mm de distância desta grade.

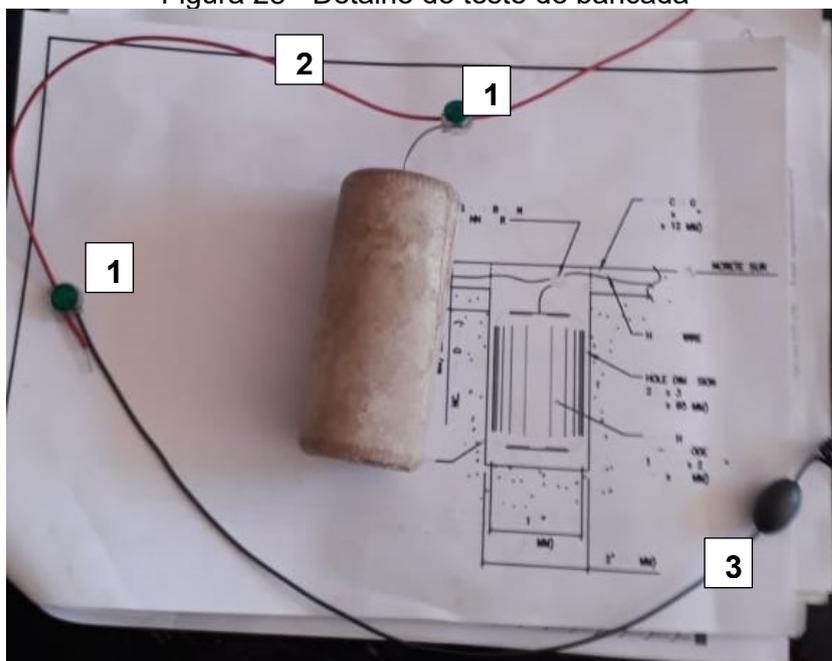
Figura 27 - Localização das armaduras através da leitura no equipamento Profoscope



Fonte: Autor (2019)

Foram realizados 69 furos de diâmetro 50 mm e profundidade 130 mm com serra copo diamantada, distribuídos igualmente em três séries paralelas, interconectadas por um vergão de 6 x 12 mm de profundidade. As figuras 28 e 29 retratam um teste de bancada realizado para melhor entendimento das conexões estabelecidas no equipamento:

Figura 28 - Detalhe do teste de bancada



Fonte: Laudo técnico M (2018)

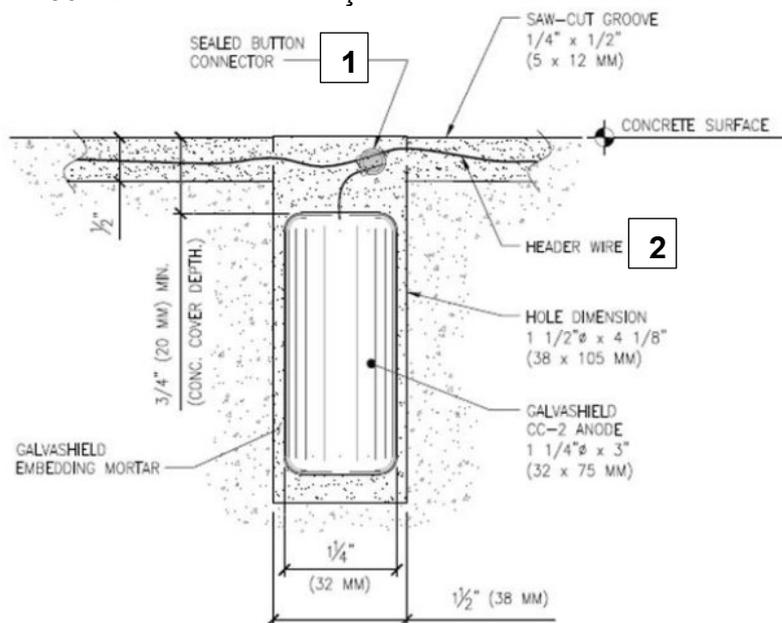
Figura 29 - Teste de bancada com conexão em série



Fonte: Laudo técnico M (2018)

Para a instalação dos ânodos no concreto, foi necessário submetê-los a um banho de água rasa dentro de um intervalo de 10 a 20 minutos. Após remoção do banho fez-se as conexões como mostra a figura 28, 29 e 30, nas quais trazem identificadas o “botão selador”, o “fio norteador” e o aro de conectividade direta à armadura nos quadrinhos 1, 2 e 3

Figura 30 - Detalhe da instalação da unidade do ânodo de sacrifício



Fonte: Vector Corrosion, (2019)

Conectou-se o cabo metálico da unidade do ânodo à extremidade do aro metálico de contato direto à armadura usando o conector também para interligá-los ao fio norteador. Após instalação e conexão de todos os anodos no sistema devidamente encaixados no concreto (figura 31) foi realizado o Teste de Continuidade

para verificação do fluxo de corrente elétrica em todo o circuito afim de garantir o funcionamento do sistema de proteção catódica.

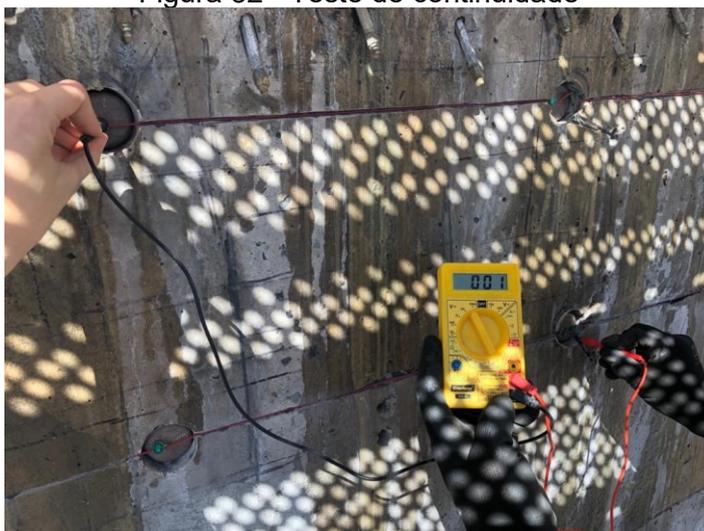
Figura 31 - Detalhe do sistema de proteção catódica instalado no concreto



Fonte: Autor (2019)

O procedimento foi realizado com o auxílio de um multímetro (figura 32), para medir a queda de voltagem em milivolts (mV) através do resistor (voltímetro). Foram conectados, repetidamente, os cabos do equipamento entre os fios que ligam o anodo à armadura. O valor absoluto da leitura multiplicado por 10 (porque o resistor é 0,1 ohm) fornece o fluxo da corrente do sistema em miliamperes (mA).

Figura 32 - Teste de continuidade



Fonte: Autor (2019)

O teste de continuidade executado foi positivo para o funcionamento do sistema.

Ainda com as unidades úmidas e com a superfície do concreto em estado saturado, foi dado o acabamento (Figura 33) ao sistema por meio da utilização da argamassa especial *Galvashield Embedding Mortar*.

Figura 33 - Acabamento do sistema com argamassa especial



Fonte: Autor (2019)

3.5 DISCUSSÃO DO CASO

A recuperação da estrutura em geral envolveu diversas técnicas e procedimentos extras à proteção catódica, uma vez dada a complexidade e diversidade patológica acometidas à construção. Restringindo-se ao tema deste trabalho – proteção catódica, tem-se três fases importantes à discussão: dimensionamento, execução e efetividade da técnica empreendida.

A respeito do dimensionamento do sistema catódico realizado pelo escritório de cálculo da empresa especialista contratada, notou-se o seguimento e conformidade dos ensaios retratados e os requeridos pelas normas afins e a escolha por ânodos de sacrifício de zinco, envoltos por matriz cimentícia.

A execução do método de proteção da armadura por ânodos de sacrifício seguiu as diretrizes do projeto e as recomendações fornecidas pelo fabricante. Foi observado a necessidade de mão de obra especialista, devido a algumas dificuldades enfrentadas decorrentes do pioneirismo da técnica por alguns operários.

Por fim, foi comprovado o funcionamento do sistema de proteção catódica através do Teste de continuidade elétrica entre os ânodos e as armaduras, então áreas catódicas por imposição do fluxo iônico da nova pilha galvânica de proteção. Porém, para atestar com maior acurácia a eficácia do método, faz-se necessário novos ensaios para potencial e corrosão nas armaduras em uma data futura.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A corrosão é uma das patologias de maior (se não, a de maior) impacto seja em frequência, volume e/ou gravidade que aflige todos os âmbitos da construção civil, portanto é imprescindível o conhecimento profundo de seu processo eletroquímico a fim de que se reúna novas tecnologias para combatê-la.

Um fator determinante à corrosão, e por isso à proteção catódica, é a influência do grau de agressividade do meio no qual está inserido a estrutura de concreto armado. Tais ambientes podem ser fatores desencadeadores de processos deletérios como a carbonatação e o ataque dos íons cloreto às estruturas responsáveis pela despassivação das armaduras. Logo, as medidas julgadas necessárias pela NBR 6118:2014 e tantas outras devem ser adotadas por precaução.

Tanto a bibliografia quanto o estudo de caso da torre de resfriamento comprovaram que a resistividade elétrica do concreto é requisito indispensável ao dimensionamento da proteção catódica, pois está diretamente relacionado ao fluxo dos elétrons no funcionamento da pilha galvânica da corrosão. Deste modo, os testes direcionados à resistividade do concreto são obrigatórios.

Outro destaque no trabalho foi dado ao estudo do gradiente de potencial, capaz de apontar áreas em provável atividade corrosiva (faixa potencial em destaque no do Diagrama de Pourbaix) quando medido nas armaduras do concreto. Importante também aos eletrodos de referência (semi-pilha), portanto essencial ao dimensionamento da proteção catódica.

As menções às normas internacionais na bibliografia e a utilização de alguns equipamentos e produtos estrangeiros, incluso os próprios ânodos de sacrifício, ratificaram a necessidade de maiores estudos e aproveitamento do serviço que o sistema de proteção catódica pode promover à construção civil nacional.

Nota-se também a importância de um meio eletrolítico ativo— argamassa enriquecida com substâncias químicas umectantes e alcalinas como a massa envoltória dos ânodos utilizados no estudo de caso, têm para o sistema, uma vez que tanto o destaque da revisão bibliográfica quanto o fabricante dos ânodos de sacrifício destacaram sua colaboração para o funcionamento e longevidade da atividade da proteção catódica galvânica.

Por fim, todas as características estudadas referentes ao empreendimento da proteção catódica em estruturas de concreto armado levam a crer na sua vantagem

quanto a manutenção e longevidade do sistema; já o caso prático provou a efetividade da técnica de proteção catódica quando atestado a continuidade elétrica do sistema, atestando a reversibilidade da corrente eletroquímica da corrosão para os ânodos de sacrifício.

5 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Esse trabalho versou sobre o estudo das patologias apresentadas nas paredes de concreto da torre de resfriamento da fábrica de ácido cítrico, das possíveis formas de tratamento delas e a execução da alternativa selecionada. Porém, seria interessante a realização de novos estudos, em datas futuras distintas, para que se verifique e comprove a eficiência da solução adotada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BEAMISH, S; EL-BELBOL, S. **Appraisal of corrosion-damaged structures**. In: CHESSE, Paul (Ed.). *Cathodic protection of steel in concrete*. London: E & FN Spon, p. 18-36, 1998.

BROOMFIELD, J. International development and growth. In: **Seminar on cathodic Protection of Reinforced Concrete Structures**, London, 1994.

DERRIEN, F. *et al.* Cathodic Polarization Behavior of Steel in Solutions Simulating Concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 20, n.4, 9. 634-43, 1990.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4ª edição. Editora LTC, 2003.

GLASS, G. K.; BUENFIELD, N. R. **Corrosion Science**. Department of Civil Engineering, Imperial College, London – U.K., vol. 39, pp 1001, 1997.

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

M ENGENHARIA S/S LTDA. **Laudo técnico e procedimentos de recuperação para torres de resfriamento e reservatório**. Uberlândia-MG, 2018.

MATTEDI, V. A. **Proteção Catódica em Estruturas de Concreto Armado e Protendido**. Tese (Mestrado em Ciências) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação, Engenharia Metalúrgica e de Materiais - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1999.

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

NORMA NACE International RP0290-90 – Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures

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

PAGE, C. L.; SERGI, G. Developments in Cathodic Protection Applied to Reinforced Concrete. **Journal of material of civil engineering**, London, vol. 13, Issue 5, out. 2001.

PEDEFERRI, P. Cathodic protection and cathodic prevention. **Construction and Building Materials**, Oxford, vol. 10, n. 5, p. 391-402, 1996.

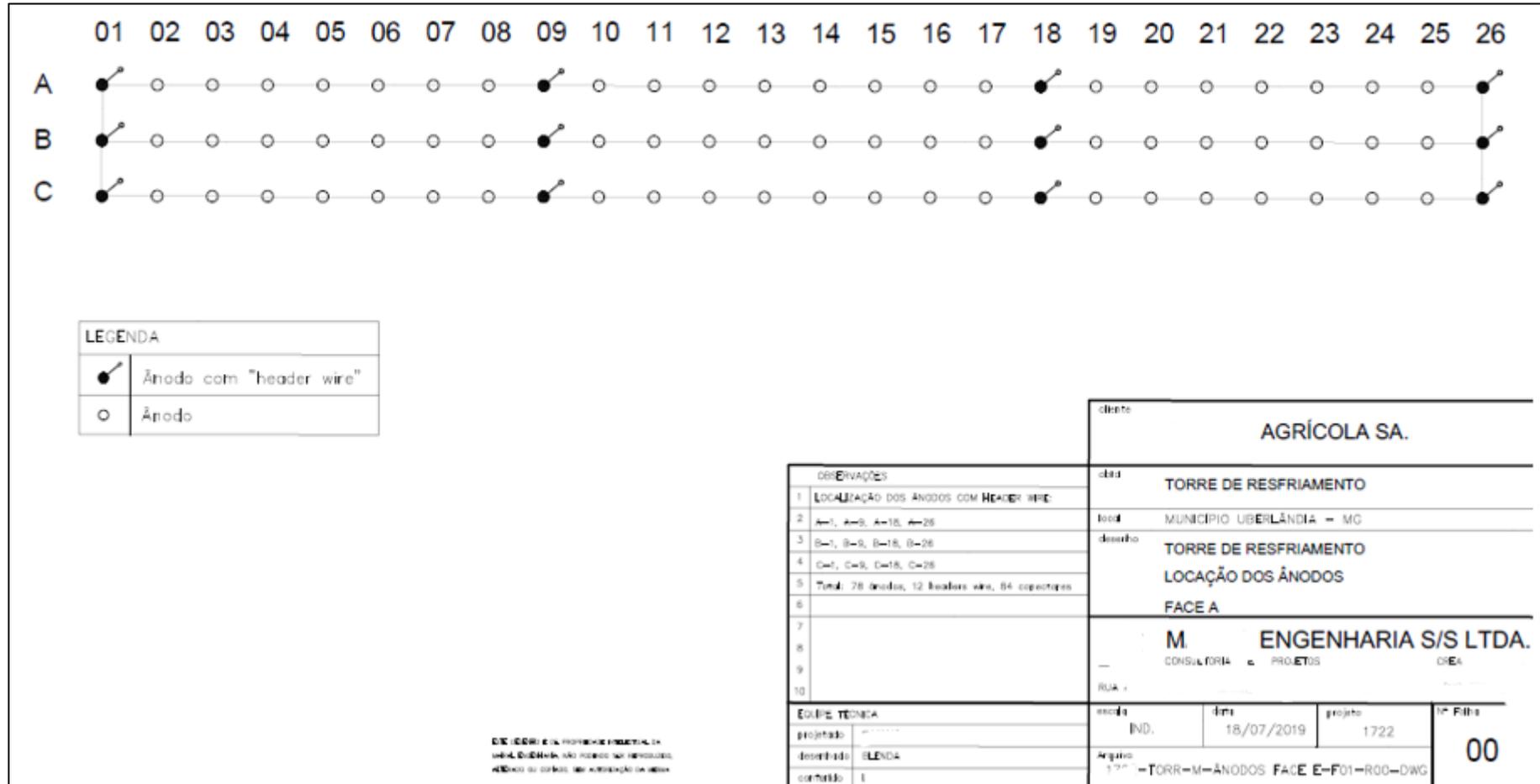
PROCEQ S.A. **Resipod Sales**. Disponível em: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Resipod_Sales%20Flyer_Portuguese_high.pdf. Acesso em 21 de fevereiro de 2020.

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

RODRIGUES, J. C. **Âodos de sacrifício para proteção catódica em estruturas de concreto armado**. 2005. 83 f. Tese (Mestrado em Ciências) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

VECTOR CORROSION. **Galvashield® CC**. Disponível em: <https://www.vector-corrosion.com/galvashield-cc>. Acesso em 21 de fevereiro de 2020

ANEXO A



Fonte: M Engenharia S/S LTDA, 2019