CAPÍTULO 6 · Parte I · Deterioração e ensaios
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/471ecm62
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/bxsjne92

PROJETO DE RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL COM PROTEÇÃO CATÓDICA EM PILARES DE UM SUBSOLO COM PRESENÇA DE LENÇOL FREÁTICO

Daniel Carvalho de Britto[1]*, Gelson de Sousa Alves[1]
* danielcbritto@hotmail.com

[1] Departamento de Estruturas, Universidade Federal do Piauí, Teresina, Brasil

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar uma solução de recuperação estrutural para elementos de concreto armado localizados em subsolo com lençol freático elevado, em ambiente classificado como Classe de Agressividade Ambiental IV, conforme a ABNT NBR 6118:2023. O estudo foi desenvolvido a partir de inspeção in loco e ensaios complementares, que identificaram deterioração do cobrimento, fissuração, destacamento e condições compatíveis com corrosão ativa das armaduras. Com base no diagnóstico, propôs-se uma intervenção composta por demolição controlada do concreto degradado, limpeza e recomposição/substituição localizada das armaduras e reconstituição do cobrimento com argamassa estrutural, associada à proteção catódica galvânica por ânodos de sacrifício conectados às armaduras. Para o dimensionamento do sistema, adotou-se área de aço de aproximadamente 70,59 m², densidade de corrente de 10 mA/m² e vida útil de 10 anos, resultando em massa anódica equivalente a aproximadamente 991 pastilhas de 100 g ou 1.652 unidades de 60 g. Os resultados demonstram que a solução integrada é tecnicamente adequada para condições de saturação permanente, contribuindo para a mitigação da corrosão residual, aumento da durabilidade e maior confiabilidade do reparo em estruturas submetidas a elevada agressividade ambiental. Recomenda-se, como desdobramento, o refinamento da distribuição dos ânodos por zonas de exposição, de modo a otimizar o desempenho do sistema e ampliar a vida útil da estrutura.

Palavras-chave: recuperação estrutural; corrosão; proteção catódica; ânodos de sacrifício; concreto armado.

ABSTRACT

This study aims to evaluate a structural rehabilitation solution for reinforced-concrete elements located in a basement subjected to a high groundwater table, in an environment classified as Environmental Aggressiveness Class IV according to ABNT NBR 6118:2023. The investigation was based on on-site inspection and complementary tests, which identified cover deterioration, cracking, spalling, and conditions compatible with active reinforcement corrosion. Based on the diagnosis, an intervention was proposed consisting of controlled removal of degraded concrete,

localized reinforcement cleaning and replacement/reconstitution, and cover rebuilding with structural repair mortar, combined with galvanic cathodic protection using sacrificial anodes electrically connected to the reinforcement. The cathodic protection design considered a steel surface area of approximately 70.59 m², a current density of 10 mA/m², and a 10-year service life, resulting in an anodic mass equivalent to approximately 991 units of 100 g or 1,652 units of 60 g anode pellets. The results indicate that the integrated solution is technically suitable for permanently saturated conditions, contributing to the mitigation of residual corrosion, improved durability, and greater reliability of the repair strategy in highly aggressive environments. As a further development, it is recommended that anode distribution be refined according to exposure zones in order to optimize system performance and extend structural service life.

Keywords: structural rehabilitation; corrosion; cathodic protection; sacrificial anodes; reinforced concrete.

1. OBJETO

Recuperação estrutural de elementos de concreto armado localizados em subsolo com presença de lençol freático constante, incluindo recomposição de seções deterioradas e implantação de sistema de proteção catódica por ânodos de sacrifício.

1.1 Local e Condições Gerais

A intervenção ocorre em estrutura de concreto armado (pilares) situada no subsolo, desativado desde a época da construção do condomínio residencial, ou seja, há 13 anos, conforme demonstrado na Figura 1, exposta à ação permanente de água subterrânea (lençol freático elevado), com pontos de nascente de água, identificadas durante os trabalhos de campo. O ambiente é classificado como classe de agressividade ambiental IV conforme NBR 6118:2023, com alto risco de corrosão das armaduras por presença de carbonatação.

Figura 1 – Local da realização dos estudos



Fonte: Autor/2025

1.2 Diagnóstico Prévio A inspeção e ensaios prévios identificaram:

O diagnóstico prévio foi estabelecido a partir de inspeção in loco e da execução de ensaios complementares, permitindo caracterizar o mecanismo de deterioração predominante e sua extensão. Observou-se fissuração e destacamento do cobrimento compatíveis com expansão de produtos de corrosão, indicando perda de aderência e comprometimento local da proteção física das armaduras. Constatou-se, ainda, perda de seção em barras longitudinais e transversais, evidenciando redução de capacidade resistente e potencial impacto na ductilidade e no desempenho em serviço dos elementos avaliados. As diligências também registraram umidade persistente, com infiltrações e presença contínua de eletrólito, condição crítica por favorecer o fechamento de circuito eletroquímico e acelerar as taxas de corrosão. Adicionalmente, os ensaios eletroquímicos realizados indicaram potenciais compatíveis com corrosão ativa, corroborando o diagnóstico de processo corrosivo em curso e justificando a adoção de medidas combinadas de reparo do cobrimento e mitigação eletroquímica (proteção catódica) para aumento da durabilidade.

2. ESCOPO DOS SERVIÇOS

O preparo da superfície foi conduzido por meio de demolição controlada do concreto deteriorado (vide Figura 2), assegurando a remoção integral de regiões desagregadas, com perda de coesão e/ou contaminadas, até atingir substrato íntegro e com resistência compatível para receber o reparo. Em seguida, procedeu-se à limpeza das armaduras, com remoção de produtos de corrosão por jateamento abrasivo ou escovação mecânica, até a obtenção de aço visualmente limpo, isento de carepas soltas e de material pulverulento, condição necessária para restabelecimento da aderência e para redução de células corrosivas localizadas. Após a exposição das barras, foi realizada inspeção dimensional para quantificação da perda de seção e definição da necessidade de substituição, complemento ou reforço das armaduras existentes, em conformidade com os requisitos de segurança e detalhamento executivo.

Figura 2 – Serviços de reabilitação



Fonte: Autor/2025

A recomposição de armaduras e do cobrimento contemplou a complementação de barras corroídas com aço CA-50 ou CA-60, mantendo-se diâmetros equivalentes e respeitando-se os comprimentos de ancoragem e critérios de transmissão de esforços previstos em projeto. As emendas foram executadas por ancoragem química, adotando-se procedimentos de perfuração, limpeza do furo e cura do adesivo estrutural segundo recomendações do fabricante, de modo a garantir desempenho mecânico, aderência e durabilidade. Concluída a reconstituição do arranjo de aço, realiza-se a recomposição da seção de concreto com argamassa estrutural de reparo, de alta resistência, retração controlada e compatibilidade físico-química com o concreto existente, assegurando cobrimento adequado, aderência ao substrato e restauração da geometria original do elemento.

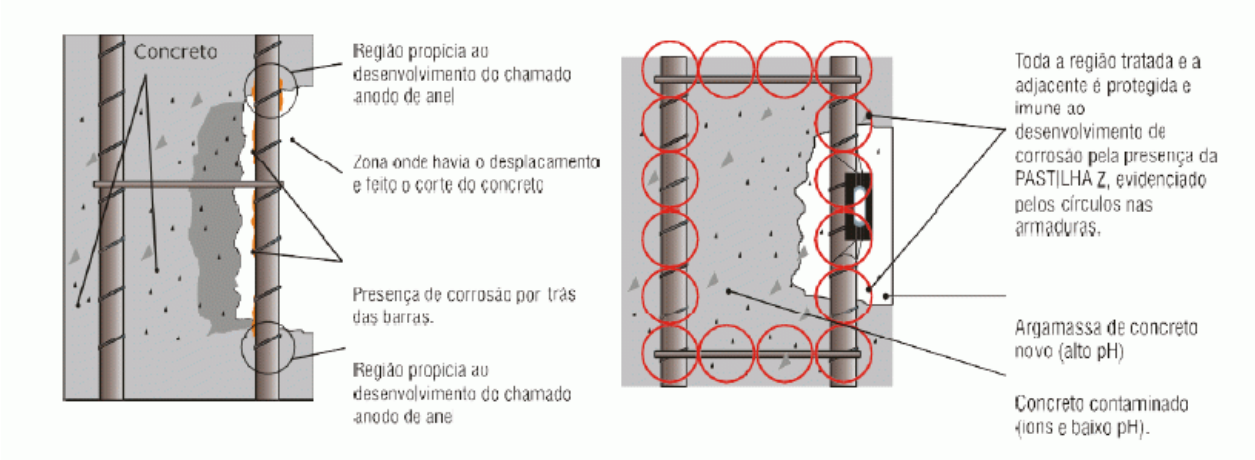
Como medida de incremento de durabilidade, foi implantada proteção catódica por ânodos galvânicos de sacrifício (vide Figura 3) e ilustração da Figura 4, com utilização de ânodos em liga de zinco ou alumínio adequados à aplicação em concreto armado sob elevada umidade/imersão. Os ânodos foram fixados junto às armaduras, garantindo continuidade elétrica, contato eficiente e baixa resistência de conexão, de modo a permitir a polarização catódica do aço. A distribuição foi definida por critérios de projeto para atendimento da área a proteger e manutenção de condições eletroquímicas de proteção, com referência aos parâmetros de desempenho e verificação estabelecidos em NACE SP0290 e ABNT NBR 13539. Após a instalação, foram executadas medições iniciais de potencial e verificações de campo para validação do funcionamento do sistema, servindo como linha de base para o plano de monitoramento.

Figura 3 – Aplicação de proteção catódica



Fonte: Autor/2025

Figura 4 – Sistema de proteção



Fonte: https://rogertec.com.br/

3. MATERIAIS PREVISTOS

3.1 Critérios De Execução E Controle

Os materiais e sistemas especificados para a intervenção compreendem argamassa de reparo estrutural classe R4, em conformidade com a ABNT NBR 16541, destinada à recomposição do cobrimento e restauração geométrica/funcional dos elementos, garantindo desempenho mecânico, aderência ao substrato e retração controlada. Para mitigação do processo corrosivo residual, adotam-se ânodos galvânicos de sacrifício à base de zinco e/ou alumínio, próprios para aplicação em concreto armado sob condição de elevada umidade/imersão, dimensionados para promover a polarização catódica das armaduras ao longo da vida útil prevista. A infraestrutura elétrica do sistema de proteção catódica inclui cabos e conectores em cobre estanhado, selecionados para assegurar baixa resistência de conexão, continuidade elétrica e maior resistência à corrosão em ambiente agressivo.

Quanto aos critérios de execução e controle, os serviços devem ser conduzidos em estrita observância às prescrições das normas ABNT NBR 6118 (projeto e requisitos de durabilidade), ABNT NBR 12655 (preparo, controle e recebimento de concretos/insumos aplicáveis), ABNT NBR 16541 (reparo estrutural com argamassas), ABNT NBR 13539 (proteção catódica) e NACE SP0290 (diretrizes e critérios para proteção catódica em estruturas), assegurando rastreabilidade técnica e compatibilidade entre materiais, procedimentos e condições de exposição. Como instrumento de verificação e evidência de conformidade, deve ser mantido registro fotográfico sistemático de todas as etapas críticas (demolição, preparo do substrato, tratamento/recomposição de armaduras, aplicação da argamassa, instalação e conexão dos ânodos, medições iniciais e acabamento), compondo o dossiê de qualidade e suportando o comissionamento e o plano de monitoramento.

No que se refere à segurança e meio ambiente, é obrigatória a implementação de isolamento físico e sinalização da área de trabalho, de modo a controlar acessos, reduzir interferências operacionais

e mitigar riscos a terceiros. Os resíduos gerados — incluindo concreto removido, resíduos metálicos, abrasivos e eventuais efluentes — devem ser segregados, acondicionados e destinados de forma ambientalmente adequada, conforme procedimentos internos e legislação aplicável, evitando contaminação do entorno e do sistema de drenagem. A execução deve prever, ainda, o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) compatíveis com os riscos da atividade, atendendo às exigências da NR-6 e NR-18, além de orientações específicas para trabalhos com demolição localizada, manuseio de produtos químicos (ancoragem) e operações de escovação.

4. MEMORIAL DE CÁLCULO

4.1 Conversão de densidade de corrente

$$I_{req}(A) = \frac{j(mA/m^2)x\ A_s(m^2)}{1000} \quad (1)$$

Onde:

I_{req}(A): corrente requerida de proteção (corrente total necessária para polarizar/proteger o aço).
j(mA/m²): densidade de corrente de projeto (corrente por unidade de área de aço a proteger).

A_s(m²): área superficial de aço/armadura considerada no dimensionamento (área "molhada/ativa" exposta ao eletrólito).

1000: fator de conversão de mA → A (pois $1\ A = 1000\ mA$).

4.2 Carga total necessária (Ah) ao longo do tempo de projeto ttt (horas)

$$Q(Ah) = I_{req}(A)\ x\ t(h) \quad (2)$$

Onde:

Q(Ah)= carga elétrica total requerida no período de projeto (Ampère-hora).

I_{req}(A) =corrente requerida (definida na Eq. 1).

t(h)= tempo de projeto, em horas (vida útil considerada convertida para horas).

4.3 Massa de ânodo necessária (kg) usando capacidade específica CCC (Ah/kg) e fator de utilização uuu

$$Q(Ah) = I_{req}(A)\ x\ t(h) \tag{3}$$

Onde:

(kg)= massa de ânodo necessária para fornecer a carga Qdurante o tempo de projeto.

Q(Ah)= carga total requerida (Eq. 2).

C(Ah/kg) = capacidade específica do material anódico (quantidade de carga que 1 kg do ânodo consegue fornecer, conforme material/fornecedor/condição).

u(adimensional) =fator de utilização (fração efetivamente "aproveitável" da massa anódica; considera perdas e massa que não se consome de forma útil).

4.4 Nº de pastilhas

$$N = \frac{m_{total}{}'}{m_{unitária}} \tag{4}$$

Onde:

de pastilhas =quantidade total de unidades (pastilhas) necessárias.

m_{total}(kg ou g) = massa total de ânodo calculada (resultado da Eq. 3, convertida para a unidade usada na pastilha).

$m_{unitária}$(kg ou g) = massa de uma pastilha (massa por unidade do ânodo comercial).

4.5 Premissas adotadas

- A Adotado 8 barras por pilar onde você disse "6 a 8" —caso mais conservador (8 barras) para não subdimensionar, conforme anexo 01;
- B. Altura exposta = 0,70 m (padronizado);
- C. Corrente de proteção adotada (proposta): 10 mA/m² de superfície de aço (justificativa técnica abaixo).
- D. Material anódico escolhido para cálculo primário: Zinco (uso corrente em concreto); capacidade adotada 780 Ah/kg (valor típico de fabricantes/datas).
- E. Fator de utilização/eficiência total adotado = 0,8 (adotado) – 80%
- F. Vida útil projetada = 10 anos.

- G. Contato: direto com o aço.

4.6 Cálculo — passos e resultados

O cálculo de dimensionamento foi desenvolvido de forma sequencial, a partir da determinação da área superficial de aço a proteger em cada pilar e, posteriormente, da conversão dessa área em corrente requerida, carga total ao longo da vida útil e massa anódica necessária. Inicialmente, a área superficial de aço por pilar (A_p, em m²) foi estimada pela soma das áreas laterais das barras consideradas no trecho exposto, adotando-se a relação da equação 5 abaixo, em que N_{barras}corresponde ao número de barras por pilar, $d$ao diâmetro das barras e L_{exp}ao comprimento efetivamente exposto/atuante.

$$A_p = N_{barras} \cdot \pi \cdot d \cdot L_{exp} \quad (5)$$

Onde:

N_{barras} =corresponde ao número de barras por pilar,

d =ao diâmetro das barras

L_{exp} =ao comprimento efetivamente exposto/atuante.

Com a área total de aço definida (A_{total}), a corrente requerida do sistema foi obtida pela aplicação da densidade de corrente de projeto, segundo $I = j \cdot A_{total}$, resultando na corrente total necessária para promover a polarização catódica das armaduras.

Em seguida, a carga elétrica total ao longo da vida útil foi calculada por $Q\ (Ah) = I\ (A) \cdot t\ (h)$, considerando o tempo de projeto convertido para horas. Por fim, a massa de ânodo foi determinada a partir da capacidade específica do material anódico e do fator de utilização, utilizando a expressão $m = \frac{Q}{C \cdot u}$, na qual C representa a capacidade específica (Ah/kg) e uo coeficiente de aproveitamento efetivo da massa anódica.

Para a conversão de dados e adoção de constantes, foi considerada densidade de corrente de projeto $j = 10\ mA/m^2$, equivalente a $0{,}010\ A/m^2$. O período de 10 anos foi convertido para $t = 10 \times 365 \times 24 = 87.600\ h$. Adotou-se capacidade específica do zinco $C = 780\ Ah/kg$(valor de projeto utilizado no memorial), e fator de utilização $u = 0{,}8$, conforme premissa fornecida para representar perdas e massa não efetivamente consumida de forma útil ao longo da operação.

4.7 Entradas por tipo de pilar

Conforme verificação do projeto estrutural e conferências realizadas durante as diligências de campo que antecederam o dimensionamento, constatou-se que os elementos verticais avaliados apresentam três tipologias distintas de pilares, as quais foram organizadas em lotes para fins de quantificação, padronização do cálculo e definição do consumo anódico. A classificação foi estabelecida a partir do diâmetro das armaduras longitudinais e do comprimento efetivamente exposto no trecho de intervenção, mantidos constantes o número de barras por seção e a altura exposta considerada. Assim, definiram-se: Lote A, composto por 85 pilares com 8 barras longitudinais Ø12,5 mm e trecho exposto de 0,70 m; Lote B, com 35 pilares contendo 8 barras Ø20,0 mm e trecho exposto de 0,70 m; e Lote C, formado por 80 pilares com 8 barras Ø25,0 mm, igualmente com 0,70 m de exposição. Essa setorização permitiu consolidar o levantamento de armaduras e orientar o dimensionamento da área superficial de aço por tipologia, garantindo coerência entre o quantitativo de elementos, a área a proteger e o respectivo dimensionamento do sistema de proteção catódica por ânodos galvânicos, conforme Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Dimensionamento do sistema de proteção catódica

LOTE	$A_p(m^2)$	$A_{total}(m^2)$	$I_{req}(A)$	$Q(Ah)$	$m(kg)$
A	0,2199	20,8916	0,2089	18,301	29,33
B	0,3519	12,3150	0,1232	10,788	17,29
C	0,4398	37,3850	0,3738	32,749	52,48
TOTAL	-	70,5916	0,7059	-	99,10

Fonte: os autores.

A partir da Tabela 1, obtém-se para a área de aço exposta dos 3 lotes é de 70,5916 m², a corrente total requerida foi de 0,7059 A e a massa total de zinco necessária considerando o fator de utilização de 80 % e a vida útil projetada de 10 anos, obteve a massa de aproximadamente 99,1 kg, ou seja, utiliza-se 100 kg de acordo com o fabricante como descrito no Quadro 1.

Quadro 1 – Dimensões de acordo com o fabricante

Produtos	Dimensões da massa de ativação anódica (mm)	Massa da liga de zinco (g)
PASTILHA Z	25 x 80 x 80	60
PASTILHA ZX		100

Fonte: https://rogertec.com.br/

4.8 Observações técnicas e justificativas

Adotou-se densidade de corrente de projeto de 10 mA/m², referida à superfície de aço a proteger, em função das condições de exposição identificadas — lençol freático permanente, elevada disponibilidade de eletrólito e ambiente agressivo — que justificam a utilização de um parâmetro conservador para garantir polarização suficiente e estabilidade do potencial ao longo do tempo.

Embora a literatura técnica e a prática de mercado indiquem ampla variabilidade de valores (em intervenções preventivas podem ser adotadas frações de mA/m²; já em proteção catódica ativa, em

condição de risco moderado a elevado, são reportadas faixas típicas na ordem de 2 a 20 mA/m², a depender da resistividade do meio, nível de umidade, presença de cloretos, condição do aço e eficiência de instalação), a escolha de 10 mA/m² foi definida como um valor intermediário-conservador, coerente com o cenário de saturação e com a necessidade de robustez do sistema.

Ressalta-se que, caso a estratégia de otimização econômica seja priorizada, é tecnicamente possível reavaliar o dimensionamento com 5 mA/m², desde que suportado por critérios de desempenho e monitoramento, implicando redução proporcional do consumo anódico.

Quanto ao material anódico, adotou-se zinco por ser amplamente utilizado em aplicações associadas ao concreto armado, com disponibilidade comercial consolidada e comportamento conhecido, admitindo-se capacidade específica típica de aproximadamente 780 Ah/kg nas premissas de projeto. Alternativamente, o emprego de ligas à base de alumínio (Al-Zn-In) pode reduzir significativamente a massa total requerida, uma vez que tais ligas tendem a apresentar maior capacidade específica, podendo resultar, sob as mesmas premissas, em uma massa global da ordem de ~31 kg, com impacto direto em logística de transporte/manuseio, tempo de instalação e custo global do sistema.

Destaca-se que o dimensionamento fornece a massa total de material anódico. A conversão para número de pastilhas/unidades depende da massa unitária do modelo comercial adotado, uma vez que há ampla faixa de formatos e pesos disponíveis. Assim, o quantitativo final por unidade foi definido a partir do catálogo do fornecedor (por exemplo, pastilhas de 0,5 kg, 1,0 kg, 2,0 kg etc.), permitindo traduzir a massa calculada em número de peças e otimizar o plano de implantação por zonas.

Adicionalmente, a eficiência e o consumo real dos ânodos são influenciados por fatores executivos e ambientais, tais como qualidade do contato elétrico, resistência de conexão, revestimentos/encapsulamento, variações de umidade, temperatura e uniformidade de distribuição. No cálculo, foi adotado fator de utilização $u = 0{,}8$ conforme premissa fornecida, representando perdas e massa não efetivamente consumida de forma útil. Como prática de engenharia para elevar a confiabilidade, recomenda-se ainda a adoção de margem de reserva adicional (10–20%) sobre a massa calculada, sendo +10% uma escolha prudente para segurança operacional e incertezas de campo.

5. MEMÓRIA DE CÁLCULO — PASTILHAS

5.1 Premissas adotadas (confirmadas / escolhidas):

- Altura exposta das armaduras: 0,70 m
- Conservador: 8 barras por pilar (onde havia "6 a 8").
- Densidade de corrente adotada (proposta): 10 mA/m² = 0,010 A/m² (também mostro resultado para 5 mA/m²). Valores típicos em literatura/indústria variam entre 2–20 mA/m²; 10 mA/m² é uma escolha intermediária/conservadora para ambiente com lençol freático.
- Vida útil de projeto: 10 anos = 87.600 h.
- Contato: direto com aço • Fator de utilização (eficiência): u = 0,8
- Capacidades adotadas (fabricante / referência típica): Zinco = 780 Ah/kg; Alumínio (Al-Zn-In) ≈ 2.651 Ah/kg (valores típicos de fornecedores/tech sheets).

5.2 Cálculo da área superficial de aço (cada grupo)

Usada fórmula:

$$Apilar = Nbarras \cdot \pi \cdot d \cdot Lexp \quad (6)$$

Onde:

(m²)= área superficial total de aço (armadura) considerada **no pilar**, no trecho analisado.

N_{barras}**(adimensional)** = número de barras longitudinais do pilar consideradas no cálculo.

π: constante pi (≈ 3,1416).

d**(m)** = diâmetro da barra de aço (converter de mm para m antes de usar na fórmula).

L_{exp}**(m)** = comprimento/altura **exposta** (ou efetivamente atuante) da barra no trecho considerado.

DADOS:

• LOTE AA— 95 pilares; 8 barras Ø12,5 mm;

Apilar=0,21991 Área total = 20,8916 m².

• LOE B — 35 pilares; 8 barras Ø20,0 mm;

Apilar=0,35186 m² Área total = 12,3150 m².

• LOTE C — 85 pilares; 8 barras Ø25,0 mm;

Apilar=0,43982 m² Área total = 37,38495 m².

Área total de aço exposto (somando A+B+C): 70,59159 m².

5.3 Corrente requerida e carga

As Tabelas 1 e 2 sintetizam, respectivamente, a corrente/carga requerida e a massa de ânodos necessária para o sistema de proteção catódica, evidenciando que o cenário proposto com j = 10 mA/m² demanda 0,7059 A e 61.838 Ah, correspondendo a 99,10 kg de zinco ou 29,16 kg de alumínio, enquanto o cenário econômico com j = 5 mA/m² reduz esses valores para 0,3530 A, 30.919 Ah, 49,55 kg de zinco e 14,58 kg de alumínio.

Tabela 1 – Valores encontrados de corrente

Cenário	j (mA/m²)	I total (A)	Q total (Ah)
A (proposto)	10 mA/m² (0,010 A/m²)	**0,7059 A**	**61.838 Ah**
B (economia)	5 mA/m² (0,005 A/m²)	**0,3530 A**	**30.919 Ah**

Fonte: Autor/2025

5.4 Massa de ânodos requerida (zinco e alumínio)

Tabela 2 – Resumo de Massa requerida

Cenário	Massa Zn (kg)	Massa Al (kg)
j = 10 mA/m²	**99,10 kg**	**29,16 kg**
j = 5 mA/m²	**49,55 kg**	**14,58 kg**

Fonte: Autor/2025

A. Resultados — j = 10 mA/m²

Massa Zn = 99,10 kg → nº pastilhas Zn (arredondado para cima):

✓ 60 g (0,06 kg) → 1.652 unidades ✓ 100 g (0,10 kg) → 991 unidades

B. Resultados — j = 5 mA/m²

Resultados — j = 5 mA/m² • Massa Zn = 49,55 kg → (ex.: 1 kg → 50 un).

✓ 60 g (0,06 kg) → 826 unidades ✓ 100 g (0,10 kg) → 496 unidades

ADOTAR:

- LOTE A — 85 pilares; 8 barras Ø12.5 mm; exposto 0,70 m - até 04 unidades de 100 g
- LOTE B — 35 pilares; 8 barras Ø20.0 mm; exposto 0,70 m - até 04 unidades de 100 g
- LOTE C — 80 pilares; 8 barras Ø25.0 mm; exposto 0,70 m – até 04 unidades de 100 g

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A seleção do material anódico deve considerar desempenho eletroquímico, viabilidade executiva e compatibilidade com o meio. Ligas de alumínio do tipo Al-Zn-In tendem a apresentar maior

capacidade específica, permitindo redução significativa da massa total requerida e, consequentemente, ganhos logísticos (transporte, manuseio e tempo de instalação).

O zinco, por sua vez, possui uso consolidado em aplicações associadas ao concreto armado, sendo tecnicamente aceitável e amplamente empregado, desde que atendidas as premissas de projeto e os requisitos de instalação.

Ressalta-se que a massa anódica total não substitui o projeto de distribuição e implantação do sistema. A eficiência da proteção catódica galvânica depende da distribuição uniforme dos ânodos em torno dos pilares e ao longo das zonas a proteger, de modo a evitar regiões subprotegidas e garantir atendimento local de corrente.

Recomenda-se a definição de setorização por zonas, critérios de espaçamento/posicionamento, detalhamento das ligações elétricas (continuidade, baixa resistência e proteção mecânica das conexões) e a previsão de pontos de medição, incluindo eletrodos de referência, para comissionamento e verificações periódicas.

Para aumentar a robustez do sistema e absorver incertezas de campo, recomenda-se a adoção de reserva de massa anódica da ordem de 10% sobre o valor calculado, além de considerar, no detalhamento executivo, a acessibilidade para inspeção e substituição dos ânodos, uma vez que se trata de elementos consumíveis. Adicionalmente, deve ser instituído um plano de inspeção e monitoramento periódico, preferencialmente anual, com registro das condições de instalação, integridade de conexões e evolução dos parâmetros eletroquímicos, em virtude das condições em que os elementos estruturais se encontram, ou seja, a presença constante do lençol freático.

A validação no local constitui etapa obrigatória após a instalação. Devem ser realizadas medições de potencial eletroquímico por meio de eletrodos de referência apropriados (por exemplo, Ag/AgCl ou $Cu/CuSO_4$, conforme procedimento adotado) e avaliação da corrente por zona, a fim de confirmar a efetividade da polarização e o atendimento dos critérios de proteção estabelecidos em norma.

7. AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos se direcionam à Deus, meu eterno guardião, meu filho Davi, à Syalle minha paz diária e minha inspiração e à minha família sempre presente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM G109-21** – Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments. ASTM International, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM G1-03(2022)** – Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM International, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **- ISO 12696:2021** – Cathodic Protection of Steel in Concrete. International Organization for Standardization, 2021.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE SP0290-2007** – Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures. NACE International, 2007.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **- NACE SP0408-2018** – Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Buried or Submerged Concrete Structures. NACE International, 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE **ACI 222R-19** – Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. American Concrete Institute, 2019.

Pedeferri, P. – Cathodic Protection and Cathodic Prevention. **Construction and Building Materials**, Vol. 10, No. 5, 1996, pp. 391–402.

Broomfield, J.P. – **Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair.** 2nd Edition, Taylor & Francis, 2007.

HELENE, P. R. L.; Andrade, C. – **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado**. Pini, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. – **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4th Edition, McGraw-Hill, 2014.