



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Corrosão por microorganismos observada em pontes metálicas brasileiras

Líbia da Costa Lourenço¹; Luiz Carlos Mendes²; Vancler Ribeiro Alves³.

¹Universidade Federal Fluminense, Pesquisadora, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil; D. Sc.; e-mail: libialourenco@hotmail.com

²Universidade Federal Fluminense, Professor Titular, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil; D. Sc. ; e-mail: lcarlos@predialnet.com.br

³Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Professor Adjunto, D.Sc.; email: ribalvs@bol.com.br

Resumo

A corrosão por microorganismos verificada em pontes e viadutos em regiões brasileiras situados em meios de forte agressividade ambiental possui naturezas variadas e, quando este fenômeno não apresenta uma intervenção de recuperação adequada, compromete a funcionalidade da estrutura. A metodologia do trabalho consiste em analisar os locais ambientais em que as pontes estão inseridas, e desenvolver um modelo de inspeção e levantamento para análise dos efeitos do ambiente sobre as estruturas metálicas, inseridas na região. As análises físicas, químicas e biológicas do ecossistema fechado permitirão a escolha de procedimentos corretos de recuperação das partes afetadas pela corrosão, de forma bem acertada, bem detalhada, de modo a evitar que as perdas da resistência mecânica das partes corroídas afetem a estabilidade global da estrutura. O estudo apresenta também uma interação detalhada de obras de arte especiais com o meio ambiente em ecossistemas fechados.

Palavras-chave

Corrosão metálica; pontes metálicas; ecossistemas fechados.

Introdução

Muitas são as interferências no ambiente natural causadas pela inserção de uma construção de uma ponte em uma região. As pontes e viadutos, promovem uma desregulação da dinâmica do equilíbrio do ecossistema, através de vários fatores que atuam em conjunto no processo de degradação ambiental.

Dois momentos distintos propiciam a ocorrência dos fatores que promovem os problemas ambientais: o momento de execução da obra e o momento da utilização. O período de duração da obra gera fatores cujo tempo de ação é limitado, porém suas consequências permanecem por tempo indefinido. Após a conclusão da obra, os fatores ocasionados pela presença da ponte no ambiente apresentam um tempo de ação ilimitado, pois modificam permanentemente o ambiente e obrigam o ecossistema a se adaptar e a atingir novamente o equilíbrio.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Dentre os problemas gerados pela realização da obra, destaca-se a poluição do ambiente em decorrência da liberação ou do vazamento de resíduos químicos da obra. A tecnologia da construção emprega diversos materiais e substâncias tóxicas que, quando despejadas em um ambiente natural, passam a integrar o ciclo trófico do ecossistema e dificilmente são eliminados. Frequentemente ocorre o processo de bioacumulação, que pode levar à extinção de espécies inteiras tanto de plantas como de animais aquáticos (LAMBERT AND VASSIE, 1991).

Outro problema associado à execução da construção está na permanente modificação da topologia do ambiente, devido às escavações e aterros necessários às fundações e montagem da estrutura das pontes e viadutos (MENDES, 2003). Essa alteração topológica tem sérias implicações no habitat dos animais e na fisiologia dos vegetais, pois os componentes inorgânicos fundamentais à fotossíntese e a manutenção do metabolismo das plantas são retirados dos solos. A desregulação da fisiologia das plantas gera danos aos demais seres vivos daquele ambiente.

Ao se analisar alterações topológicas em ambientes aquáticos, deve-se notar ainda que há prejuízos aos seres bentônicos, que vivem associados ao substrato. Esses seres são importantes membros das cadeias alimentares, pois muitos deles servem como elo trófico, conectando os membros da base com o topo da cadeia.

Percebe-se a ocorrência de duas situações de impacto negativo para o ecossistema local: a existência de ruídos provocados pela construção e a emissão de gases poluentes na atmosfera. Esses problemas ocorrem tanto no período de execução da obra como como no de utilização, após a inauguração, devido ao tráfego de veículos.

Os ruídos são extremamente danosos aos seres vivos, pois são capazes de alterar o comportamento de animais e a fisiologia dos vegetais, gerando desvios nas relações ecológicas, o que pode levar ao desequilíbrio do ecossistema. A emissão de gases se mostra um outro fator de desequilíbrio, pois altera as condições locais da atmosfera, o que permite a maior incidência de raios solares e também a maior retenção de calor na superfície, aumentando a ação do efeito estufa.

Os ecossistemas fechados como ilustrado na Figura 1, e outros ambientes preservados apresentam variados mecanismos autoreguladores, que visam garantir a preservação adequada do meio. Alguns desses processos são bastante conhecidos, tal como a ressurgência das águas. A introdução de uma construção artificial, como uma ponte, em um ambiente nativo pode modificar a ocorrência natural desses mecanismos.

No caso da construção de pontes metálicas, deve-se ainda somar um item à vasta lista de fatores indutores de impactos ambientais. As estruturas metálicas, independentes de sua composição, estão sempre sujeitas à corrosão se o meio for propício. A corrosão, enquanto parte de um processo eletroquímico, libera íons no meio ambiente, alterando, dessa maneira, o balanço iônico do meio. Estes já são suficientes para modificar o equilíbrio osmótico dos seres vivos, exigindo deles um maior esforço metabólico a fim de manterem sua sobrevivência. A aplicação de materiais anticorrosivos e *coating system* não são suficientes para inibir essa alteração, uma vez que estes são materiais baseados em compostos orgânicos que liberam íons ou mesmo em outros metais.



Figura 1. Ponte sobre o Córrego do Ouro, em Minas Gerais, Brasil, com os pilares em concreto armado e tabuleiro em estrutura metálica sobre um ecossistema fechado.

A Figura 2 ilustra um exemplo de uma ponte de pilares em concreto armado situada num ambiente nativo dotado de ecossistemas terrestres e aquáticos.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel



Figura 2. Ponte sobre a represa do Peti, Minas Gerais, Brasil, inserida em ecossistemas terrestres e aquáticos.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

A corrosão microbiológica nas pontes metálicas

A corrosão microbiológica é uma importante causa de corrosão em pontes e viadutos. A variabilidade genética e fisiológica existente dentre os microrganismos, principalmente bactérias, permite que determinados grupos se instalem em estruturas de obras-de-arte especiais, podendo lhes causar sérios danos. Os mecanismos são variados, podendo ocorrer desde a liberação de metabólitos corrosivos até a criação de um microambiente com condições físicas diferenciadas, determinando um potencial físico que pode ser o início de um processo de corrosão eletroquímica. A formação de biofilmes, como ilustrado na Figura 3, e agregados biológicos, tende a aumentar os níveis de corrosão, ao mesmo tempo em que dificulta a remoção dos seres ali presentes (BORENSTEIN, 1994).

O mesmo processo se verifica quando surge alguma vegetação ao redor de um tubulão, conforme indicado na Figura 3.



Figura 3. Vegetação ao redor de tubulão de ponte no rio Tocantins, Pará, Brasil.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Os principais fatores influenciadores da colonização microbiológica de uma estrutura relacionam-se às propriedades biofísicas dos organismos, tais como adesão, toxicocinética, etc. Considerando-se estas propriedades, o estudo de certas características das estruturas fornece uma importante fundamentação para se determinar quais delas propiciam um menor crescimento de comunidades, de modo a se otimizar as técnicas construtivas e a engenharia de materiais no sentido de minimizar os prejuízos da corrosão induzida por microrganismos.

Nesse sentido, mostra-se que a colonização de estruturas de concreto por fungos depende diretamente da composição do concreto e é diretamente proporcional à razão água-cimento verificada. Estes resultados corroboram a ideia de que a superfície e o interior de uma estrutura de concreto armado podem fornecer as condições ideais para o desenvolvimento de comunidades microbiológicas (LOURENÇO ET AL, 2009).

A corrosão microbiológica se reflete como um efeito direto ou indireto da ecofisiologia dos microrganismos presentes em determinada região. A ação química destes organismos se baseia por um lado na produção de metabólitos e substâncias quimicamente nocivas às estruturas, como ácidos orgânicos, e, por outro lado, na utilização de componentes estruturais como substrato para seus processos fisiológicos (POSTGATE, 1984).

Em estudos de laboratório, busca-se estudar os efeitos de determinados processos fisiológicos de microrganismos isolados sobre modelos de estruturas previamente definidos. Em ambientes naturais, no entanto, verifica-se um espectro bastante amplo de mecanismos geradores de corrosão por parte de microrganismos, sendo a deterioração observada como resultado de uma combinação de fatores que contribuíram para tal. Este fato dificulta uma análise de elevada precisão sobre processos biocorrosivos específicos em determinadas estruturas (PEDEFERRI, 1996).

Ainda assim, faz-se necessário conhecer e individualizar os mecanismos oriundos de microrganismos que levam à produção de danos e falhas estruturais.

A oxidação de compostos de enxofre exerce a função de fornecer a energia necessária para a produção dos compostos orgânicos, visto que reações de oxidação e combustão são exotérmicas, ou seja, liberam energia. Pode-se observar que a oxidação do enxofre forma ácido sulfúrico, que irá possibilitar a deterioração de metais e do concreto (APPLETON, 1999).

Outro mecanismo causador de corrosão é a redução de sulfato, processo integrante do metabolismo das denominadas bactérias redutoras de sulfato (SRB – “sulfate reducing bacteria”). As bactérias mais evidentes deste grupo pertencem aos gêneros *Desulfovibrio* e *Desulfotomaculum*.

Essas bactérias são classicamente consideradas anaeróbias estritas e obtêm energia a partir da redução de sulfatos inorgânicos a sulfetos ou a enxofre, com a utilização do hidrogênio dissolvido na água. A enzima hidrogenase, sintetizada por essas bactérias, catalisa a reação de quebra do hidrogênio molecular, possibilitando o seu uso em reações de oxirredução.

Algumas bactérias são capazes de promover a corrosão do ferro através de reações que levam à dissolução das camadas da superfície resistentes à corrosão. Esse mecanismo resulta em uma destruição da proteção passiva contra a corrosão e ainda propicia o aumento da taxa de corrosão na superfície.



Microrganismos que se encontram em plena atividade fisiológica podem produzir ácidos orgânicos e inorgânicos como metabólitos oriundos de reações do metabolismo energético ou mesmo em função de reações a estímulos ambientais.

Dentre os ácidos inorgânicos produzidos por seres vivos, os principais indutores de corrosão são ácido sulfúrico, ácido nítrico e ácido carbônico. Os ácidos sulfúrico e nítrico são produzidos principalmente por um grupo restrito de bactérias, que englobam algumas oxidantes de enxofre do gênero *Thiobacillus* e bactérias nitrificantes. Embora o grupo de organismos seja restrito, estes seres se desenvolvem rapidamente em ambientes tecnicamente classificados como agressivos às estruturas.

Em estruturas de concreto, o ácido carbônico pode induzir o fenômeno conhecido como carbonatação, que tem a redução brusca do pH do concreto como uma de suas consequências, permitindo a expansão da comunidade microbiana em um valor de pH tolerável.

Bactérias que produzem grande quantidade de matriz foram descritas como indutoras de corrosão em aço inoxidável. Exemplares desses microrganismos evidenciaram bactérias dos gêneros *Desulfovibrio*, *Clostridium* e *Flavobacterium*, conforme ilustrados na Tabela 1.

Muito tem se estudado a respeito dessa forma de biocorrosão mas pouco se sabe ainda sobre os mecanismos de ação praticados por essas bactérias. Acredita-se que a grande quantidade de matriz não seria responsável pelo processo corrosivo senão auxiliada por uma enzima oxireductase, catalisadora da redução de oxigênio (BORENSTEIN, 1994).

A corrosão induzida por fungos também é devida à produção de ácidos orgânicos, que reagem com os metais, provocando sua deterioração. Os metais mais atingidos pelos ácidos são: o ferro e o zinco. No entanto, há uma significativa diferença de relações ecofisiológicas entre fungos e bactérias, o que causa produção de diferentes ácidos causando diferentes efeitos corrosivos.

Os gêneros mais relacionados com a biocorrosão são *Hormoconis*, *Aspergillus* e *Penicillium*. Muitos dos casos estão relacionados ao metabolismo de hidrocarbonetos combustíveis, o que torna essa forma de corrosão particularmente comum em dutos de combustíveis e estruturas próximas a ambientes atingidos por vazamentos de combustíveis.

A metodologia da pesquisa

A metodologia da pesquisa consiste em se fazer a descrição das condições ambientais, condições estruturais e partes afetadas pela corrosão em um relatório final de inspeção. Principalmente quando se trata de um ambiente nativo ou então um ambiente fortemente agressivo este relatório deve ser bem mais detalhado informando os procedimentos de recuperação em cada caso. Todos os fatores ambientais e climáticos, sejam eles momentâneos ou permanentes, que puderem ser observados, devem ser descritos. Considerando-se um processo periódico de manutenção, esses dados podem permitir a compreensão da evolução de uma determinada patologia (KLATTER AND NOORTWIJK, 2002). Serão utilizados os ensaios de líquido penetrante, o ensaio de ultra som, o ensaio radiográfico, o ensaio de indicação de pH, e a técnica dos potenciais eletroquímicos.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

O ensaio por líquido penetrante abrange a detecção de descontinuidades na superfície do material. Essas descontinuidades podem ter sua origem em processos corrosivos ou em problemas de ordem mecânica. Este método se mostra bastante eficiente nas suas aplicações em materiais não-porosos, como em superfícies metálicas. O método se baseia na penetração de um líquido, denominado líquido penetrante, na abertura da descontinuidade (Figura 4). Retira-se então o excesso do líquido e, posteriormente, utiliza-se um revelador para retirar o líquido retido. Dessa maneira, a imagem da descontinuidade fica marcada na superfície da estrutura, podendo ser avaliada (Figura 4).



Figura 4. Aplicação do revelador em barra metálica de ponte no Pará, Brasil.

O ensaio de ultra-som consiste no direcionamento de um feixe de ondas ultra-sônicas ao material que deseja ser analisado. Pode ser utilizado em grande parte dos materiais presentes em obras-de-arte especiais, embora seja mais utilizado em materiais metálicos.

O mecanismo do teste se baseia na geração de uma onda (pulso) de ultrassom por um transdutor acoplado a uma face do metal. As ondas refletidas por uma descontinuidade são percebidas pelo transdutor e transformadas em sinais eletrônicos, exibidos na tela do aparelho. A frequência das ondas pode ser modelada de acordo com a profundidade e o grau de percepção de descontinuidades que se deseja atingir. Quanto maior a frequência, maior o grau de percepção e menor a profundidade atingida (SCHIESSL, 1988).

Embora seja um ensaio com vasta possibilidade de aplicação e seus resultados sejam bastante confiáveis, o teste de ultra-som se mostra bastante específico cujos resultados podem ser de difícil interpretação. Portanto, deve ser utilizado em situações cuja especificidade necessite e realizado por um profissional experiente.

O ensaio de raio-X, ou ensaio radiográfico, é baseado na variação da atenuação da radiação eletromagnética, causada pela presença de descontinuidades durante a passagem da radiação pela peça, sendo a imagem registrada em um filme radiográfico ou em um sistema de radioscopia que mostre o resultado em um monitor de televisão.

Esse método não é muito utilizado na inspeção de pontes, pois seus resultados carecem de detalhes sobre a caracterização da descontinuidade. Além disso, algumas descontinuidades não são registradas na radiografia, por estarem paralelas à fonte de radiação.



O ensaio de indicação de pH é realizado em pontes de concreto armado e visa a detecção do avanço da frente de carbonatação. Consiste no emprego de substâncias indicadoras ácido-base, como a fenolftaleína e a timolftaleína. Essas substâncias, ao entrarem em contato com o meio alcalino do concreto, adquirem colorações características.

A determinação da frente de carbonatação é feita a partir da diferença de coloração do indicador em pontos do concreto. Colorações mais claras indicam a presença de carbonatação. Em concretos totalmente carbonatados, o indicador tende a permanecer incolor (Fontana, 1967). A aplicação desse método é considerada suficiente para uma análise eficaz do processo de carbonatação em uma estrutura. A técnica de potenciais eletroquímicos consiste na medição e no registro dos potenciais eletroquímicos ao longo da estrutura de concreto armado. Posteriormente, pode-se estabelecer um mapa de potenciais, que corresponde a um gráfico de curvas equipotenciais aplicados à estrutura. A análise desse mapa permitirá observações sobre o estado de deterioração das armaduras do concreto armado.

As inferências obtidas dessa forma de avaliação devem ser qualitativas e não quantitativas, pois até o momento não se verificaram relações numéricas entre a diferença de potencial eletroquímico em uma área e o a profundidade ou extensão da deterioração do material.

Ainda nas investigações da corrosão microbiológica, objetivo principal da metodologia da pesquisa, a Tabela 1 fornece para as obras civis de pontes em concreto e metálicas a comparação entre condições ambientais para a corrosão microbiológica e faixas de temperatura e faixas de pH do ambiente nativo onde estão inseridas as peças estruturais das pontes analisadas (FONTANA, 1967).

Tabela 1 – Comparação entre condições ambientais para a corrosão microbiológica em estruturas de concreto e aço.

Fenômeno	Faixa de Temperatura	Faixa de pH
Corrosão química de armaduras em pilares	Temperatura ambiente	12,5
Sistemas de resfriamento	Entre 20 e 80° C	7 e 8
Corrosão por bactéria <i>Desulfovibrio</i> – biofilme formado em aparelhos de apoio	Entre 30 e 40° C	Depende do meio local
Corrosão por bactéria <i>Desulfovibrio</i> – bastonetes livres	Entre 25 e 44° C	5,5 a 8,5
Algas, fungos e outras bactérias	0 a 40° C	5,5 a 9,0
Bactérias termofílicas	Acima de 50° C	6,0 a 11,0
<i>Thiobacillus</i>	55 a 66° C	Baixo pH, em torno de 2,0



A Tabela 2 fornece o índice de corrosividade em função do potencial redox, onde estes valores são observados especialmente em partes estruturais de pontes imersos em ambientes agressivos.

Tabela 2 – Índice de corrosividade em função do potencial redox. Valores podem ser aplicados para corrosão de origem biológica especialmente em ambientes agressivos (FONTANA, 1967).

Potencial Redox (mV)	Grau de corrosividade
< 100	Intensa
100-200	Moderada
300-400	Discreta
>400	Ausente

Todo o levantamento das anomalias encontradas no universo das obras de arte especiais constituiu um documento importante para os passos subsequentes das execuções dos trabalhos relacionados com a metodologia pertinente ao processo de recuperação e reforço estrutural.

As patologias observadas nas obras de pontes se inserem nos parâmetros estruturais, funcionais e durabilidade (LOURENÇO, 2007). Elas estão interligadas, pois qualquer parâmetro de uma classe interfere na outra classe, tanto em sentido direto como reverso. Dentro destas três classes de parâmetros que envolvem os mais diversos tipos de patologias, ainda são designadas as partes principais que compõem a obra de arte como um todo, quais sejam a superestrutura (vigas e lajes), mesoestrutura (pilares e aparelhos de apoio), infraestrutura (blocos de coroamento, tubulões e estacas), encontros, complementos (juntas de dilatação, dormentes e elementos de drenagem) e pista de rolamento.

Tais interpretações dos resultados dependeram do estado de degradação da peça analisada, dos ensaios feitos e da sua importância em não gerar novas patologias de segunda ordem em outros elementos. Os níveis de ocorrência acompanham a necessidade de intervenção de recuperação da forma direta.

Conclusões

Muitas incidências patológicas poderiam ser evitadas caso fossem aplicados antecipadamente os conhecimentos relativos às suas causas, especialmente na fase de projeto da ponte, já constituindo, de fato, uma medida de prevenção. Observa-se, entretanto, que em todas as patologias encontradas existe um processo de interrelacionamento entre elas, caracterizando uma sobreposição e uma potencialização de seus efeitos na realidade. Qualquer patologia na infra-estrutura reflete seus efeitos na meso e na superestrutura, mesmo de naturezas diferentes e graus de potencialização. Qualquer deficiência da drenagem, na superestrutura causa um agravamento das condições de durabilidade na infraestrutura, em face da percolação da água por diversos pontos da obra de arte em geral. Isto potencializa o fenômeno da corrosão metálica em seus amplos aspectos e piorando os problemas de natureza estrutural. Geralmente, um simples problema de manutenção desencadeia problemas mais abrangentes



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

que tocam a área da segurança estrutural, causando um estado geral de comprometimento das peças estruturais envolvidas. Claramente, se percebe que a durabilidade é sempre um fator direto da manutenção e prevenção.

No campo da corrosão metálica o mais relevante é que as causas e os meios de propagação das patologias sejam cessados, para que os mecanismos de deterioração sejam imediatamente interrompidos. Isto reflete na substituição de aparelhos de apoios, limpezas das áreas atacadas pela corrosão induzida por microorganismos, recuperação das partes de drenagem corroídas, inserção dos dutos de escoamento das águas, raspagens de áreas afetadas, introdução de tintas anticorrosivas, substituição de peças metálicas corroídas e inserções de chapas de base por ligações soldadas e muitos outros. Entende-se que este trabalho tenha contribuído com um estudo abrangente da corrosão microbiológica, das incidências patológicas em estruturas metálicas, o processo de como se originam e se propagam bem como suas consequências finais no âmbito geral da obra de arte envolvida.

Referências bibliográficas

- APPLETON, J. BRIDGE INSPECTION AND ASSESSMENT. Proceedings of IABSE Symposium, Rio de Janeiro. 1999.
- BORENSTEIN, S. W. Microbiologically Influenced Corrosion Handbook. Industrial Press, New York, USA. 1994
- FONTANA, G. M., GREENE, D. N. Corrosion Engineering. McGraw-Hill, New York, USA. 1967.
- KLATTER, H. E.; VON NOORTWIJK, J. M.; ECK, N. V. Bridge management in the Netherlands: prioritization based on network performance. Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Barcelona, Spain. 2002.
- LAMBERT, P. ; PAGE, C. ; VASSIE, P. R.W. Investigation of reinforcement corrosion: electrochemical monitoring of steel in chloride contaminated concrete. Material Structure. vol. 24, p. 351-358. 1991.
- LOURENÇO, L. C. Análise da corrosão em estruturas de pontes metálicas e de concreto armado. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil. 2007
- LOURENÇO, L. C.; ALVES, V. R.; JORDY, J. C.; MENDES, L. C.; LOURENÇO, M. V. C. Parâmetros de avaliação de patologias em obras de arte especiais. Engenharia Civil Universidade do Minho, Braga, Portugal, vol. 34, p. 5-14. 2009.
- LOURENÇO, L. C.; LOURENÇO, M. V. C.; MENDES, L. C. Análise do Impacto ambiental da construção de pontes e viadutos sobre ambiente aquático e ambientes terrestres nativos. Proceedings of Seminário Fluminense de Engenharia, Niterói, Novembro. 2007.
- MENDES, L. C. Pontes. Editora da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil. 2003.
- ODUM, E. P. Ecologia. Ed. Guanabara Koogan. Rio de Janeiro. Brasil. 1998.
- PEDEFERRI, P. Cathodic protection and cathodic prevention. Construction and Building Materials, vol. 10, p. 391-402. 1996.
- POSTGATE, J. R. The Sulfate-Reducing Bacteria. Cambridge University Press, Cambridge, England. 1984.
- SCHIESSL, P. Corrosion of steel in concrete. Report of Technical Committee. Ed. Chapman & Hall, USA. 1988.