



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

Corrosão Microbiologicamente Induzida em superfícies metálicas: um levantamento histórico

Microbiologically Induced Corrosion on metal surfaces: A historical survey

Denis Emanuel Garcia de Almeida*, José Carlos Alves Galvão[†],

Mariana Isabeli Valentim[‡], Karoline Caetano da Silva[§].

RESUMO

Este levantamento reúne conteúdo bibliográfico contextualizado relativo a corrosão e seus agentes atuantes, com enfoque na corrosão microbiologicamente induzida ocasionada por microrganismos específicos pioneiros atuantes no processo e suas consequências para o meio na qual se encontram. Portanto, tendo em vista o estudo aprofundado de suas contribuições em distintos cenários, a compreensão de suas interações individuais se vê necessária. Logo, o estudo abordado tem por finalidade conglomerar informações que corroborem no entendimento quanto ao funcionamento dos processos de corrosão microbiológica em superfícies metálicas, como pré-requisitos de proliferação e consequência dos agentes causadores. A partir da base de dados do Periódico CAPES, com prioridade por data e área de campo estudada, tal levantamento teve como resultado a obtenção de um livro base, fundamental para elaboração do corpo do estudo, e outros três documentos suporte, responsáveis pela incorporação de informações mais específicas e atuações em situações similares, em paralelo também foram utilizados nove artigos como complemento informativo. A união das informações corroborou na verificação dos fatores por trás da fixação e expansão microbiológica, como o biofilme e obtenção de energia respectivamente, bem como o funcionamento dos indivíduos proeminentes atuantes que contribuem para a corrosão, como seus metabólitos corrosivos.

Palavras-chave: Biodegradação, digestão anaeróbia, metagenômica.

ABSTRACT

This survey brings together contextualized bibliographic content related to corrosion and its acting agents, with a focus on microbiologically induced corrosion caused by specific pioneer microorganisms acting in the process and its consequences for the environment in which it is requested. Therefore, considering the in-depth study of their contributions in different scenarios, the understanding of their individual interactions is necessary. Therefore, the study addressed has as a conglomerate information that corroborates the understanding of the functioning of microbiological corrosion processes on metal surfaces, as prerequisites for proliferation and a consequence of the causative agents. From the database of the CAPES Journal, with priority for data and field area studied, this survey resulted in the obtainment of a base book, essential for the preparation of the body of the study, and three other supporting documents, responsible for the incorporation of more specific information and actions in similar situations, in parallel, nine articles were also used as an informative complement. The pooling of information corroborated the verification of factors behind microbiological fixation and expansion, such as biofilm and energy acquisition respectively, as well as the functioning of the prominent acting requirements that contribute to corrosion, such as its corrosive metabolites.

Keywords: Biodegradation, anaerobic digestion, metagenomics.

* Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; denisemanuel2011@gmail.com

[†] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; galvao@utfpr.edu.br

[‡] Ciências Biológicas; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; mariana.valen.tim@hotmail.com

[§] Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; karoline.kaitano@hotmail.com



1 INTRODUÇÃO

A corrosão não é um processo novo e sua interação com o cotidiano humano nunca foi um ponto positivo, e para a corrosão microbiológica não é diferente, levando em consideração que ela é um importante fator causador de corrosão em estruturas de concreto, pontes e viadutos, tubulações e inúmeras superfícies do âmbito industrial que necessitem do constante contato com a água. A variabilidade genética e fisiológica existente dentre os microrganismos, principalmente bactérias, permite que determinados grupos se instalem em estruturas especiais, podendo lhes causar tanto danos insignificantes a curto prazo como danos catastróficos a longo prazo, respectivamente. Os mecanismos para um processo de corrosão microbiologicamente ativada 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 corrosivo.

Os principais fatores influenciadores da colonização microbiológica de uma estrutura relacionam-se às propriedades biofísicas dos organismos, tais como adesão relacionadas ao biofilme, biofilmes estes considerados os alicerces existentes para tal desempenho, e condições ambientais favoráveis em sua grande maioria. Considerando-se estas propriedades, o estudo de tais características estruturais fornece uma importante fundamentação para se determinar quais delas propiciam um crescimento retardado de comunidades e até mesmo uma possível informação para anulação de sua propagação nociva, de modo a se minimizar os prejuízos da corrosão microbiologicamente induzida.

Apesar de não terem sido encontrados estudos extensivos deste tipo para a realidade brasileira, a Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) estimou que a corrosão seja responsável por um custo anual de 3 % do PIB (2018), aproximadamente R\$ 280 Bilhões, sendo que 60% deste valor é inevitável para manutenção. Nesse caso percebe-se que, segundo a mesma instituição, caso as medidas de proteção contra corrosão sejam devidamente aplicadas, depois de deduzidos os custos de aplicação destas medidas, a economia poderia ser de pelo menos R\$ 112 Bilhões (AL’KIM, 2020).

O levantamento de informações abaixo portanto, é uma necessidade para que haja a formação de uma base de conhecimento que propiciará no melhor aproveitamento e visão geral das problemáticas abordadas sob o tema posteriormente descrito de forma mais aprofundada, bem como um melhor entendimento dos microrganismos atuantes no cenário biocorrosivo.

2 MÉTODO DE LEVANTAMENTO

Inúmeras são as características de relevância existentes para se levar em consideração quando é analisada uma literatura. Para melhor visualização de tais fatores, foram utilizadas plataformas online conhecidas como periódicos. Dentre elas, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), uma fundação do Ministério da Educação (MEC) que é atualmente considerada um modelo exclusivo de consórcio de bibliotecas e reúne um acervo com atualmente mais de 37 mil títulos, foi preferencial.

Para consulta, o tópico inicial para afunilamento avançado se iniciou com títulos contendo palavras-chave referentes ao tema (*‘microbially’*; *‘microbiologically corrosion’*; *‘corrosion by microorganisms’*). Para melhor estruturação, se viu necessária a obtenção e posterior utilização de um livro base, sendo este portanto o enfoque, seguido logo após por artigos de suporte, e por ultimo os artigos complementares de termos a serem aprofundados de acordo com a necessidade proposta pelo estudo. O critério utilizado na seleção de tais obras foi a especificidade e aprofundamento no tema a ser analisado, seguido pela nota atribuída à obra na Plataforma



(A1, A2, B1, B2, B3, B4, B5 e C) e por conseguinte a data de publicação (não foi estipulado um intervalo máximo aos quais as obras deveriam estar inseridas).

3 RESULTADOS

Durante a primeira análise, avaliando títulos com os termos propostos e sem um período de publicação máximo da data de pesquisa, se encontraram elegíveis 516 documentos, dos quais um (1) é o livro de origem inglesa do ano de 1997, com revisão atualizada. Dos documentos restantes, foram selecionados os que tinham alguma relação com a realidade encontrada em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), como estudos sobre corrosão em ambientes ricos em condições de desenvolvimento dos microrganismos ou similares.

Ao fim do processo, foram reunidos, portanto, um total de 13 materiais, sendo eles dois (2) livros, três (3) dissertações, uma (1) tese, um (1) artigo, quatro (4) publicações de revistas científicas, uma (1) monografia e um (1) slide complementar. Os documentos utilizados para a estruturação do levantamento e o enfoque observado em cada um deles, respectivamente, se encontram no Quadro 1, disposto em anexo.

No quadro nota-se também um entrelaçamento informativo das bibliografias acima quanto aos assuntos abordados, propício para complementação das informações adquiridas no decorrer do entendimento da problemática.

Fixação e processo aderente

Segundo os autores, para a existência da corrosão microbiologicamente induzida, é necessário um ambiente com condições apropriadas para o indivíduo atuante, indivíduos estes com características físico-químicas de desempenho e desenvolvimento com valores diferentes em pH, concentração de sais, potencial condutivo e concentração de oxigênio. Eles também, como quaisquer outros, têm características que os permitem viver onde costumam ser encontrados, sendo características como: oxidantes ou redutores; processo de respiração celular (aeróbica ou anaeróbica); agente oxidante (Sulfato, Enxofre, Nitrato ou Ferro).

Quanto a criação de ambientes com presença ou ausência de oxigênio, poros em uma estrutura submersa pode propiciar sítios para a adesão microbiana e regiões de aeração diferencial, fazendo com que sejam possíveis a existência de microrganismos com metabolismos aeróbico e anaeróbico, relacionando diretamente a região nas quais as corrosões são encontradas e seu funcionamento a partir disso. Para a adesão de tais indivíduos, por sua vez, os microrganismos têm a capacidade de se fixar em uma superfície pois se imbuem em uma substância polimérica extracelular aderente (SPE), substância esta que contém estruturas como DNA, lipídeos, proteínas e carboidratos liberados pelas bactérias para estruturar algo similar ao limo, formando o chamado biofilme. Somando-se a isso a deposição de matéria orgânica presente no meio e o subsequente espessamento e sobreposição de tais camadas, é possível encontrar biofilmes muito finos (com apenas algumas poucas camadas microscópica/micro camadas) ou até mesmo biofilmes com alguns centímetros de espessura, sendo o último também conhecido como esteira microbiana. “A formação de biofilmes e agregados biológicos, tende a aumentar os níveis de corrosão, ao mesmo tempo em que dificulta a remoção dos seres ali presentes. “(BORENSTEIN, 1994). Com toda uma diversidade e estrutura de fixação estável, o que nos deparamos é uma grande variedade de seres vivos num mesmo ambiente, desde pequenas comunidades de microrganismos como bactérias aeróbicas e anaeróbicas, até pequenos vermes dependendo da localidade.



Indivíduos participantes

Quanto aos agentes observados nas bibliografias abordadas, é de consenso em uma grande parte delas que dos inúmeros microrganismos presentes, foram as bactérias que conquistaram o apogeu biocorrosivo. As bactérias que mais atuam no processo de corrosão microbiologicamente ativada são as bactérias redutoras de Sulfato, as bactérias redutoras de Nitrato, as bactérias oxidantes de Ferro e as bactérias oxidantes de Enxofre.

Dentre elas, as bactérias redutoras de Sulfato estão entre os principais agentes corrosivos, pois se encontram disseminados em ambientes variados, como água doce e salgada e o solo, mas são mais relevantes em habitat marinho devido à alta concentração de sulfato na água do mar. Essas bactérias apresentam flagelo polar, uma morfologia de bacilos curvos, às vezes espiralados e com diâmetro entre 0,5 e 1,0 μm e comprimento de 3,0 a 5,0 μm , respectivamente. São anaeróbicos restritos, por essa razão geralmente estão associadas às bactérias aeróbicas, que consomem todo o oxigênio do sistema, proporcionando uma condição de anaerobiose. A temperatura ótima para o seu desenvolvimento é de 25°C e 44°C e, pH na faixa de 5,5 a 9,0.

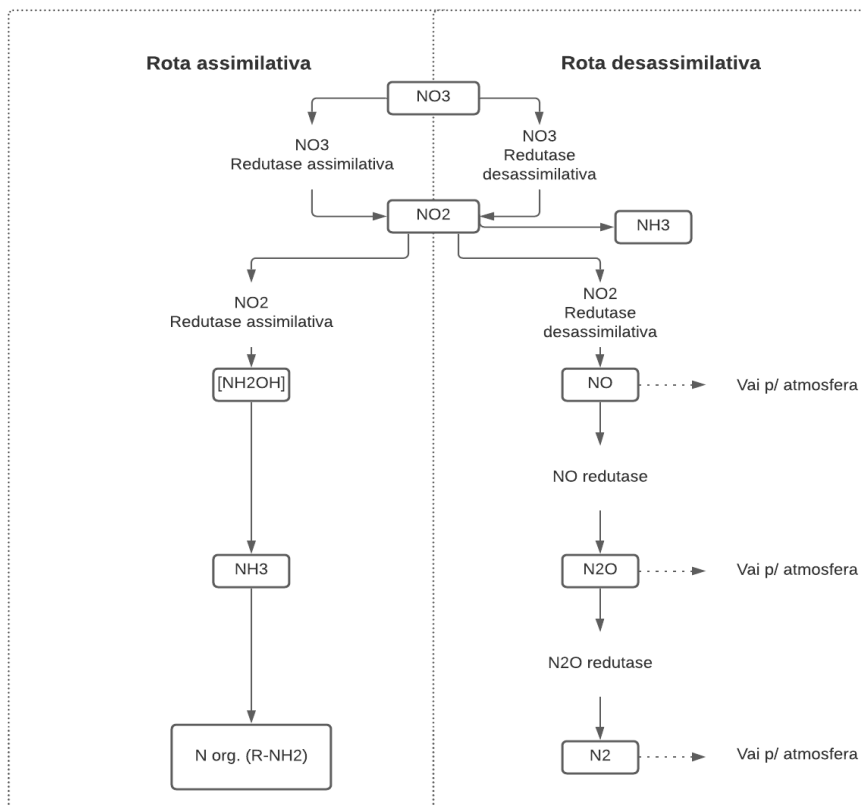
As bactérias oxidantes de Enxofre são por sua vez microrganismos aeróbicos que se locomovem através de um único flagelo polar, não formam esporos e se apresentam normalmente como células isoladas. Essas bactérias são classicamente consideradas anaeróbias estritas e obtêm energia a partir da redução de sulfatos inorgânicos a sulfetos ou a enxofre, com a utilização do hidrogênio dissolvido na água. Embora sua temperatura ótima de crescimento seja entre 20°C e 30°C, existem também variedades termófilas que crescem a temperaturas superiores a 55° C. Como consequência gera condições muito agressivas, não somente para os metais, como também para pedras e concreto armado de construção. “O enxofre pode ser encontrado também em diversos estados de oxidação nos compostos orgânicos e inorgânicos.” (GIBSON, 1990).

A corrosão microbiologicamente induzida por bactérias oxidantes de ferro é causada por um grupo heterogêneo (Videla, 2003) de microrganismo (podendo ser bactérias do gênero *Gallionella*, *Sphaerotilus* e *Leptothrix*), essas bactérias são capazes de oxidar o íon ferroso (Fe^{2+}) a férrico (Fe^{3+}). A oxidação do ferro é feita pela bactéria para obter energia, ao consumir o O_2 presente no biofilme a bactéria cria uma célula de aeração diferencial, com a concentração do O_2 do meio inalterada e sem O_2 dentro do biofilme, assim a zona sem O_2 comporta-se sob condição anodo, criando pontos potenciais de ataque do metal. Os microrganismos responsáveis por esse tipo de corrosão são oxidantes de íons metálicos (ferro, manganês), eles criam ambientes agressivos para o ferro e suas ligas, pois aumentam a concentração do íon cloreto, formando sais. Esse tipo de corrosão é grave, pois ocorre predominantemente em forma de pites e principalmente em tubulações de ferro fundido, sendo que na parede interna do tubo aparecem tubérculos, que são formados pela precipitação do hidróxido de ferro associado com outros compostos de ferro. Assim é criado o microambiente que as bactérias necessitam para crescer, a zona anaeróbica. Nessas zonas ainda estão presentes sulfetos e outros derivados, com a presença desses compostos intensificando a CMI atual.

Por ultimo, as bactérias redutoras de nitrato (BRN) normalmente são microrganismos anaeróbios facultativos que, em condições limitantes de oxigênio, realizam a respiração anaeróbia do NO_3/NO_2 com geração dos gases NO , N_2O e N_2 , processo denominado desnitrificação. A maioria desses microrganismos são quimiorganotróficos e, portanto, utilizam carbono orgânico como fonte de carbono e doador de elétrons. “Como exceção, tem-se as bactérias redutoras de nitrato (desnitrificantes) oxidantes de enxofre (BRN-OS) que, normalmente, são anaeróbias facultativas e que, em sua maioria, crescem preferencialmente em aerobiose, ou seja, utilizando O_2 como aceptor final de elétrons.” (MADIGAN et al., 2016). “A desnitrificação de NO_3 . a N_2 exige várias etapas enzimáticas, sendo que a maioria das BRN são incapazes de realizar a redução total, pois possuem apenas parte da via de desnitrificação.” (MADIGAN et al., 2016). A redução do nitrato pode ser

tanto por processo assimilativo quanto desassimilativo, assim como ocorre para a redução do sulfato, como observado na Figura 1, disposta abaixo.

Figura 1- Rotas do Nitrato



Fonte: autoria própria (2021).

Este processo libera uma quantidade significativa de gás para a atmosfera, sendo mais nitidamente percebido do que os demais anteriormente citados.

4 CONCLUSÃO

Por meio da análise sistemática informativa das bibliografias foi possível compreender a fundação e desenvolvimento das condições para o processo biocorrosivo, bem como os seres atuantes nas etapas relacionadas à degradação da superfície a qual estão situados. A corrosão microbiologicamente induzida tem ganhado atenção ao decorrer da década, fato este que tende ainda a permanecer para a década futura, considerando a gravidade e dificuldade de solucioná-la por definitivo.

De acordo com a análise das informações obtidas no decorrer do processo foi possível concluir que, o fator comum de maior prejudicialidade dos microrganismos citados é o seu metabólito altamente corrosivo, fator chave que, somado a facilidade de proliferação e desenvolvimento em inúmeras condições físicas e químicas, dificulta a resolução do problema. A relevância de tais fatores pôde também ser evidenciada no fato de que a corrosão microbiologicamente induzida em superfícies presentes em locais fechados e de difícil acesso, como interior de tubulações e tanques, acaba por ser o gasto cardinal durante reparos frequentes, de modo que a evidência da biocorrosão só é percebida em estágios avançados com alto prejuízo infraestrutural.

Para tal, a junção informativa contribuiu para com seu objetivo inicial de complementar o entendimento do grupo de pesquisa acerca do assunto. Considerando, portanto, um cenário posterior experimental, o acervo



com enfoque nos microrganismos de maior papel agressivo para com os materiais estudados terá maior relevância para estudo. Isto posto, o levantamento aqui abordado contribui para toda a comunidade científica, dando a ela suporte material com uma capacidade prática de direcionamento e compreensão em torno do viés aqui utilizado.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. C.; ANDRADE, C.; NEVES, B. *Biocorrosão- da integridade do biofilme à integridade do material. Corrosão e proteção de materiais*, Rio de Janeiro, volume 33, páginas 18-23, fevereiro de 2014.
- AL'KIM QUIMICOS BRASIL. **Os efeitos e impactos econômicos da corrosão na indústria**. 29/04/2020. Disponível em: <<https://www.alkim.com.br/post/os-efeitos-e-impactos-econ%C3%B4micos-da-corros%C3%A3o-na-industria>>. Acesso em: 10 julho, 2021.
- BRANDT, Emanuel Manfred F.; SOUZA, Cláudio L.; CHERNICHARO, Carlos Augusto L. Alternativas para o controle de odores e corrosão em sistemas de coleta e tratamento de esgoto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, volume 22, páginas 611-623, Jul/Ago 2017.
- BRAUNSTEIN, Sonia; ALVES, Walt; FIGUEIREDO, Leila. *Corrosão em guarda-corpos de aço carbono não revestidos, em uma estação de tratamento de esgoto. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, São Paulo, volume 11, páginas 80- 89, 2011.
- BEECH, Iwona *et al. Microbially Influenced Corrosion of Industrial Materials: Biocorrosion network*. 2000.
- Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**, IX, 2016, Everest Rio Hotel. *Corrosão por microrganismos observada em pontes metálicas brasileiras*. Rio de Janeiro: 2016.
- DA SILVA, L. G. *Corrosão microbiologicamente influenciada em superfícies metálicas expostas à água de processo industrial de usinas hidrelétricas*. 2015. 286 f. Tese (Conclusão de Doutorado em Microbiologia), Universidade De São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2015.
- DOS SANTOS, V. V. C. M. *Efeito do nitrato em função da temperatura na geração biogênica de H₂S em reservatórios de petróleo*. 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Escola Politécnica & Escola de Química, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- FÁTIMA MORAIS, Gisele. Aula 2: Corrosão Microbiológica. Minas Gerais. 2º Semestre de 2016. apresentação em slide. 5 slides, color. Disponível em: http://www.tecquimica.cefetmg.br/galerias/arquivos_download/1_-_corrosxo_microbiolxgica.pdf. Acesso em: 12 de julho de 2021.
- FRANCO BATISTA, L. L. *Estudo de comunidade microbiana de bactérias Redutoras de Sulfato in vitro com água produzida de petróleo*. 2013. 74 f. Dissertação (Graduação em Biotecnologia), Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2013.
- JORDÃO MACUL, V. *Biocorrosão de Materiais*. 2013. 40 f. Monografia (Conclusão de Graduação em Engenharia Bioquímica), Universidade de São Paulo, Lorena, São Paulo, 2013.
- KUHN, Claudio R.; FOSTER, Helena B.; OSWALD, Caroline; TORALLES, Ricardo P.; VAZ, Bernardo dos S. *Avaliação do processo de biocorrosão de ligas metálicas em diferentes corpos hídricos. Revista THEMA*, volume 17, páginas 782-790, 2020.
- LITTLE, Brenda J.; WAGNER, Patricia A.; MANSFELD, Florian. **Microbiologically Influenced Corrosion**. Houston: NACE International, 1997.
- MARIA BEZERRA, H. *Fungos filamentosos na água e formando biofilmes na rede de distribuição de água potável do sistema Alto do Céu*. 2010. 81 f. Dissertação (Pós Graduação em Biologia de Fungos), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2010.