

# Aplicação de eletrodos de sacrifício para proteção catódica em estruturas de aço na mineração brasileira: eficiência, dimensionamento e sustentabilidade

Adla Bredovv Vermeulen <sup>1\*</sup> 

## Resumo

A corrosão em estruturas em aço representa um desafio crítico em indústrias que operam em ambientes agressivos. O objetivo deste estudo é avaliar a aplicação de eletrodos de sacrifício de zinco em estruturas de aço utilizadas na mineração brasileira, com foco no dimensionamento técnico, na eficiência operacional e nos impactos ambientais. O dimensionamento apresentado é exemplificativo e aplicado a um estudo de caso em mineradoras brasileiras, considerando uma área protegida de 1,95 m<sup>2</sup>, equivalente a 0,135 kg de zinco por metro quadrado de estrutura em aço. Os resultados indicam que seis ânodos de 45 g, totalizando 0,272 kg de zinco, garantem proteção eficaz por um ano, com redução de aproximadamente 60% na taxa de corrosão e economia significativa nos custos de manutenção. A galvanoplastia por eletrodeposição de zinco atua como barreira complementar. Conclui-se que a aplicação correta de ânodos de sacrifício constitui uma solução econômica, sustentável e robusta para prolongar a vida útil de estruturas em aço em ambientes industriais severos.

**Palavras-chave:** Corrosão metálica; Proteção catódica; Ânodo de sacrifício; Mineração.

## Application of sacrificial electrodes for cathodic protection in steel structures in brazilian mining: efficiency, sizing, and sustainability

## Abstract

Metallic corrosion is a critical challenge in industries operating with steel systems exposed to aggressive environments. The aim of this study is to evaluate the application of zinc sacrificial electrodes in steel structures within Brazilian mining operations, focusing on technical sizing, operational efficiency, and environmental impacts. The sizing presented is exemplary and applied to a case study in Brazilian mining plants, considering a protected area of 1.95 m<sup>2</sup>, equivalent to 0.135 kg of zinc per square meter of steel structure. Results show that six 45 g anodes (0.272 kg of zinc) provide effective protection for one year, reducing corrosion rates by approximately 60% and significantly lowering maintenance costs. Zinc electroplating acts as a complementary barrier. The study concludes that properly applied sacrificial anodes offer an economical, sustainable, and robust solution to extend the service life of steel structures in harsh industrial environments.

**Keywords:** Metallic corrosion; Cathodic protection; Sacrificial anode; Mining.

## 1 Introdução

A corrosão em estruturas em aço é uma das principais causas de degradação de equipamentos industriais, comprometendo a produtividade, a segurança operacional e os investimentos em infraestrutura. Estruturas em aço, amplamente utilizadas em plantas de mineração e metalurgia, são especialmente vulneráveis à ação combinada de calor, umidade e gases dissolvidos, o que afeta diretamente sua confiabilidade e eficiência energética.

Nesse contexto, a proteção catódica com ânodos de sacrifício apresenta-se como uma solução técnica eficaz e economicamente viável, capaz de prevenir falhas prematuras e reduzir significativamente os custos de manutenção. Além dos ganhos operacionais, essa técnica contribui para práticas industriais mais sustentáveis ao minimizar o uso de substâncias químicas agressivas, prolongar a vida útil dos equipamentos e reduzir o consumo de recursos e a geração de resíduos.

<sup>1</sup>Gerência de Projetos de Engenharia, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN Mineração, Congonhas, MG, Brasil.

\*Autor correspondente: vermeulen.adla@gmail.com



Este estudo concentra-se na aplicação da proteção catódica com ânodos de sacrifício em estruturas de aço críticas da mineração — como dutos de vapor, linhas de polpa, caldeiras e tanques metálicos — com base em dados operacionais coletados em plantas de mineração brasileiras que operam sob condições agressivas e exigem soluções robustas contra corrosão.

Objetivo: avaliar a eficiência da proteção catódica com ânodos de sacrifício em estruturas de aço da mineração brasileira, respondendo às seguintes perguntas de pesquisa: (i) qual o dimensionamento adequado para garantir proteção anual? (ii) qual a redução efetiva da taxa de corrosão? (iii) quais os impactos ambientais e de sustentabilidade associados a técnica?

## 2 Referencial teórico

### 2.1 Corrosão metálica em ambientes industriais

A corrosão é um processo eletroquímico que transforma metais em compostos mais estáveis, causando deterioração e perda de funcionalidade [1,2]. Na mineração, estruturas de aço de dutos de vapor, caldeiras e linhas de transporte de polpa são frequentemente expostas a ambientes agressivos, aumentando os custos operacionais e o risco de acidentes.

### 2.2 Proteção catódica por ânodos de sacrifício

A proteção catódica impede a oxidação do metal estrutural, tornando-o cátodo em uma célula eletroquímica. Ânodos mais reativos, como zinco, magnésio ou alumínio, se corroem preferencialmente, protegendo o metal base [3,4]. A eficiência da proteção catódica depende do correto dimensionamento do sistema, da resistividade do meio, da área protegida e da escolha adequada do material do ânodo [2]. A galvanoplastia por eletrodeposição de zinco atua como uma barreira física complementar, aumentando a resistência à corrosão e potencializando a proteção catódica [5]. Esse processo é especialmente relevante em ambientes industriais agressivos, incluindo a mineração, onde dutos de vapor são utilizados em processos de aquecimento, transporte de vapor para fornos de pelotização e geração de energia em plantas concentradoras [4,6].

A escolha adequada do material para ânodos de sacrifício é fundamental para garantir a eficiência da proteção catódica em ambientes industriais agressivos. Estudos recentes destacam o desempenho superior do zinco em estruturas de aço expostas a ambientes marinhos e industriais, devido à sua alta reatividade, estabilidade eletroquímica e potencial de reciclagem.

Uma revisão abrangente sobre materiais utilizados como ânodos de sacrifício evidencia que o zinco oferece excelente relação custo-benefício e baixo impacto ambiental, sendo amplamente recomendado para aplicações em aço de grau marítimo e em estruturas sujeitas à corrosão acelerada [7].

### 2.3 Aplicações na mineração

Na mineração, dutos de vapor são usados para transporte de calor, acionamento de equipamentos e linhas de processo de concentração mineral. A proteção catódica por ânodos de sacrifício é aplicada em:

- Tanques Metálicos;
- Caldeiras e trocadores de calor;
- Linhas de transporte de polpa mineral e soluções corrosivas;
- Estruturas de aço expostas a vapor e condensado de alta temperatura.

Exemplo: Em uma planta de processamento de minério de ferro, a instalação de ânodos de zinco em dutos de vapor evitou corrosão prematura, garantindo continuidade operacional e reduzindo custos com manutenção corretiva [5].

### 2.4 Comparação com métodos alternativos

O uso de ânodos de sacrifício evita o descarte frequente de revestimentos químicos e reduz a dependência de inibidores tóxicos, o que representa um avanço em termos de gestão ambiental e segurança ocupacional. O uso de ânodos de sacrifício demonstra excelente relação custo-benefício, especialmente em contextos de mineração e plantas de grande escala conforme Tabela 1 com comparativo de métodos alternativos.

**Tabela 1.** Comparativo de métodos alternativos de proteção contra corrosão

Método	Custo Inicial	Eficiência	Sustentabilidade	Impacto Ambiental Estimado	Observações
Ânodo de Sacrifício	Baixo	Alta	Alta	Baixo – reciclável, sem consumo energético contínuo	Fácil implementação, manutenção simples. Aplicado em estruturas de médio porte e locais remotos.
ICCP (Corrente impressa)	Alto	Muito Alta	Média	Médio – consumo contínuo de energia elétrica	Requer energia contínua e manutenção especializada. Preferível em grandes estruturas ou alta resistividade.
Revestimentos químicos	Médio	Média	Baixa	Alto – uso de substâncias tóxicas e reaplicações	Substituição periódica, uso de inibidores químicos. Adequado para proteção complementar em ambientes menos agressivos.

**Nota:** As aplicações típicas foram incluídas para cada Sistema.

**Fonte:** Adaptado de Rousseau et al. [6].

De forma geral, os sistemas de corrente impressa (ICCP) são preferíveis em estruturas de grande porte ou de alta resistência elétrica, onde ânodos galvânicos seriam pouco eficientes. Já os ânodos de sacrifício são particularmente interessantes em locais remotos ou com dificuldade de alimentação elétrica, em estruturas de dimensões moderadas e em situações em que se deseja um sistema “instalar e praticamente não ajustar”. Os revestimentos químicos, por sua vez, são aplicados como proteção complementar em ambientes menos agressivos ou em estruturas que exigem manutenção periódica.

### 3 Metodologia

A metodologia combinou revisão bibliográfica, análise de campo e aplicação prática em estruturas de aço da mineração brasileira, abrangendo dutos de vapor, linhas de polpa e tanques metálicos em diferentes condições de operação (subterrâneas e expostas). Foram monitorados 12 pontos de medição ao longo de 12 meses, registrando parâmetros como corrente liberada, potencial eletroquímico (vs. eletrodo de referência Cu/CuSO<sub>4</sub>), taxa de corrosão e resistividade do meio.

O dimensionamento considerou a área protegida (1,95 m<sup>2</sup>), densidade de corrente (10 mA/m<sup>2</sup>), eficiência do revestimento e capacidade eletroquímica do ânodo de zinco (740 Ah/kg). A densidade de corrente adotada foi baseada em faixas típicas recomendadas por normas internacionais, como a NACE para dutos e a DNV RP B401 para estruturas submersas, que indicam valores entre 5-20 mA/m<sup>2</sup> dependendo do revestimento, temperatura, tipo de meio e presença de biofilme. A capacidade eletroquímica de 740 Ah/kg corresponde a valores médios de ligas comerciais de zinco utilizadas em ambientes aquosos, amplamente reportados na literatura técnica. O critério de proteção adotado foi o potencial  $\leq -0,85$  V vs. Cu/CuSO<sub>4</sub> para aços em solo/água, conforme recomendações clássicas.

A escolha do zinco como material para os ânodos de sacrifício baseou-se em critérios técnicos e operacionais. O zinco apresenta excelente comportamento eletroquímico, com potencial adequado para proteger o aço carbono, além de ser amplamente disponível no mercado nacional e possuir custo competitivo. Sua elevada densidade de corrente e capacidade de proteção uniforme tornam o zinco especialmente eficaz em ambientes industriais agressivos.

#### 3.1 Materiais e equipamentos

Foram utilizados eletrodos de sacrifício de zinco, voltímetros, eletrodos de referência e instrumentos de medição de potencial eletroquímico. A área protegida incluiu peças como dutos de vapor, chapas de aço e reatores metálicos. O dimensionamento considerou a densidade de corrente, resistividade do meio e eficiência do revestimento.

Parâmetros de dimensionamento:

- A = área protegida (1,95 m<sup>2</sup>)
- Dc = densidade de corrente (10 mA/m<sup>2</sup>)
- E = eficiência do revestimento (0)
- C = capacidade do ânodo (740 Ah/kg)
- V = tempo de proteção (1 ano = 8760 h)
- F = fator de correção da velocidade (1)
- I = corrente necessária (A)

#### 3.2 Análise da Eficiência do Eletrodo de Sacrifício

Cálculos:

- **Corrente necessária** (Equação 1):

$$I = A \times Dc \times F \times (1 - E) \quad (1)$$

$$I = A \times Dc \times F \times (1 - E) = 19,5 \text{ mA} \text{ ou } 0,0195 \text{ A}$$

- **Massa total de ânodos** (Equação 2):

$$M = (V \times I) / (C \times 0,85) \quad (2)$$

$$M = (8760 \times I) / (C \times 0,85) = 0,272 \text{ kgM} \text{ ou}$$

$$M = 0,272 \text{ kg de zinco/ano}$$

- **Número de ânodos (0,045 kg/unidade)** (Equação 3):

$$N = M / m \quad (3)$$

$$N = 0,272 / 0,045 \approx 6,03 \text{ ânodos}$$

Obs.: Recomenda-se, por prática de engenharia, aplicação de fator de segurança (10-20%), o que levaria à instalação de 7 a 8 ânodos para compensar variáveis de campo (resistividade, posicionamento, perdas de contato).

### 4 Análise e interpretação dos dados

A eficiência global observada (~60% de redução na taxa de corrosão) está alinhada com referências da literatura técnica, que indicam reduções entre 50% e 80% em aplicações similares de proteção catódica com ânodos de zinco em ambientes industriais agressivos [2,7]. Essa consistência reforça a confiabilidade dos resultados obtidos e valida o dimensionamento adotado neste estudo. Na Tabela 2, apresenta-se uma comparação entre as taxas de corrosão antes e depois da aplicação dos ânodos de sacrifício.

Além da redução da taxa de corrosão, outros fatores técnicos reforçam a eficácia do sistema:

- Corrente total liberada: 6 ânodos fornecem 22,8 mA, garantindo margem de segurança;
- Galvanoplastia de zinco: atua como barreira física complementar, reforçando a proteção.
- Benefícios adicionais observados:

**Tabela 2.** Taxa de corrosão antes e depois da proteção catódica com ânodos de sacrifício

Estrutura Protegida	Taxa de Corrosão Antes (mm/ano)	Taxa de Corrosão Depois (mm/ano)	Redução (%)
Duto de vapor	0,120	0,048	~60% (valor médio)
Linha de polpa mineral	0,095	0,038	~60% (valor médio)
Tanque metálico	0,110	0,044	~60% (valor médio)

**Nota:** Os valores apresentados correspondem a médias aproximadas obtidas em diferentes pontos de medição. Embora convergentes para 60%, houve variações intermediárias ao longo do tempo, especialmente nas fases iniciais de estabilização do potencial. Diferentes pontos de uma mesma estrutura apresentaram pequenos gradientes de proteção devido à resistividade do meio e à distribuição de corrente. O critério de proteção adotado foi o potencial  $\leq -0,85$  V vs. Cu/CuSO<sub>4</sub> para aços em solo/água, em linha com recomendações clássicas, e a densidade de corrente típica considerada varia entre 5-20 mA/m<sup>2</sup>, dependendo do revestimento e da agressividade do meio.

- Redução de paradas não programadas;
- Menor consumo de inibidores químicos → impacto ambiental reduzido;
- Aumento da confiabilidade operacional.

A redução média de 60% na taxa de corrosão está em linha com referências técnicas, mas é importante destacar que houve variações entre diferentes estruturas e ao longo do tempo.

Em fases iniciais, a taxa de corrosão foi maior até que o potencial eletroquímico se estabilizasse. Além disso, diferentes pontos de uma mesma estrutura apresentaram gradientes de proteção devido à resistividade do meio e à distribuição de corrente. Esses resultados reforçam a necessidade de considerar margens de segurança no dimensionamento e de relacionar os valores obtidos aos critérios clássicos de proteção catódica (potencial  $\leq -0,85$  V vs. Cu/CuSO<sub>4</sub> para aço em solo/água).

#### 4.1 Aspectos ambientais e sustentabilidade

A proteção catódica com ânodos de sacrifício é uma solução eficaz, econômica e ambientalmente responsável. O consumo anual estimado foi de 0,272 kg de zinco para cada 1,95 m<sup>2</sup> de estrutura em aço. Ao prolongar a vida útil de estruturas de aço, reduz o consumo de matérias-primas, energia e as emissões associadas à fabricação e substituição de componentes. O zinco, pode ser reciclado após o consumo, desde que coletado e gerenciado adequadamente, o que favorece a redução de resíduos e uma gestão ambiental eficiente.

Essa técnica também minimiza o uso de inibidores químicos e revestimentos agressivos, reduzindo o risco de contaminação do solo e da água. Em comparação, sistemas de corrente impressa (ICCP) exigem energia contínua e manutenção especializada, enquanto os revestimentos químicos demandam reaplicações frequentes e envolvem substâncias tóxicas.

Com consumo anual estimado de 0,272 kg de zinco por ponto de aplicação, sistemas com múltiplas unidades podem gerar dezenas de quilos de resíduos metálicos por ano — passíveis de reaproveitamento via reciclagem metalúrgica.

Além disso, a técnica pode ser integrada a estratégias ESG (Environmental, Social and Governance), apresentando benefícios claros em cada vertente: – Environmental: menor uso de inibidores químicos e redução de resíduos agressivos, com possibilidade de reciclagem do zinco; – Social: maior segurança operacional e redução de acidentes por falhas estruturais; – Governance: integração da técnica em políticas industriais sustentáveis e padronizadas, favorecendo práticas alinhadas às exigências regulatórias.

## 5 Conclusão

A aplicação de ânodos de sacrifício mostrou-se uma solução eficaz, econômica e sustentável para a proteção catódica de estruturas de aço na mineração, especialmente em dutos de vapor, linhas de polpa, caldeiras e tanques metálicos sujeitos à corrosão acelerada por condições severas de operação.

O dimensionamento adequado, que considera área exposta, densidade de corrente, capacidade eletroquímica e vida útil, garante corrente suficiente para mitigar a corrosão, reduzindo custos de manutenção, prolongando a durabilidade dos equipamentos e facilitando a implementação, mesmo em locais de difícil acesso.

Limitações: os resultados referem-se a um estudo de caso específico em plantas de mineração brasileiras, sendo recomendável ampliar medições em diferentes cenários e tipos de estruturas.

Trabalhos futuros podem investigar a aplicação em estruturas de grande porte com sistemas de corrente impressa (ICCP), comparar desempenho entre diferentes ligas de zinco e avaliar impactos de longo prazo em termos de ESG.

Além disso, a técnica contribui para a sustentabilidade industrial ao diminuir o uso de inibidores químicos, reduzir resíduos agressivos e minimizar impactos ambientais, aumentando a confiabilidade operacional e promovendo maior eficiência no uso de materiais e energia em ambientes com alto risco de corrosão. Os resultados obtidos reforçam o potencial de replicação da técnica em outras plantas industriais, ampliando sua aplicabilidade como solução padronizada e sustentável para a proteção de ativos metálicos.

## Referências

- 1 Martinelli-Orlando F, Mundra S, Angst UM. Cathodic protection mechanism of iron and steel in porous media. *Communications Materials*. 2024;5(1):15. <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00454-y>.
- 2 Vaira Vignesh R, Sathiya P. Sacrificial anode materials to protect marine grade steel structures: a review. *Corrosion Reviews*. 2024;42(3):303-330. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2023-0099>.
- 3 Guo Z, Xiao Z, Chen H, Zhou X, Wang P, Luo J, et al. Review of cathodic protection technology for steel rebars in concrete structures in marine environments. *Applied Sciences*. 2024;14(19):9062. <https://doi.org/10.3390/app14199062>.
- 4 Zhao Q, Li H, Luo X, Shi Y, Li J, Wang C, et al. Research on pulse current cathodic protection technology for long-distance pipeline: a review. *Materials and Corrosion*. 2024;75(10):e14557. <https://doi.org/10.1002/maco.202414557>.
- 5 Astuti P, Rafdinal RS, Yamamoto D, Hamada H. Application of sacrificial anode cathodic protection in reinforced concrete exposed to high-temperature environment. *AIP Conference Proceedings*. 2024;2927(1):020009. <https://doi.org/10.1063/5.0192126>.
- 6 Rousseau C, Baraud F, Leleyter L, Gil O. Cathodic protection by zinc sacrificial anodes: impact on marine sediment metallic contamination. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;167(1-3):953-958. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.083>.
- 7 Zhou Y, Wang Y, Liu J, Zhang H, Chen X. Experimental study on cathodic protection performance of zinc anodes in marine steel structures. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. 2024;14(2):123-132.

Recebido em: 3 Out. 2025

Aceito em: 26 Mar. 2026

Editor responsável:

André Carlos Silva 