CAPÍTULO 59 · Parte IV · Qualidade e normatização
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/ykfg5v18
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/9yhrbk88

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE ÂNODOS DE SACRIFÍCIO GALVÂNICOS PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Thales Agostinho[1]*; Hamilton Soares[2]; Thomas Carmona[3]; Tiago Carmona[4] e Antonio Carmona[5]
*Autor de contato: agostinho@carmona.eng.br

[1, 2, 3, 4 e 5]Carmona Soluções de Engenharia, São Paulo, Brasil

RESUMO

A corrosão de armaduras em ambientes agressivos com presença de íons cloreto representa uma das principais causas de deterioração em estruturas de concreto armado. A proteção catódica com ânodos de sacrifício galvânicos se destaca como uma técnica eficaz de proteção de estruturas de concreto, sendo sua vida útil diretamente ligada à densidade de corrente liberada ao longo da vida útil. O presente estudo apresenta uma análise comparativa entre três métodos de dimensionamento de ânodos de sacrifício: o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 17277 (2026), as recomendações da empresa *Vector Corrosion Technologies* (2024) e o método proposto por Carmona *et al.* (2015). A análise foi realizada a partir de três cenários de estruturas expostas a diferentes classes de agressividade ambiental e teores de cloretos, adotando parâmetros padronizados de área de reparo, quantidade de armadura e vida útil residual. Os resultados indicaram uma quantidade de ânodos excessivamente grande e fora da realidade pelo método da ABNT NBR 17277 (2026), sendo mais próximas pelos métodos Carmona *et al.* (2015) e Vector (2024), sendo que o método proposto em Carmona *et al.* é mais coerente com as classes de agressividade ambiental não estando vinculada unicamente ao teor de cloretos da estrutura em questão.
Palavras-chave: proteção catódica; ânodos de sacrifício galvânicos; densidade de corrente; vida útil residual; método de dimensionamento.

ABSTRACT

Reinforcement corrosion in aggressive environments with the presence of chloride ions represents one of the main causes of deterioration in reinforced concrete structures. Cathodic protection using galvanic sacrificial anodes stands out as an effective technique for protecting concrete structures, with its performance being directly related to the protection current density adopted in the design process. This study presents a comparative analysis of three sacrificial anode design methods: the procedure established by ABNT NBR 17277 (2026), the recommendations of Vector Corrosion Technologies (2024), and the method proposed by Carmona *et al.* (2015). The analysis was conducted based on three scenarios of structures exposed to different environmental aggressiveness classes and chloride contents, adopting standardized parameters for repair area, reinforcement area, and residual service life. The results indicated a significantly higher number of anodes when applying the ABNT NBR 17277 (2026) method, while the methods proposed by Carmona *et al.* (2015) and Vector (2024) produced estimates closer to practical expectations. The method proposed by Carmona et al. proved to be more consistent with environmental aggressiveness classes, as it is not based solely on the chloride content of the structure under consideration.
Keywords: cathodic protection; galvanic sacrificial anodes; current density; residual service life; design method.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, com o objetivo de prolongar a vida útil de estruturas de concreto e de recuperar estruturas com elevada contaminação por cloretos, como obras portuárias e determinadas estruturas industriais, diversas técnicas de prevenção e proteção contra a corrosão passaram a ganhar destaque na indústria da construção civil (HU *et al.*, 2022). Entre essas técnicas, destaca-se a proteção catódica, que consiste na conexão de um metal menos nobre à armadura da estrutura, promovendo a circulação de corrente galvânica e o consumo do metal menos nobre, denominado ânodo de sacrifício (Brousseau; Baldock, 1998).

Embora amplamente utilizada em setores como a indústria naval e em estruturas metálicas enterradas, a aplicação dessa técnica em estruturas de concreto armado ainda carece de estudos mais aprofundados. Sabe-se que o desempenho do sistema e os métodos de dimensionamento dependem diretamente da densidade de corrente liberada pelos ânodos, a qual, segundo Whitmore e Sergi (2021) e Ricker, Haixue e Nie (2023), é influenciada por fatores como o teor de cloretos, a umidade do concreto e do ambiente, a resistividade elétrica do concreto e as características dos ânodos utilizados.

No Brasil, um dos primeiros estudos sobre o tema foi conduzido por Carmona et al. (2015), que realizou o monitoramento da corrente liberada por ânodos ao longo de quatro anos, comparando esses valores com a perda efetiva de massa de ânodos removidos da estrutura. Além disso, estudos mais recentes por Carmona *et al.* (2025) têm proposto critérios de estimativa da vida útil e para o dimensionamento de ânodos de sacrifício, com base em dados de correntes liberadas em casos reais de estruturas utilizam-nas quais se utilizou esse sistema de proteção, teores de cloretos e as classes de agressividade ambiental da ABNT NBR 6118 (2026).

Adicionalmente, uma parcela significativa do conhecimento disponível sobre o dimensionamento de ânodos de sacrifício é oriunda de pesquisas conduzidas por fabricantes desses materiais, que resultam, em grande parte, em recomendações práticas de projeto, como as apresentadas pela *Vector Corrosion Technologies* (2024). Estudos como os de Chess e Broomfield (2013), bem como o trabalho de Gomes (2025), também discutem a densidade de corrente liberada pelos ânodos e sua aplicação em métodos de dimensionamento. Recentemente foi publicada a ABNT NBR 17277 (2026) que incluiu um critério de dimensionamento de sistemas de proteção catódica galvânica em estruturas de concreto. O método proposto não considera explicitamente o teor de cloretos para estruturas existentes e classifica a agressividade ambiental com base na ABNT NBR ISO 9223 (2024), norma voltada à corrosão atmosférica de metais e ligas.

Diante desse contexto, e considerando a influência das diferentes variáveis adotadas pelos diversos métodos de dimensionamento de ânodos de sacrifício, este trabalho propõe uma análise comparativa entre o método proposto por Carmona *et al.* (2025), o método da normalização brasileira e o indicado pela empresa *Vector*. O objetivo é avaliar sua aplicação no dimensionamento desses sistemas, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico e para o aprimoramento das práticas de projeto voltadas ao prolongamento da vida útil de estruturas de concreto expostas a ambientes agressivos, especialmente aqueles sujeitos ao ataque de cloretos nos quais a proteção catódica galvânica é indicada.

2. METODOLOGIA

Com o intuito de avaliar a influência de diferentes variáveis no dimensionamento de ânodos de sacrifício e, com isso, realizar uma comparação entre os três métodos abordados neste trabalho, foram escolhidos três cenários de exposição conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Cenários de projeto considerados.

Caso	Classe de agressividade ambiental (NBR 6118:2026)	Teor de cloretos (% sobre a massa de cimento)	Elemento	Armadura
1	CAA III	0,9	Parede armada	6 Ø12.5 c/20x20 cm
2	CAA IV	0,7		
3	CAA IV	1,5		

Fonte: Autores (2026).

A partir dessas considerações iniciais, foram padronizados, para todos os métodos de dimensionamento analisados, alguns parâmetros de referência. Adotou-se uma área de reparo de concreto com dimensões de 100 × 100 cm (1 m²), a área lateral de armadura calculada em 4.712 cm²/m², vida útil residual (VUR) de 20 anos e ânodos de zinco com massa de 60 g. As demais variáveis foram definidas de acordo com as premissas e procedimentos específicos propostos por cada método, os quais são apresentados nos itens a seguir.

2.1 Método proposto pela NBR 17277:2026

Como base na ABNT NBR 17277 (2026), para a proteção da área superficial da armadura na região de reparo e o dimensionamento de sistemas de proteção catódica por ânodos de sacrifício, é necessário considerar principalmente a densidade de corrente associada à condição do concreto e da armadura, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 -Valores práticos de densidade de corrente com base na ABNT NBR 17277

Densidade de corrente (μA/cm²)	Tipo de aplicação	Estruturas aéreas
0,2 a 0,7	Proteção catódica	Estruturas existentes, concreto seco e boa qualidade, alta espessura de cobrimento, presença de cloretos, armaduras com corrosão suave.
0,7 a 2,0	Proteção catódica	Estruturas existentes, concreto úmido e de baixa qualidade, espessura de cobrimento de intermediária a baixa, locais com temperatura ambiente elevada, presença de cloretos, armadura com corrosão acentuada.
Acima de 2,0	Proteção catódica	Estruturas existentes, concreto úmido, alta disponibilidade de oxigênio, altos teores de cloretos, baixa espessura de cobrimento, locais com temperatura ambiente mais elevada, corrosão severa nas armaduras, ambientes com níveis elevados de agressividade (C5 e CX da ABNT ISO 9223).

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 17277 (2026).

Buscou-se estabelecer uma correspondência entre as classes de agressividade ambiental da ABNT NBR 6118 (2026) e a classificação adotada no método baseado na ABNT NBR ISO 9223 (2024) para que fosse possível estabelecer as densidades de corrente para cada caso. Deve-se ressaltar que esta última norma se refere a ambientes associados à corrosão atmosférica de metais e ligas, não sendo diretamente aplicável a casos de corrosão em estruturas de concreto armado. O correto seria que a norma empregasse a classificação de agressividade ambiental da ABNT NBR 6118 específica para estruturas de concreto armado.

2.2 Método proposto *Vector Corrosion Technologies* (2024)

Para este método, as variáveis iniciais consideradas no dimensionamento de sistemas de proteção catódica com ânodos de sacrifício baseiam-se em critérios relacionados ao risco de corrosão e ao teor de cloretos presentes no concreto. A partir desses parâmetros, estabelece-se a adoção de um valor mínimo de densidade de corrente, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Critérios de projeto

Risco de corrosão	Teor de cloreto (% sobre a massa de cimento)	Densidade de corrente mínima de projeto* (μA/cm²)
Baixo a moderado	< 0,8	0,04
Alto	0,8 – 1,5	0,08
Extremamente alto	> 1,5	0,16

*Valores adotados conforme indicação do fabricante.

Fonte: Adaptado de *Vector Corrosion Technologies* (2024)

O método não leva em consideração a classificação da agressividade ambiental, simplesmente o teor de cloretos da estrutura existente.

2.3 Método proposto por Carmona *et al.* (2025)

Neste método, os valores de densidade de corrente foram definidos a partir das condições de exposição das estruturas de concreto, considerando a classe de agressividade ambiental estabelecida pela ABNT NBR 6118 (2026) e faixas de teor de cloretos existentes em estruturas analisadas. As classes de agressividade ambiental, as faixas de teores de cloretos e as densidades de corrosão consideradas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Densidades de corrente, conforme Carmona *et al.* (2025), para o caso de obras de reabilitação, em função da Classe de Agressividade Ambiental da ABNT NBR 6118, e contaminação do concreto por cloretos na profundidade da armadura.

Ambiente	Teor de cloretos na profundidade da armadura (% sobre a massa de cimento)	Densidade de corrente – ρ* (μA/cm²)
CAA III Temperatura e UR moderadas	< 0,8%	0,05
	entre 0,8% e 1,5%	0,1
	> 1,5%	0,2
CAA IV Temperatura e UR altas	< 0,8%	0,25
	Entre 0,8% e 1,5%	0,4
	> 1,5%	0,5

*Com aplicação de pintura/revestimento de proteção superficial

Fonte: Carmona *et al.* (2025)

A partir dos valores de densidade de corrente adotados, os seguintes passos foram adotados para realizar o dimensionamento de ânodos de sacrifício para proteção catódica:

$$i_r = \rho \, . A_1 \ (\mu A) \tag{1}$$

$$C_A = \frac{i_r \, . \, 10^{-6} \, . \, u}{n \, . \, F \, . \, k_e \, . \, k_u} \ (\frac{g}{ano}) \tag{2}$$

$$M_T = C_A \, . VUP \ (g) \tag{3}$$

$$M_T = C_A \, . VUR \ (g) \tag{4}$$

Onde:

i_r – Corrente representativa (μA);
ρ – Densidade de corrente, ver Tabela 4 ($\mu A/cm^2$);
A_l – Área lateral da armadura a ser protegida pelos ânodos (cm²);
C_A – Consumo de ânodo (g/ano);
u – Massa atômica do metal; para o zinco u = 65,39 (g/mol);
n – Valência do metal; para o zinco n = 2;
F – Constante de Faraday = 0,3060 . 10^{-2} ($anos \, . \, A/mol$);
k_e – Fator de eficiência = 0,9;
k_u – fator de utilização = 0,8;
VUP = Vida útil de projeto (anos);
VUR = Vida útil residual (anos);
M_T – Massa total de metal dos ânodos (g).

Com a quantidade de massa de ânodo identificada, para o cálculo do número e espaçamento dos ânodos foram adotados os seguintes passos:

$$N = \frac{M_T}{Mu}\ (\hat{a}nodos\ por\ m^2) \tag{5}$$

$$S = \sqrt{\frac{10000}{N}} \quad < \quad S_{máx} = 120\ .\ \sqrt{\frac{1}{10\ .\ \frac{A_l}{A_c}}} \quad < 60\ (cm) \tag{6}$$

Onde:

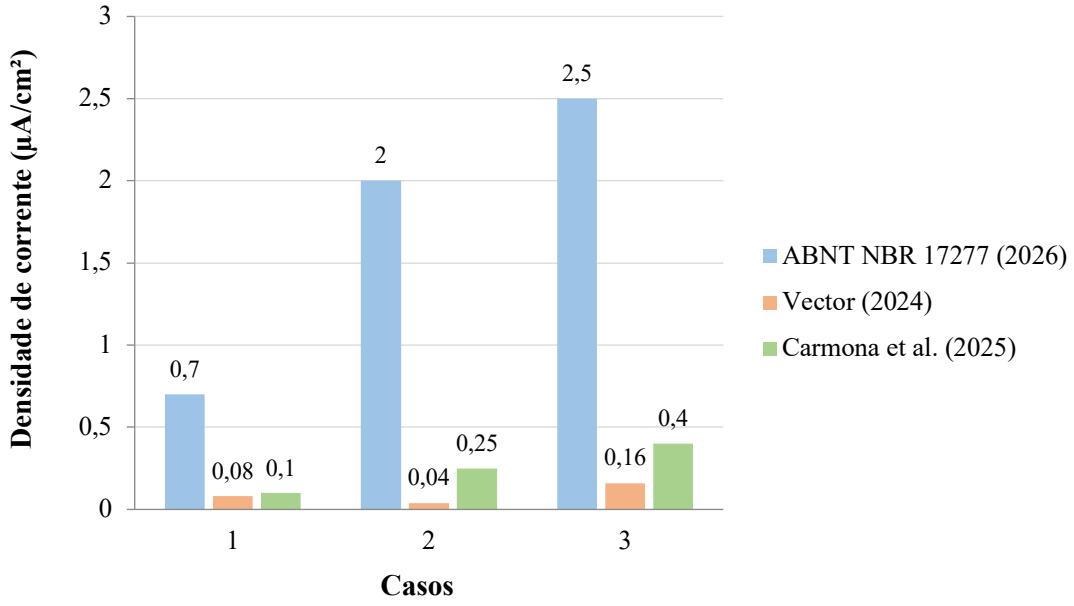
N – Número de ânodos (ânodos por m²);
M_T – Massa total de metal dos ânodos (g);
M_u– Massa de metal de um ânodo (g);
S – Espaçamento calculado dos ânodos (cm);
$S_{máx}$ – Espaçamento máximo dos ânodos < 60 (cm);
A_l – Área lateral da armadura a ser protegida pelos ânodos (cm^2/m^2);
A_c – Área de concreto em 1 m² = 100 . 100 = 10000 (cm²).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da metodologia adotada em cada abordagem, foram obtidos diferentes valores de densidade de corrente para os casos analisados. Para o método proposto pela ABNT NBR 17277 (2026), no Caso 1 (CAA III), adotou-se o menor valor da faixa de densidade de corrente recomendada (0,7 – 2,0 µA/cm²), correspondente a 0,7 µA/cm². Para o Caso 2 (CAA IV), foi considerado o valor de 2 µA/cm², enquanto, para o Caso 3 (CAA IV), adotou-se uma densidade de corrente de 2,5 µA/cm². No método proposto pela *Vector Corrosion Technologies* (2024), em função do teor de cloretos considerado em cada situação, foram obtidos os seguintes valores de densidade de corrente: para o Caso 1 (0,9%), 0,08 µA/cm²; para o Caso 2 (0,7%), 0,04 µA/cm²; e para o Caso 3 (1,5%), 0,16 µA/cm².

Por fim, com base no método proposto por Carmona *et al.* (2025), considerando-se a classe de agressividade ambiental e os teores de cloretos associados a cada caso, foram identificados os seguintes valores de densidade de corrente (µA/cm²): para o Caso 1 (CAA III e 0,9%), 0,1 µA/cm²; para o Caso 2 (CAA IV e 0,7%), 0,25 µA/cm²; e para o Caso 3 (CAA IV e 1,5%), 0,4 µA/cm². A Figura 1 reúne todos os valores de densidade de corrente e resultados para cada caso e método.

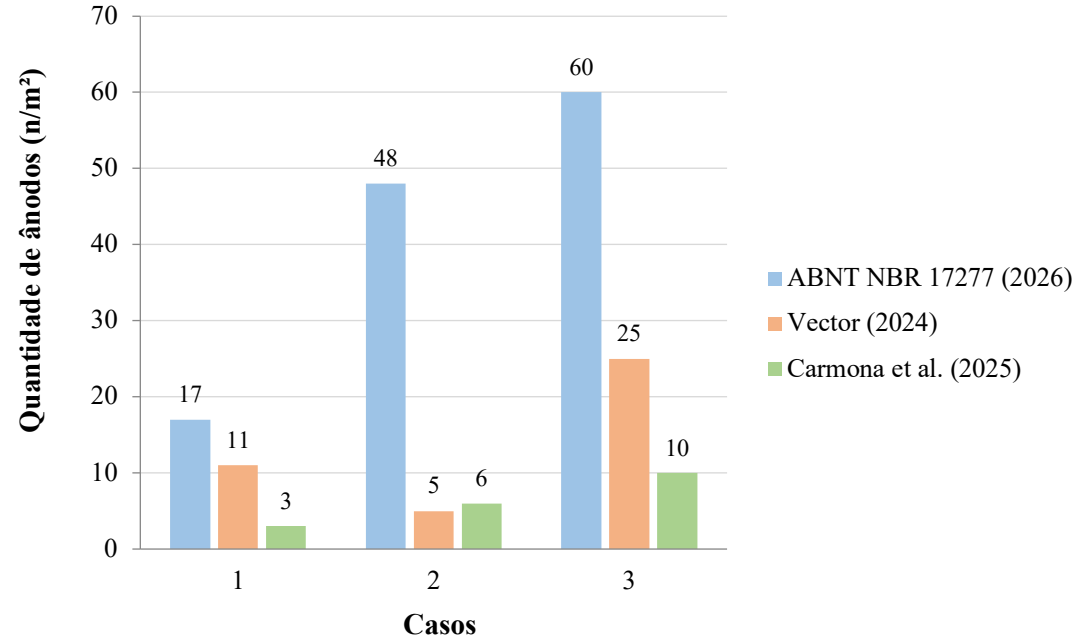
Figura 1 – Densidades de corrente obtidas para cada caso e método de dimensionamento de ânodos de sacrifício galvânicos



Fonte: Autores (2026)

Com base nos valores de densidade de corrente obtidos em cada método e nos parâmetros padronizados adotados para todas as abordagens – área de reparo, área superficial das armaduras, vida útil residual (VUR) e massa dos ânodos de zinco –, a quantidade de ânodos foi determinada seguindo as etapas estabelecidas em cada método de dimensionamento. A Figura 2 reúne as quantidades de ânodos calculadas por metro quadrado de região de reparo.

Figura 2 – Quantidade de ânodos (n/m²) obtida em cada método proposto



Fonte: Autores (2026)

A partir dos resultados obtidos, observa-se uma quantidade de 6 a 8 vezes mais metal de sacrifício por unidade de área (n/m²) estimada pelo método ABNT NBR 17277 (2026) em comparação com aquela determinada pelo método proposto por Carmona *et al.* (2025). Em comparação com o recomendado por *Vector Corrosion Technologies* (2024), os valores obtidos pelo método da ABNT NBR 17277 (2026) também resultam em quantidades de ânodos por m² superiores, sendo de 1,5 a 9 vezes maior.

Nota-se que a quantidade de metal de sacrifício pelo método recomendado por *Vector Corrosion Technologies* (2024) não acompanha o crescimento da agressividade e teor de cloretos conforme seria o esperado, os outros dois métodos NBR e Carmona seguiram um crescimento lógico da quantidade de metal de sacrifício em função da agressividade e teor de cloretos.

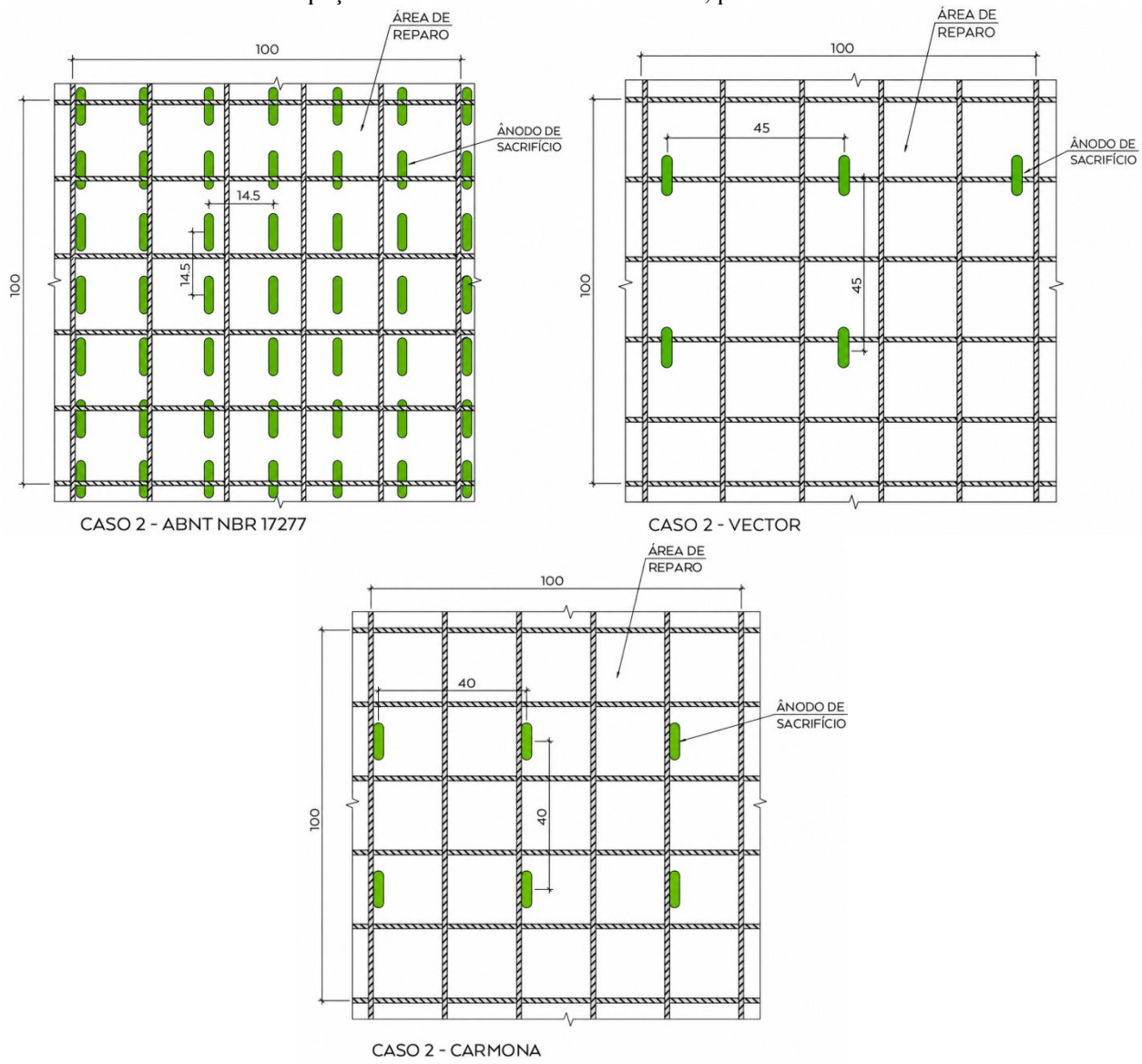
Por fim, com base na quantidade de ânodos de sacrifício obtida em cada método para os diferentes casos, a Tabela 5 apresenta o espaçamento entre os ânodos considerado de acordo com cada proposta de dimensionamento. Ademais, com o objetivo de exemplificar as diferenças de dimensionamento obtidas entre os métodos analisados, a Figura 3 ilustra a quantidade e o espaçamento entre os ânodos de sacrifício para o Caso 2.

Tabela 5 – Espaçamentos entre ânodos de sacrifício (cm)

Método	Casos		
	1	2	3
ABNT NBR 17277 (2026)	25x25	14,5x14,5	13x13
Vector Corrosion Technologies (2024)	30x30	45x45	20x20
Carmona; *et al.* (2025)	60x60	40x40	30x30

Fonte: Autores (2026)

Figura 3 – Comparação entre as diferentes propostas de dimensionamento, em relação à quantidade e espaçamento entre ânodos de sacrifício, para o caso 2



Fonte: Autores (2026)

4. CONCLUSÕES

A análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de ânodos de sacrifício demonstrou diferenças relevantes nos valores de densidade de corrente e, consequentemente, na quantidade de ânodos necessária por metro quadrado de reparo.

Observa-se que o método proposto pela ABNT NBR 17277 (2026) resulta em densidade de corrente excessivamente grande em relação às obtidas pelos demais métodos, o que implica uma maior quantidade de ânodos necessária por área de reparo. Esse resultado não está alinhado com as pesquisas existentes que demonstram que as densidades de corrente para ânodos galvânicos são substancialmente menores às indicadas na norma.

Por outro lado, o método proposto por *Vector Corrosion Technologies* (2024), apresenta valores de densidade de corrente coerentes aos obtidos em outras pesquisas da área, definidos em função

do teor de cloretos. Embora essa metodologia correlacione diretamente o teor de cloretos observado, não considera a classe de agressividade ambiental à qual a estrutura está exposta, fator que pode influenciar significativamente na velocidade de corrosão e, portanto, na densidade de corrente necessária para a proteção. Isso ocorre porque a densidade de corrente necessária para a proteção catódica está diretamente relacionada ao comportamento eletroquímico, sendo influenciada por parâmetros como resistividade elétrica do concreto, disponibilidade de oxigênio e concentração de íons cloreto na região da armadura.

O método proposto por Carmona *et al.* (2025) demonstra maior sensibilidade às condições reais de exposição das estruturas, considerando simultaneamente a classe de agressividade ambiental e o teor de cloretos na profundidade da armadura.

Dessa forma, observa-se que a aplicação do método da ABNT NBR 17277 (2026) resulta em quantidades significativamente superiores de metal de sacrifício por metro quadrado de reparo, podendo alcançar valores até cerca de 15 vezes maiores quando comparados aos métodos propostos por Carmona *et al.* (2025) e pela *Vector Corrosion Technologies* (2024).

De forma geral, os dois métodos Carmona *et al.* (2025) e *Vector Corrosion Technologies* (2024) se mostram adequados para o dimensionamento de sistemas de proteção reais, enquanto o método da ABNT NBR 17277 (2026) necessita de revisão, por resultar em quantidades excessivas de metal de sacrifício por metro quadrado de reparo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17277: **Proteção catódica de armaduras de aço-carbono em estruturas de concreto — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9223: **Corrosão de metais e ligas - Corrosividade de atmosferas - Classificação, determinação e estimativa**. Rio de Janeiro, 2024.

BROUSSEAU, R.; BALDOCK, B. **Laboratory Study of Sacrificial Anodes for Reinforced Concrete**. Corrosion, vol. 54, nº 03, 1 mar. 1998.

CARMONA, Antônio; CARMONA, Thomas; CARMONA, Tiago; AGOSTINHO, Thales. **Estimativa de vida útil de ânodos de sacrifício incorporados em reparos – revisão de casos de monitoramento em obras e proposta de critério de cálculo**. 9 out. 2025. DOI: https://doi.org/10.21041/CONPAT2025/V3RC43.

CARMONA ET AL. **Durabilidade de Ânodos de Sacrifício Incorporados em Reparo de Estacas de Concreto Armado em Zona de Variação de Maré**: CONPAT, Lisboa (Portugal), 2015.

CHESS, Paul M.; BROOMFIELD, John P. **Cathodic Protection of Steel in Concrete and Masonry, Second Edition**: CRC Press, 25 out. 2013. 262 p.

GOMES, Luiz Paulo. **Dimensionamento prático de anodos galvânicos para proteção catódica de armaduras de estruturas de concreto**. Brazilian Journal of Development, vol. 11, nº 8, p. e81496–e81496, 12 ago. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.34117/bjdv11n8-011.

HU, J. Y.; ZHANG, S. S.; CHEN, E.; LI, W. G. **A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete (RC) structures**. Construction and Building Materials, vol. 325, p. 126718, 28 mar. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126718.

RICKER, Ben; HAIXUE, Liao; NIE, Max. **Performance of Distributed Galvanic Anode Systems in Bridge Structures**. 19 mar. 2023. Disponível em: https://dx.doi.org/10.5006/C2023-19214.

WHITMORE, David; SERGI, George. **Long-term Monitoring Provides Data Required to Predict Performance and Perform Intelligent Design of Galvanic Corrosion Control Systems for Reinforced Concrete Structures**. 19 abr. 2021. Disponível em: https://dx.doi.org/10.5006/C2021-16712.