GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE E O AUMENTO NA VIDA ÚTIL DO AÇO EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUA EM EMPRESAS DE SANEAMENTO

Camile Paula Theodoro [(1)]
Engenheira de Materiais e Bacharel em Ciência e Tecnologia formada pela Universidade Federal do ABC. Há 9 anos atua como engenheira na área de qualidade, assistência técnica, desenvolvimento de produto e atualmente como líder de desenvolvimento de mercado na Nexa Resources, responsável pelos segmentos de galvanização geral e galvanização contínua.

Endereço: Av. Eng. Luís Carlos Berrini, 105 - 6º andar - São Paulo, SP - CEP 04571-010 – Brasil. Tel: +55 (11) 99734-7019 – e-mail: camile.theodoro@nexaresources.com

RESUMO

O aço, um dos materiais mais utilizados na indústria e construção civil, apresenta características intrínsecas que exigem um sistema de proteção contra corrosão de acordo com o local onde é exposto. A galvanização é a opção com menor custo, menor consumo de energia e menor impacto ao meio ambiente quando comparada à diversos esquemas de pintura ou outros tipos de revestimento para proteção de estruturas, principalmente por não requerer manutenções durante seu uso e o zinco do revestimento galvanizado ser 100% reciclado ao fim da vida. Ainda na construção civil, a galvanização por imersão a quente se destaca por conferir benefícios e aumentar a durabilidade do vergalhão de aço, utilizado no interior do concreto, minimizando os riscos de trincas, fissuras e perda de propriedades mecânicas causada pela corrosão.
Em estruturas de saneamento, como reservatórios de água, é comprovada a eficiência do vergalhão de aço galvanizado no interior do concreto para garantir a durabilidade e ausência de manutenções nas estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Galvanização, Durabilidade, Reservatórios.

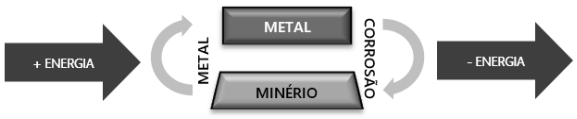
INTRODUÇÃO

A siderurgia é uma das principais indústrias do setor secundário, representando uma fonte de insumos para diversos segmentos, principalmente construção civil e infraestrutura. Em 2022, a produção mundial de aço bruto atingiu 1.885 milhões de toneladas, representando um aumento de 322 milhões de toneladas se comparado ao volume produzido há uma década (1.563 milhões de toneladas de aço bruto em 2012), sendo a China o produtor majoritário, representando 54% da produção mundial. [1]

Nos últimos 50 anos, a indústria siderúrgica vem investindo em pesquisas e tecnologias para criar tipos de aços avançados e de ultra-alta resistência, reduzindo consideravelmente o peso do aço em diversas aplicações. Além disso, o desenvolvimento de melhores sistemas de revestimento para proteção do aço contra a corrosão confere maior vida útil às estruturas, minimizando os gastos com manutenções. [2]

A corrosão pode ser definida como a tendência de os materiais retornarem ao seu estado natural, de menor energia e maior estabilidade (Figura 1). No caso dos metais, ou ligas metálicas como o aço, a partir do fornecimento de energia o minério de ferro é transformado em aço e, ao perder parte dessa energia, o aço tende a retornar ao seu estado de maior estabilidade (minério). Por ser um elemento termodinamicamente instável na presença de oxigênio, a presença de umidade eleva a agressividade do meio, acelerando o processo de corrosão.

Figura 1 – Corrosão dos metais



Estima-se que a corrosão represente um custo de aproximadamente 3,4% do PIB global, correspondendo a 30% da produção mundial de ferro e aço. As práticas de controle da corrosão, como a galvanização, a pintura e sistemas protetivos diversos podem gerar uma economia de 15 a 35% do custo da corrosão, aumentando a vida útil de peças e estruturas. [3]

A manutenção de estruturas ao longo da vida útil pode ser de difícil realização pelo seu acesso limitado, como ocorre em poços, galerias e reservatórios, ou mesmo devido ao ambiente em que estão instaladas, incluindo ambientes com constantes gases corrosivos. Portanto, é fundamental utilizar um sistema de proteção econômico, durável e livre de manutenções.

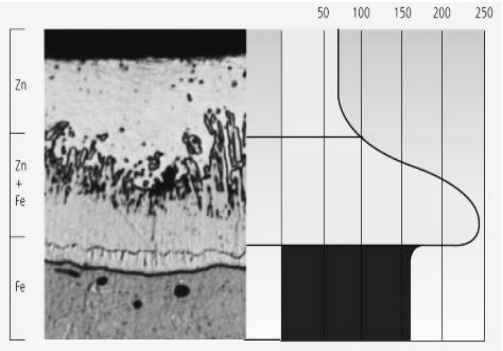
A galvanização é um sistema de proteção do aço contra a corrosão, com menor consumo de energia e menor impacto ao meio ambiente quando comparada à pintura para proteção de estruturas [4], principalmente por não requerer manutenções durante a vida útil da estrutura e o zinco do revestimento galvanizado ser 100% reciclado ao fim da vida. No processo de galvanização por imersão à quente, durante a imersão da peça ou estrutura de aço no banho de zinco fundido a aproximadamente 450ºC, são formadas camadas intermetálicas que isolam o substrato de aço, protegendo-o duplamente através da proteção por barreira e catódica. Na proteção por barreira, o zinco é difundido na rede cristalina do aço, formando camadas de zinco+ferro (Figura 2) que apresentam maior dureza se comparadas às camadas apenas de zinco ou ferro (Figura 3), e são responsáveis pela reação metalúrgica que garante a resistência à corrosão e evita o desplacamento das peças galvanizadas.

Figura 2: Camadas intermetálicas de zinco com variação na concentração de zinco e ferro até a camada superior composta 100% de zinco [5]



Fonte: Guia de Galvanização por Imersão a Quente – ICZ

Figura 3: Microssecção da camada galvanizada por imersão a quente, mostrando as variações de dureza do revestimento. [5]



Fonte: Guia de Galvanização por Imersão a Quente – ICZ

Na proteção catódica, o zinco atua como metal de sacrifício, pois devido ao potencial de redução menor que o potencial do ferro (mais eletronegativo), o zinco oxida-se preferencialmente ao aço protegendo-o contra corrosão. A dupla proteção conferida ao aço pelo processo de galvanização destaca-se quando comparada à outras tecnologias protetivas como a pintura, aumentando o ciclo de vida das estruturas e exigindo manutenções pouco frequentes ou nulas. [5]

O ciclo de vida das peças galvanizadas pode representar intervalos de até 35 anos sem a necessidade de manutenções e para garantir a durabilidade das estruturas é fundamental, além da determinação da espessura mínima de zinco requerida, conhecer o ambiente em que a estrutura estará exposta. O desempenho do aço galvanizado por imersão a quente exposto à atmosfera depende de cinco fatores principais: temperatura, umidade, precipitação, concentração de dióxido de enxofre (poluição) no ar e salinidade do ar. [4] A partir dessas informações, é possível estimar a vida útil do aço galvanizado conforme a Tabela 1 [7] e, de acordo com a figura 4 [6].

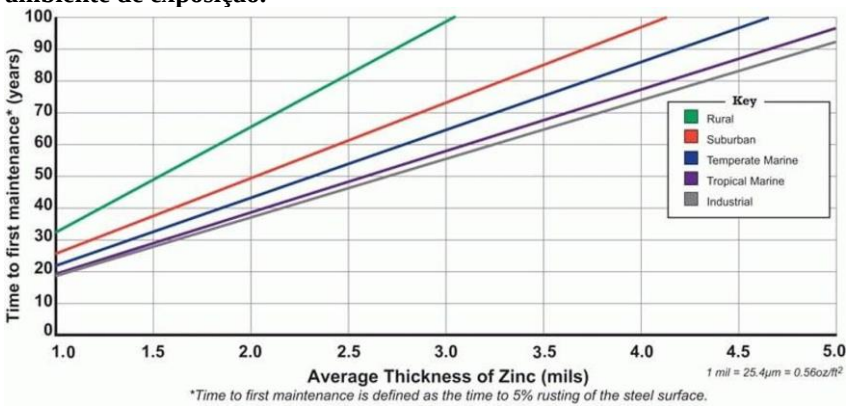
Tabela 1 – Taxas indicativas de corrosão para ambientes diferentes (categorias de corrosividade conforme ABNT NBR 14643). [3]

Categoria de Corrosividade	Taxa média anual de corrosão do zinco (µm/ano)	Taxa média anual de corrosão do aço carbono (µm/ano)
C1 – Muito Baixa (interior: seco)	≤ 0.1	≤ 1.3
C2 – Baixa (interior: condensação ocasional/ exterior environment: rural)	> 0.1 - 0.7	> 1.3 - 25
C3 – Média (interior: alta umidade, pouca poluição no ar / exterior: interior urbano ou costa urbana)	> 0.7 - 2.1	> 25 - 50
C4 – Alta (interior: piscinas, plantas químicas / exterior: áreas industriais e áreas costais com salinidade moderada)	> 2.1 - 4.2	> 50 - 80
C5 – Muito Alta (exterior: industrial com alta umidade ou alta salinidade costal)	> 4.2 - 8.4	> 80 - 200

Fonte: The NACE International IMPACT

Durante um século, aproximadamente, foram realizados testes independentes e em escala industrial onde amostras de aço galvanizado por imersão a quente foram expostas em cinco ambientes distintos (industrial, rural, suburbano, marinho tropical e marinho temperado) gerando dados de desempenho do aço galvanizado exposto (taxa de corrosão) e, por meio de métodos estatísticos e tecnologia de rede neural, o Dr. Gregory Zhang, da Teck Metals Ltd.,[4] desenvolveu o Zinc Coating Life Predictor (ZCLP) para estimar a vida útil de revestimentos galvanizados por imersão a quente em determinadas condições atmosféricas. Usando o ZCLP é possível estimar a durabilidade da peça galvanizada para os cinco ambientes e obter um tempo estimado para a primeira manutenção (TFM) do revestimento galvanizado. [6]

Figura 4 – Tempo estimado até a primeira manutenção em função da espessura da camada de zinco e o ambiente de exposição. [6]



Fonte: American Galvanizers Association. Hot-Dip Galvanized Steel Bridges

O longo ciclo de vida das estruturas galvanizadas, livre de manutenções, traz uma solução de proteção contra corrosão mais sustentável com reduzido impacto ambiental quando comparada a outros sistemas como a pintura.

Além de ser aplicada em estruturas metálicas utilizadas na construção civil, bens de consumo e energia, a galvanização por imersão a quente se destaca por conferir benefícios e aumentar a durabilidade do vergalhão de aço, utilizado no interior do concreto.

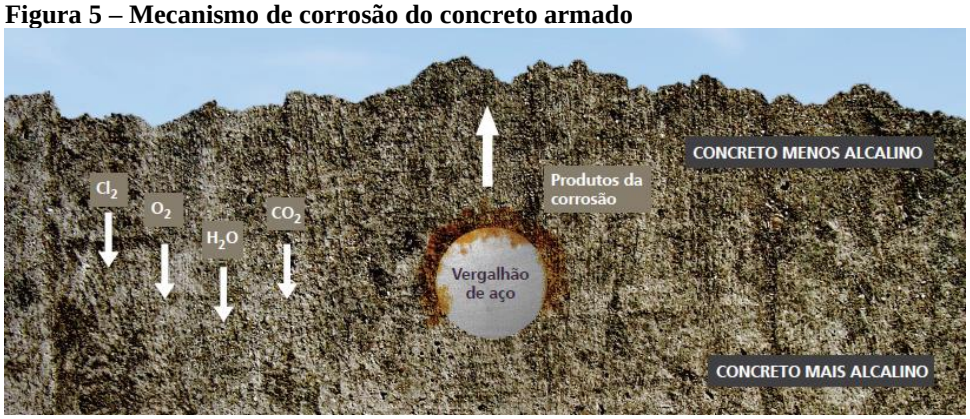
O concreto armado é um dos materiais de construção mais utilizados, possuindo uma boa relação custo-benefício, podendo ser facilmente disponibilizado, além de apresentar uma gama de propriedades e características que o tornam conveniente para diversas aplicações. Todavia, as estruturas de concreto armado apresentam uma certa porosidade e são expostas a diferentes condições ambientais, o que em muitos casos destaca uma de suas principais deficiências: a suscetibilidade do vergalhão de aço sofrer corrosão, resultando em manchas e fissuras que podem ocasionar perdas das propriedades mecânicas. [8]

Em condições ideais, o próprio concreto confere ao aço uma dupla proteção: Primeiramente, atua como uma barreira física que o separa do meio ambiente e, consequentemente, o ambiente altamente alcalino do cimento hidratado (pH>12,5) forma uma película protetora (passivação do aço) de caráter duradouro. Entretanto, as condições ambientais raras vezes são ideais. A corrosão do aço no concreto se inicia e se mantém devido a dois fenômenos principais:

1. Redução da alcalinidade devido à presença de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico e/ou outros elementos ácidos;
2. Ação de íons despassivantes, como cloretos (Cl^-) na presença de oxigênio, que afetam a armadura e intervém na degradação do concreto, permitindo que a armadura seja exposta ao meio ambiente. [8]

No mecanismo de corrosão do concreto armado, a taxa de penetração de substâncias da atmosfera (Cl_2, O_2, H_2O, CO_2) depende da permeabilidade do concreto. A corrosão do vergalhão provoca a redução da seção do aço ou até mesmo sua completa conversão em óxido. Consequentemente, a aderência entre a armadura e o concreto diminui ou desaparece. (Figura 5) [8]

Figura 5 – Mecanismo de corrosão do concreto armado



Fonte: Vergalhão Galvanizado – Durabilidade e segurança para sua obra – Instituto da Cadeia do Zinco (ICZ)

Os produtos da corrosão, como o óxido de ferro (FeO), tem efeito expansivo, resultando em tensões de tração no concreto que provocam fissuras e seu desprendimento da estrutura no contorno do vergalhão. Essas fissuras podem constituir um caminho rápido para a entrada de mais elementos agressivos, comprometendo a integridade e resistência da estrutura, conforme a Figura 6. [8]

Figura 6 – Mecanismo de formação dos produtos da corrosão gerando primeiros pontos e fissuras até desprendimento do concreto e exposição do vergalhão.



Fonte: Vergalhão Galvanizado – Durabilidade e segurança para sua obra – Instituto da Cadeia do Zinco (ICZ)

Uma maneira econômica e eficaz de minimizar o risco de corrosão na armadura é garantir uma espessura de cobertura adequada e que o concreto em si seja denso e impermeável. Apesar desse conhecimento, a corrosão das armaduras é uma patologia crônica observada nas estruturas em concreto armado, como, por exemplo, pontes, viadutos e reservatórios.
Para atenuar esses efeitos, uma série de abordagens estão disponíveis. Entre elas, o revestimento do aço com zinco tem sido amplamente utilizado, pois oferece diversas vantagens:

- O aço permanece protegido contra a corrosão antes de ser imerso no concreto;
- Retarda o início da corrosão do aço, reduzindo os riscos de fissuras, manchas de ferrugem e desagregação do concreto;
- Reduz a frequência e a magnitude dos reparos do concreto;
- Aumenta a vida útil da estrutura;
- Proporciona segurança e sustentabilidade a obra. [8]

Assim como em estruturas e postes, a galvanização por imersão a quente destaca-se entre os possíveis métodos de revestimento do vergalhão, conferindo as proteções por barreira e catódica e isolando o aço de agentes agressivos.

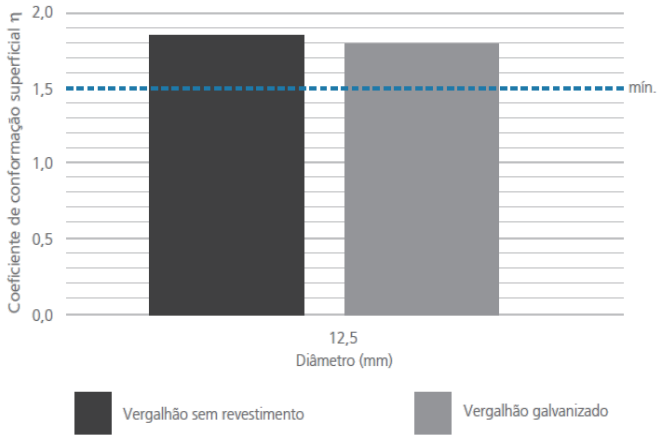
No caso do concreto armado, a galvanização oferece proteção contra as causas mais frequentes da corrosão:

- Carbonatação: Ao penetrar na estrutura do concreto, o CO_2 reduz o pH do meio, o que acelera rapidamente a corrosão do aço exposto, cuja perda de passivação se inicia com pH abaixo de 12. Em contrapartida, o aço galvanizado não sofrerá esses efeitos produzidos pela carbonatação à medida que o concreto envelhece, pois o zinco tem uma faixa de pH de passivação muito maior que o aço (pH entre 4 e 12);
- Tolerância a cloretos: O aço galvanizado pode suportar exposição a concentrações superiores às suportadas pelo aço sem proteção. Quando utilizado o aço sem proteção, deve-se considerar 0,4% como limiar superior de íons de cloreto (Cl-) por massa de cimento. Já para o aço galvanizado, esse limite se eleva a 1,0%. Adicionalmente, a galvanização mantém a integridade do concreto. O zinco sofre corrosão a taxas entre 10-30 vezes inferiores ao aço, dissolvendo-se gradualmente e formando produtos de corrosão que:
  - São menos volumosos que os óxidos de ferro equivalentes;
  - Não têm uma fase expansiva volumosa;
  - Migram, distanciando-se do contato com o vergalhão, e preenchem as fissuras e vazios no concreto;
  - Como resultado, o concreto não sofre deterioração. [8]

Durante a reação entre o zinco e o concreto úmido ocorre a formação de hidroxizincato de cálcio, sendo este um produto da corrosão insolúvel, que protege a camada de zinco subjacente (sempre e quando o pH da mistura de concreto circundante estiver abaixo de 13,3). As análises de vergalhões galvanizados, recolhidos de estruturas em campo, indicam que o revestimento permanece nesse estado de passivação por períodos mais longos, mesmo estando expostos aos altos níveis de cloreto do concreto circundante. [8]

Uma boa aderência entre a armadura e o concreto é essencial para o desempenho confiável do concreto armado. O vergalhão galvanizado conforme norma ASTM A767 possui uma aderência similar à do concreto do vergalhão sem revestimento (Figura 7). Ensaios realizados mostram que a média do coeficiente de conformação superficial das faces do vergalhão galvanizado h = 1,8 atende aos requisitos da norma de ABNT NBR 7480 – Aço destinado a armaduras de concreto armado (min h = 1,5). [8]

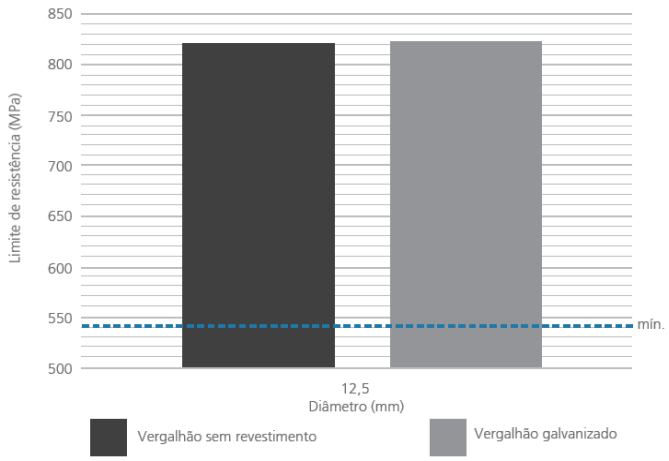
Figura 7 – Determinação do coeficiente de conformação superficial conforme NBR 7477:1992



Fonte: Vergalhão Galvanizado – Durabilidade e segurança para sua obra – Instituto da Cadeia do Zinco (ICZ)

Da mesma forma, a ductilidade e a resistência do vergalhão são determinantes para prevenir fraturas no concreto armado. Ensaios realizados confirmam que o processo de galvanização a quente não afeta as propriedades mecânicas do aço de reforço. (Figura 8) [8]

Figura 8 – Determinação do coeficiente de conformação superficial conforme NBR 7477:1992



Fonte: Vergalhão Galvanizado – Durabilidade e segurança para sua obra – Instituto da Cadeia do Zinco (ICZ)

O uso dos vergalhões galvanizados e outros elementos (incluindo parafusos, amarras, âncoras, barracões móveis, barras de segurança e tubulações) está amplamente generalizado em diversas estruturas e elementos de concreto armado. Algumas aplicações do concreto armado tornam indispensável o uso de vergalhões galvanizados para garantir a integridade da estrutura, como:

- Estruturas para tratamento de água e esgoto;
- Estruturas costeiras, marinhas e industriais;
- Infraestrutura de transporte;
- Estruturas ou elementos submersos ou enterrados;
- Elementos estruturais com superfície exposta;
- Elementos pré-moldados arquitetônicos e de revestimento;
- Módulos de construção pré-fabricados;
- Marcos arquitetônicos. [8]

OBJETIVO

Demonstrar através de casos reais os benefícios da aplicação de armaduras galvanizadas em projetos de saneamento, contribuindo para o desenvolvimento sustentável através do aumento da durabilidade de reservatórios de água, que são ambientes corrosivos com alta agressividade.

METODOLOGIA

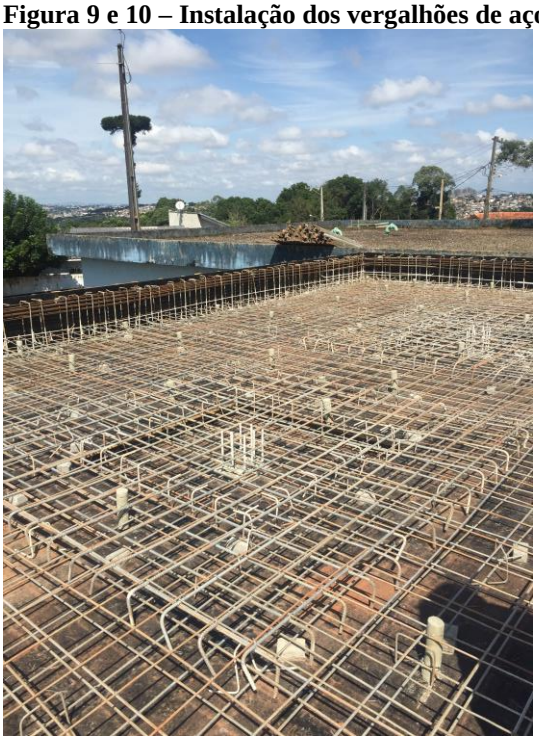
A projeto teve início em 2011, quando começaram os contatos com a Sabesp (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), a fim de desenvolver um teste piloto para aplicação do vergalhão galvanizado em reservatórios de água potável. Em 2013 foi conduzido um trabalho junto a companhia onde, a partir de dados reais, foi calculado o custo total da utilização de armaduras galvanizadas (custo inicial, custos evitados com manutenção e custo de oportunidade), atingindo quase 40% de redução em relação à utilização de armaduras de aço comum. O trabalho foi apresentado no Congresso Internacional do EGGA (European General Galvanizers Association)

Em 2014 iniciou-se o contato com a Sanepar (Companhia de Saneamento do Paraná), para divulgação dos resultados positivos obtidos com a Sabesp e com a utilização do aço galvanizado em obras de saneamento.

Posteriormente em 2015 foi firmada a parceria e em 2016, com o apoio do Instituto da Cadeia do Zinco (ICZ) foi conduzido um trabalho em parceria com Sanepar, a Nexa Resources (na época Votorantim Metais), a Gerdau e a galvanizadora Jaime Raitz, a fim de promover e desenvolver a aplicação de vergalhão galvanizado em projetos de saneamento básico, em larga escala. O projeto contemplou a construção de uma laje de cobertura do reservatório de água potável "Palmital" na Sanepar no município de Colombo, no Paraná, onde foram utilizadas 5 toneladas de vergalhão galvanizado no concreto armado.

A montagem da estrutura com os vergalhões galvanizados antes da concretagem da laje ocorreu em abril de 2016, conforme as figuras de 9 a 12.

Figura 9 e 10 – Instalação dos vergalhões de aço galvanizado - 2016.




Fonte: Arquivo do autor.

Figura 11 e 12 – Concretagem da laje com vergalhões de aço galvanizado - 2016.




Fonte: Arquivo do autor.

RESULTADOS

Inspeção 1 – 16/03/2020

Após 4 anos da construção do reservatório, foi coordenado entre a Nexa Resources e a Sanepar o esgotamento do reservatório para uma inspeção interna do mesmo, focado principalmente na laje interna onde foi utilizado o vergalhão galvanizado, e na junção entre a laje e a parede, onde a armadura galvanizada faz interface com a armadura sem galvanizar (Figuras 13, 14 e 15).

Figura 13 – Intersecção da laje e a parede, destacando estruturas galvanizadas e sem galvanizar.



Fonte: Arquivo do autor.

Figura 14 – Interior da laje do reservatório Palmital



Fonte: Arquivo do autor.

Figura 15 – Junção da parede com o teto do reservatório e aplicação de membrana impermeabilizante.



Fonte: Arquivo do autor.

Por uma questão de procedimento interno, tal região da junção da parede com o teto, recebe uma camada de membrana protetora até um metro abaixo do teto, por ser uma das regiões mais suscetíveis a corrosão (Figura 15).

Inspeção 2 – 19/05/2022

Após 6 anos da construção, foi realizada uma nova inspeção (Figuras 16 e 17), onde além de avaliar o comportamento do vergalhão galvanizado no interior do reservatório Palmital, foram retiradas amostras da laje superior do reservatório (Figura 18 e 19) para comparação com amostras retiradas de um reservatório construído em uma época próxima, o reservatório Rio Verde, cuja proteção da estrutura foi realizada por meio de aplicação de uma membrana impermeabilizante.

Figura 16 e 17 – Teto do reservatório Palmital sem indícios de corrosão.



Fonte: Arquivo do autor.

Figura 18 e 19 – Local de retirada e amostra da laje com vergalhão galvanizado



Fonte: Arquivo do autor.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após inspeções realizadas em 2020 e 2022, 4 e 6 anos após a implementação do vergalhão galvanizado, é possível afirmar que a laje do reservatório não apresentou indícios ou vestígios de corrosão durante a inspeção, conforme imagens obtidas durante a visita e relatos dos envolvidos no processo. De acordo com informações da Sanepar, os vestígios de corrosão das estruturas não galvanizadas começam a surgir entre o 3º e o 4º ano após a construção, sendo necessária intervenção para manutenção da estrutura.

Conforme a figura 15, tanto na região da laje com vergalhão galvanizado quanto na parede com uma camada de membrana no reservatório Palmital, a estrutura segue intacta, sem sinais de desgaste ou corrosão. Conforme as figuras 16 e 17, é possível observar a ausência de vestígios de corrosão durante a inspeção.

Após a retirada das amostras de ambos os reservatórios, Palmital (com vergalhão galvanizado) e Rio Verde (com proteção através de membrana impermeabilizante), foi contratado o laboratório Daher – Engenharia consultiva e tecnologia para realizar as seguintes análises:

- Ensaio de resistência a compressão axial;
- Ensaio de determinação da profundidade de carbonatação;
- Ensaio de determinação do potencial de corrosão.

Os resultados foram apresentados no relatório elaborado pelo Daher em 2022, onde as principais conclusões foram que para os 3 ensaios o comportamento entre a laje com vergalhão galvanizado e sem galvanizar (com proteção de membrana) tiveram um resultado muito semelhante, com destaque para o potencial de corrosão, onde em ambos os casos, a probabilidade de corrosão foi inferior a 10%.

Na estrutura de outro reservatório construído em outro momento, sem a utilização do vergalhão galvanizado e sem aplicação de membrana protetiva foi possível identificar corrosão das armaduras, conforme as Figuras 20 e 21.

Figura 20 e 21 – Estruturas oxidadas de um reservatório onde não foi utilizado vergalhão galvanizado




Fonte: Arquivo do autor.

Semelhante à estrutura anterior, foi possível inspecionar uma espécie de respiro que havia dentro do reservatório, que não foi construído com vergalhão galvanizado e nas laterais apresentavam uma certa característica de corrosão que se assemelha a corrosão do vergalhão em sua extremidade (Figuras 22 e 23).

Figura 21 e 22: Respiro sem estrutura galvanizada com vestígios de corrosão.




Fonte: Arquivo do autor.

CONCLUSÕES

Através da última inspeção, foi possível concluir:

- Após 6 anos de construção do reservatório Palmital, a laje apresenta um excelente desempenho com o vergalhão galvanizado, sem a necessidade de qualquer manutenção;
- As análises laboratoriais mostraram que trabalhar com o vergalhão galvanizado é, no mínimo, compatível com a utilização de membrana impermeabilizante como método protetivo ao concreto, uma vez que ambas as proteções demonstraram um desempenho similar;
- Em uma análise de custos prévia, pode-se afirmar maior economia de recursos ao trabalhar com o vergalhão galvanizado se comparado à membrana, uma vez que a membrana requer mão de obra especializada, maior tempo de aplicação e manutenções constantes, podendo custar até 300,00/m^2 de poliuretano para aplicação de uma nova camada de membrana.

Conforme as normativas de durabilidade de edificações e estruturas de contenção de água, por similaridade estima-se que um reservatório tenha vida útil aproximada de 50 anos, mediante manutenções realizadas.

Com o desenvolvimento deste projeto e acompanhamento do desempenho do vergalhão galvanizado, será possível consolidar os ganhos advindos da utilização do aço galvanizado em obras de saneamento em escala real, determinando a vida útil dos reservatórios e os custos de manutenção em casos onde for utilizada a membrana impermeabilizante.

Este projeto será divulgado para as demais empresas de saneamento do Brasil e em órgãos regulamentadores de obras, de modo a tornar a galvanização conhecida no meio e uma opção para a proteção contra corrosão em procedimentos técnicos para obras de saneamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] 2023 World Steel in Figures, World Steel Association
Disponível em: https://worldsteel.org/publications/bookshop/world-steel-in-figures-2023/ Acesso em 23/05/2024

[2] Steel - the permanent material in the circular economy, World Steel Association, 2023.
Disponível em: https://worldsteel.org/publications/bookshop/steel-permanent-circular-economy/ Acesso em 23/05/2024

[3] The NACE International IMPACT – International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. 2016. Disponível em: http://impact.nace.org/economic-impact.aspx Acesso em 23/10/2023

[4] American Galvanizers Association. Hot-dip galvanizing for Sustainable Design. 2015. Disponível em: https://galvanizeit.org/education-and-resources/publications/hot-dip-galvanizing-for-sustainable-design Acesso em 23/05/2024

[5] Guia de Galvanização por Imersão a Quente – Instituto da Cadeia do Zinco (ICZ)

[6] American Galvanizers Association. Hot-Dip Galvanized Steel Bridges.2023.Disponível em: https://galvanizeit.org/galvanize-it-online-seminar/why-hot-dip-galvanizing/longevity Acesso em 23/05/2024

[7] Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 14643 – Corrosão atmosférica – Classificação da corrosividade de atmosferas – Janeiro/2001

[8] Vergalhão Galvanizado – Durabilidade e segurança para sua obra – Instituto da Cadeia do Zinco (ICZ)