



## **Aumento da Durabilidade em Pontes Marítimas com a Utilização do Aditivo Autocicatrizante Regenerativo**

**Leonardo Otto Coutinho<sup>1</sup>, Luiz Otávio Ribeiro Squillace<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Alchemco Brasil / Engenharia Civil / leonardo.coutinho@alchemco.com.br

<sup>2</sup> Alchemco Brasil / Engenharia Civil / luiz.otavio@alchemco.com.br

### **Resumo**

O presente artigo pretende demonstrar a eficácia no aumento da durabilidade da estrutura de concreto armado em pontes que estejam em ambiente marítimo, com a utilização de aditivo autocicatrizante regenerativo (silicato modificado por enzimas), que ao reagir com a estrutura de concreto armado, forma gel C-S-H hidroreativo, e ao permanecer em estado de gel, preenche os poros vazios e capilares da matriz cimentícia, possibilitando uma proteção contra a passagem dos íons cloreto e impedindo uma penetração mais profunda da umidade ou da água na estrutura de concreto.

Principalmente as obras de arte especiais, tais como pontes e viadutos, são obras que possuem importância fundamental para a sociedade e ao mesmo tempo possuem uma soma de investimento muito significativa, se comparada a outras obras dentro da construção civil. Portanto, a durabilidade e a integridade estrutural dessas estruturas deve ser levada a sério como é o exemplo em outros países tal como os Estados Unidos que possuem um programa de inspeção e classificação da condição das pontes e viadutos, chamado NBI (National Bridge Inventory Ratings).

Neste contexto, o estudo da utilização do silicato modificado por enzimas em estruturas de concreto marítimas já se faz amplamente utilizado fora do Brasil e é uma solução importante no aumento a durabilidade do concreto, principalmente em ambientes de severa agressividade. A metodologia proposta nesse estudo, envolve a avaliação da eficiência desse material comparando corpos de prova de referência (sem proteção adicional) com corpos de prova tratados com o silicato modificado por enzimas, através do ensaio de carga elétrica passante (ASTM C 1202) que possibilitará medir a permeabilidade do concreto à passagem dos íons cloreto em concretos com resistência característica de 25 MPa.

### **Palavras-chave**

Ataque de íons cloreto; aumento de durabilidade; concreto autocicatrizante regenerativo; mitigação das manifestações patológicas; silicato modificado por enzimas.

## 1. Introdução

As pontes e viadutos desempenham um papel essencial na infraestrutura viária, conectando regiões, facilitando o transporte e promovendo o desenvolvimento econômico e social. No entanto, devido às elevadas cargas estruturais e às condições ambientais adversas, essas obras de arte especiais (OAEs) estão constantemente sujeitas a processos de degradação que comprometem sua durabilidade e segurança. Dentre os principais agentes deteriorantes, destacam-se os íons cloreto presentes em ambientes marítimos, que aceleram a corrosão das armaduras do concreto armado, reduzindo significativamente sua vida útil.

A necessidade de um programa estruturado de inspeção, manutenção e reabilitação dessas estruturas é um fator crítico para evitar falhas estruturais catastróficas e otimizar o investimento público e privado. No Brasil, observa-se uma carência de um sistema padronizado e de diretrizes rigorosas para o mapeamento e classificação do estado de conservação das pontes e viadutos. Enquanto isso, nos Estados Unidos, existe o National Bridge Inventory Ratings (NBI), um programa federal que categoriza as condições das pontes por meio de inspeções regulares e classificação padronizada, permitindo intervenções preventivas mais eficazes. Essa abordagem sistemática resulta em uma redução dos custos de manutenção e aumenta a segurança estrutural das obras.

A comparação entre os custos de manutenção de pontes no Brasil e nos Estados Unidos revela disparidades significativas. Nos EUA, a manutenção preventiva é amplamente praticada e planejada com base nos dados coletados pelo NBI, evitando a necessidade de grandes reparos corretivos que envolvem custos elevados. No Brasil, a ausência de um banco de dados nacional consolidado para avaliação do estado das pontes e viadutos leva à predominância de intervenções corretivas, que são mais onerosas e menos eficientes a longo prazo.

Portanto, é de suma importância possuir um banco de dados nacional consolidado, pois desta forma, é possível entender o estado em que as OAEs se encontram, qual é a sua necessidade de manutenção e a urgência de intervenção ou não. Além disso, há uma economia significativa de custos despendidos quando se faz a prevenção e as intervenções em estágios iniciais de degradação da estrutura de concreto armado. Essa questão é amplamente estudada, onde SITTER (1984) apresenta um exemplo importante, de como pode ser o aumento do custo de intervenção dividindo em cinco estágios, a saber :

- Prevenção – Adoção de medidas preventivas, como revestimentos protetores e monitoramento da umidade. Custo relativo: 1x.
- Início da deterioração – Pequenas fissuras aparecem, exigindo intervenções mínimas, como a aplicação de selantes. Custo relativo: 1,5x.
- Propagação da deterioração – A corrosão das armaduras se inicia, demandando reparos localizados. Custo relativo: 3x.
- Deterioração avançada – O concreto sofre desagregação e a capacidade estrutural é comprometida, necessitando reforço estrutural. Custo relativo: 10x.
- Colapso parcial ou total – A estrutura requer reconstrução ou interdição. Custo relativo: 50x ou mais.

Desta forma, é possível identificar que realmente os custos de reparo aumentam exponencialmente conforme a deterioração da estrutura avança e que o quanto antes essa intervenção for realizada, menor o custo financeiro que a sociedade terá que arcar para manter a vida útil de serviço dessas estruturas, otimizando o investimento público e privado.

Além do NBI, a AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) possui um programa voltado para a preservação de infraestrutura de transporte, especialmente rodovias e pontes chamado de AASHTO TSP-2 (Transportation System Preservation Technical Services Program), que é um programa de serviços técnicos que auxilia departamentos estaduais de transporte (DOTs) nos Estados Unidos a estender a vida útil da infraestrutura de transporte por meio de estratégias de preservação. Ele inclui suporte técnico, treinamentos, pesquisa e desenvolvimento de guias e especificações para a manutenção preventiva e reabilitação de rodovias e pontes. Dentro desse programa que auxilia os DOTs, existe uma iniciativa chamada de ITD Partners que se refere a um grupo de parceiros e colaboradores, especificamente voltado para o Departamento de Transporte de Idaho (ITD - Idaho Transportation Department). O objetivo dessa parceria é promover a implementação de melhores práticas na preservação de pavimentos e pontes, por meio de treinamentos, compartilhamento de conhecimento técnico e inovação em manutenção e reparo.

Diante desse cenário, a aplicação de tecnologias inovadoras surge como uma solução estratégica para aumentar a durabilidade das estruturas e reduzir custos de manutenção. Uma dessas soluções é o aditivo autocicatrizante regenerativo, à base de silicato modificado por enzimas, que reage com os compostos do concreto formando um gel C-S-H hidreativo. Esse gel preenche microfissuras e porosidade na matriz cimentícia, proporcionando uma barreira eficaz contra a penetração de cloretos e umidade, mitigando os efeitos da corrosão. A eficácia dessa tecnologia tem sido amplamente estudada e aplicada em países desenvolvidos, como os EUA, demonstrando seu potencial para ampliar a vida útil das estruturas expostas a ambientes agressivos.

O presente estudo propõe uma avaliação experimental dessa tecnologia em concretos com resistência característica de 25 MPa, por meio do ensaio de carga elétrica passante (ASTM C 1202), que mede a permeabilidade do concreto à penetração de íons cloreto. Serão comparados corpos de prova de referência (sem proteção adicional) com corpos de prova contendo a aplicação do silicato modificado por enzimas, permitindo quantificar sua eficiência na redução da absorção de agentes agressivos.

Ao integrar práticas inovadoras e melhorar os métodos de manutenção preventiva no Brasil, é possível otimizar recursos financeiros, aumentar a segurança estrutural e estender significativamente a vida útil das pontes e viadutos. Assim, torna-se imperativo investir em tecnologias que garantam maior durabilidade ao concreto armado, bem como na implementação de um sistema nacional padronizado de inspeção e monitoramento, à semelhança do modelo adotado nos EUA. A combinação de boas práticas construtivas, materiais avançados e um planejamento estruturado de gestão de ativos é a chave para a preservação eficiente das OAE e para a sustentabilidade da infraestrutura viária brasileira.

## **2. Características do Aditivo Modificado por Enzimas**

Também denominado aditivo autocicatrizante regenerativo, o aditivo modificado por enzimas, possui uma tecnologia única baseada em silicatos modificados por enzimas que possibilita a formação de gel C-S-H hidreativo dentro dos poros e capilares do concreto armado. As enzimas presentes nesse aditivo garantem a sua hidreatividade e que o gel C-S-H permaneça em estado de gel, impedindo sua cristalização, como ocorre com outros silicatos utilizados no concreto. Esse material é comercializado em estado líquido e aplicado por pulverização sobre o concreto já endurecido, geralmente após o período de cura. A capacidade dessa tecnologia de manter-se em estado de gel dentro da matriz cimentícia proporciona diversos benefícios ao concreto armado, especialmente em ambientes altamente agressivos, onde a porosidade, a interconectividade entre os poros e a permeabilidade do concreto são fatores determinantes para o grau de degradação da estrutura.

A particularidade desse aditivo em manter a reação química dos silicatos modificados por enzimas ativa dentro dos vazios da matriz cimentícia permite a melhoria de diversas propriedades físico-químicas do concreto, incluindo maior resistência à compressão e proteção contra agentes agressivos, como íons cloreto, carbonatação, eflorescência, ataque de sulfatos e ureia. Ao permanecer em estado de gel C-S-H hidroreativo, o material acompanha as dilatações térmicas da estrutura e continua reagindo sempre que entra em contato com umidade ou água. Além disso, a ação das enzimas mantém sua capacidade expansiva, permitindo o fechamento de fissuras passivas de até 0,4 mm. Esse limite está de acordo com a norma NBR 6118 (2024), que no capítulo 13.4 estabelece que a abertura máxima característica das fissuras pode variar entre 0,2 mm e 0,4 mm, dependendo da classe de agressividade ambiental da estrutura, sem comprometer de forma significativa a passividade das armaduras, mantendo portanto, a sua vida útil de projeto. Além de contribuir para a integridade estrutural ao selar continuamente as fissuras passivas até 0,4mm, esse aditivo também apresenta outras vantagens, como ser incolor, inodoro e atóxico, possuindo certificação de potabilidade. Seu pH alcalino de 11,7 auxilia na manutenção do pH elevado do concreto, protegendo assim a camada passivadora das armaduras contra a corrosão.

### 3. Proteção contra a migração de íons cloreto

Em ambientes de severa agressividade por ataque de cloreto, é fundamental proteger as estruturas de concreto armado, a fim de manter a sua integridade estrutural, utilizando soluções que proporcionem uma garantia da sua durabilidade, baixa manutenibilidade, garantindo a sustentabilidade financeira e ambiental desses projetos de engenharia. A fim de detectar a durabilidade da estrutura inserida nesse tipo de agressividade ambiental, utiliza-se o ensaio ASTM C1202-18, denominado Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, para estimar a durabilidade do concreto quanto à penetração de íons cloreto, que representam uma das principais causas da corrosão das armaduras, reduzindo significativamente a durabilidade nas estruturas de concreto armado.

Esse método de ensaio mede a resistência elétrica do concreto à passagem de íons cloreto, fornecendo uma estimativa indireta da sua permeabilidade com base na carga elétrica total que atravessa a amostra testada. Parâmetro esse que é fundamental para determinar a durabilidade da estrutura exposta a diferentes condições ambientais agressivas, auxiliando na estimativa da vida útil do concreto armado em ambientes sujeitos ao ataque de cloreto. O ensaio ASTM C1202-18, consiste na detecção da carga elétrica passante em Coulombs (C) em um corpo de prova cilíndrico de concreto, geralmente com 50 mm de espessura e 100 mm de diâmetro, saturado com água e posicionado entre duas soluções distintas: NaCl (cloreto de sódio) de um lado e NaOH (hidróxido de sódio) do outro. O resultado, expresso em Coulombs, indica o nível de permeabilidade do concreto à penetração de íons cloreto e permite classificá-lo em diferentes faixas de agressividade ambiental, conforme apresentado na Tabela 1:

**Tabela 1 – Classificação do concreto quanto à penetrabilidade a íons cloreto.**

<b>Carga passante, em Coulombs (C)</b>	<b>Classificação do concreto quanto à penetrabilidade a íons cloreto, de acordo com a ASTM C 1202 (ASTM, 2018)</b>
>4000	Elevada
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito baixa
<100	Desprezível

Analisando as classificações das agressividades ambientais segundo a passagem de carga elétrica passante, pode-se entender que acima de 4.000 Coulombs o ambiente possui agressividade ambiental elevada, entre 2.000 a 4.000 Coulombs a agressividade ambiental é moderada, de 1.000 a 2.000 Coulombs é considerado baixa agressividade ambiental, entre 100 a 1.000 Coulombs é uma agressividade muito baixa e desprezível quando o resultado da carga elétrica passante for menor que 100 Coulombs. Através da identificação do valor da carga elétrica passante, é possível estimar a vida útil de projeto da estrutura de concreto armado, segundo as suas características de projeto.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para dois conjuntos de corpos de prova, o primeiro conjunto (306-19-REF) é referente as amostras moldadas em que não foi aplicado o silicato modificado por enzimas, já o segundo conjunto (306-19) se refere aos corpos de prova protegidos com a aplicação do silicato modificado por enzimas.

**Tabela 2 – IPT - Resistência à penetração de íons cloreto, carga+w elétrica passante (Coulombs)**

Identificação das amostras	Resultados, em Coulombs (C)		
	Ensaio A	Ensaio B	Média
306-19-REF	6292	6307	6300
306-19	3502	2305	2904

Através dos resultados obtidos na Tabela 2, é possível constatar uma redução de 54% no valor da carga elétrica passante, onde nos corpos de prova de referência a passagem de carga elétrica passante média foi de 6.300 C e nos corpos de prova protegidos com a aplicação do silicato modificado por enzimas, a passagem de carga elétrica passante média foi de 2.900 C. Essa redução média da passagem de carga elétrica nos corpos de prova é extremamente importante pois demonstra que o gel formado pelo silicato modificado por enzimas, ao preencher os poros vazios e capilares na microestrutura da matriz cimentícia possui a capacidade de impedir que 54% dos íons cloreto ingressem dentro da estrutura de concreto armado.

Essa afirmação pode ser comprovada mediante a utilização das informações apresentadas na Tabela 1 (classificação da agressividade ambiental quanto à penetrabilidade a íons cloreto) com os resultados do ensaio obtidos na Tabela 2 (resistência à penetração de íons cloreto). Desta forma, pode-se constatar que para uma carga elétrica passante de 6.300 C, a estrutura de concreto armado estaria localizada em um ambiente com elevada agressividade ambiental. O mesmo ensaio realizado nos corpos de prova protegidos com o silicato modificado por enzimas, permitiu que a passagem carga elétrica passante fosse somente de 2.900 C, portanto permitindo que a agressividade ambiental estimada nessa estrutura de concreto armado seja de moderada agressividade, tornando claro a eficiência deste material no aumento da durabilidade e na sua , pois permitiu que houvesse a redução de uma classe de agressividade ambiental segundo a ASTM-C 1202.

Em seu estudo, HELENE (2003) apresenta a importância da difusão de cloretos para que haja maior proteção nas armaduras da estrutura de concreto armado. Entre os métodos para aumentar essa difusão estão: aumento da espessura do cobrimento de concreto da armadura, a maior resistência a compressão axial, menor índice de porosidade e índice de vazios, possibilitando que a estrutura esteja menos porosa possível, com menor interconectividade entre seus capilares. Desta forma, pode-se obter uma estrutura mais densa com uma durabilidade maior. A utilização do silicato modificado por enzimas pôde demonstrar que possui uma proteção adicional na difusão de cloretos e traz benefícios muito importantes na integridade estrutural, proporcionando uma vida útil maior para as estruturas de concreto armado inseridas nesse tipo de ambiente.

#### **4. Mecanismo do ataque de cloreto**

Além da velocidade da penetração dos íons cloreto na estrutura de concreto armado, o processo químico em si (reação química) também deve ser estudado a fim de se entender que o processo de oxirredução na corrosão das armaduras de concreto ocorre devido à reação química entre o ferro da armadura e o oxigênio presente no ambiente, combinado com a umidade (principalmente água).

O mecanismo do processo corrosivo nas armaduras das estruturas de concreto armado depende da presença de três fatores provenientes do ambiente, a saber: íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e a presença de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), somente com a presença desses três fatores é possível ocorrer o processo de oxidação no aço. O processo de corrosão por ataque de cloretos depende da despassivação da camada passivadora do aço, que ocorre através da sua reação com a camada passiva de óxido de ferro na superfície da armadura.

Após a quebra da camada passivadora, inicia-se o processo de corrosão, pois a armadura de ferro torna-se exposta ao ambiente corrosivo (umidade e oxigênio). Os íons cloreto não participam diretamente das reações de oxirredução, mas aceleram a corrosão, pois em locais onde a camada passiva é danificada, a reação de oxidação no ânodo (ferro) pode ocorrer com mais facilidade. Os íons cloreto também podem aumentar a condutividade elétrica do concreto, facilitando o fluxo de corrente elétrica entre o ânodo e o cátodo. O resultado da corrosão das armaduras resulta na formação de produtos sólidos como hidróxido de ferro e óxidos de ferro, que são expansivos. Isso gera pressão interna na estrutura de concreto, levando à fissuração e ao enfraquecimento do concreto. Em regiões onde os íons cloreto têm uma concentração maior, esse processo ocorre mais rapidamente, acelerando o processo de deterioração da sua armadura.

Portanto, para que o mecanismo de deterioração da estrutura de concreto armado ocorra através da agressividade por íons cloreto, faz-se necessário que haja a presença de íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Como apresentado anteriormente o gel formado pelo silicato modificado por enzimas possui como característica reagir com a água por toda a vida útil da estrutura impedindo que a água consiga penetrar mais profundamente na estrutura, profundidades acima de 2,0cm, portanto, com cobrimentos na ordem de 4,0cm a 5,0cm, que são os cobrimentos usualmente utilizados em OAEs, a água não consegue penetrar na profundidade que as armaduras se encontram e desta forma, a tendência é que não ocorra o processo de corrosão nas armaduras das estruturas de concreto armado nas quais o silicato modificado por enzimas tiver sido aplicado.

#### **5. Conclusão**

A aplicação do silicato modificado por enzimas no concreto armado demonstrou ser uma solução eficaz para melhorar significativamente a durabilidade da estrutura, reduzindo a permeabilidade à penetração de íons cloreto, conforme verificado nos ensaios de carga elétrica passante e também impedindo que a água consiga penetrar mais profundamente (acima de 2,0 cm) no concreto, mantendo as armaduras da estrutura de concreto armado íntegras. Essa característica é fundamental para minimizar e até impedir completamente o desgaste gerado pela corrosão das armaduras, principal fator de deterioração em estruturas de concreto expostas a ambientes agressivos, como áreas litorâneas, industriais e urbanas com elevada poluição atmosférica.

A proteção proporcionada pelo silicato modificado por enzimas ocorre devido à sua capacidade de manter o gel C-S-H hidrossolúvel nos vazios da matriz cimentícia, impedindo a progressão de agentes agressivos e a penetração de água. Esse mecanismo contribui diretamente para a preservação das armaduras, evitando

processos de corrosão que poderiam comprometer a integridade estrutural e reduzir a vida útil do concreto armado.

Os resultados obtidos evidenciam que o uso desse aditivo pode aumentar significativamente a vida útil da estrutura, pois atua de forma contínua, reagindo sempre que entra em contato com a umidade. Essa propriedade autocicatrizante regenerativa permite o fechamento de fissuras passivas de até 0,4 mm, conforme estabelecido pela NBR 6118 (2024), garantindo um desempenho estrutural adequado ao longo do tempo.

A redução da necessidade de manutenção é outro benefício essencial desse material. A menor permeabilidade do concreto significa menor risco de infiltrações, carbonatação e reações deletérias, como a expansão por sulfatos e a formação de eflorescências. Dessa forma, as intervenções corretivas são minimizadas, reduzindo custos com reparos e prolongando os intervalos entre manutenções preventivas, resultando em maior eficiência operacional.

Do ponto de vista econômico-financeiro, a aplicação do silicato modificado por enzimas se mostra uma alternativa viável e vantajosa. O investimento inicial na utilização desse aditivo é compensado pela redução dos gastos ao longo do ciclo de vida da estrutura, garantindo um melhor custo-benefício quando comparado a soluções tradicionais que exigem manutenções frequentes e custos elevados de reabilitação estrutural.

Os ensaios realizados confirmaram que o concreto tratado com esse aditivo apresentou níveis reduzidos de carga elétrica passante, conforme as classificações da ASTM C1202-18. Esse desempenho reforça a viabilidade do uso do silicato modificado por enzimas como uma solução eficaz para concretos expostos a condições severas, melhorando a sua longevidade e resistência ao meio ambiente. É bastante interessante que outros profissionais, busquem realizar outros estudos com esse material pois segundo o fabricante, sua forma de atuação traz diversos benefícios à estrutura de concreto armado e podem ser explorados pelo meio acadêmico.

Dessa forma, a incorporação do silicato modificado por enzimas no concreto armado representa um avanço tecnológico significativo, promovendo maior durabilidade, integridade estrutural e redução dos custos de manutenção. Os resultados apresentados neste estudo reforçam a importância da adoção de materiais inovadores para a construção civil, garantindo estruturas mais resistentes, sustentáveis e economicamente viáveis ao longo do tempo.

## 6. Referências

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO). **Transportation System Preservation Technical Services Program (TSP-2)**. <https://www.tsp2.org/> (acessado em 12/03/2025)
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2024.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C12002 – **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**. Washington, 2018.
4. HELENE, Paulo. **A nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a vida útil das estruturas de concreto**. University of Sao Paulo PCC USP, 2003.
5. IDAHO TRANSPORTATION DEPARTMENT. (ITD). **Idaho Transportation Department Official Website**. <https://itd.idaho.gov/> (acessado em 12/03/2025)
6. IDAHO TRANSPORTATION DEPARTMENT. (ITD) **Information Resources**. <https://itd.idaho.gov/resources/> (acessado em 12/03/2025)

7. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. (2021). **National Bridge Inventory (NBI) Data**. <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbi.cfm> (acessado em 12/03/2025)
8. SITTER, H. *Service life prediction of concrete structures under different environmental conditions*. In Proceedings of the International RILEM Symposium on Durability of Concrete. Stockholm, Sweden, 1984.