

CORROSÃO MICROBIOLOGICAMENTE INDUZIDA EM ESTRUTURAS DE SANEAMENTO:
COMUNIDADE MICROBIANA*Microbiologically Induced Corrosion in sanitation structures: microbial community*Natália Salamoni¹, Gustavo Gutierrez de Oliveira Rodrigues², Abrahão Bernardo Rohden³**Resumo**

A corrosão microbiologicamente induzida (CMI) é a principal causa da biodeterioração do concreto nos sistemas sanitários. O biofilme aderido à superfície dessas estruturas de concreto é o agente responsável por essa biodeterioração que apresenta riscos para a saúde e o meio ambiente. Além de água, o biofilme também é constituído por substâncias poliméricas extracelulares e, na maioria dos casos, por inúmeras espécies de microrganismos. O avanço das técnicas moleculares é fundamental para análise da comunidade microbiana presente na CMI do concreto. Dessa forma, o presente artigo busca fornecer uma revisão do estado da arte sobre a CMI do concreto de sistemas de esgoto e as bactérias envolvidas. Com isso, espera-se caracterizar os microrganismos envolvidos no processo para melhor compreensão do fenômeno e desenvolvimento de novas tecnologias para sua prevenção e mitigação.

Abstract

Microbiologically induced corrosion (MIC) is the main cause of concrete biodeterioration in sanitary systems. The biofilm adhered to the surface of these concrete structures is the agent responsible for this biodeterioration, which poses risks to health and the environment. In addition to water, the biofilm is also made up of extracellular polymeric substances and, in most cases, by numerous species of microorganisms. The advancement of molecular techniques is fundamental for the analysis of the microbial community present in the MIC of concrete. Thus, this article seeks to provide a review of the state of the art on the MIC of concrete in sewage systems and the bacteria involved. With this, it is expected to characterize the microorganisms involved in the process for a better understanding of the phenomenon and development of new technologies for its prevention and mitigation.

Palavras-chave:

bactérias; biofilme; concreto; bactérias redutoras de sulfato; bactérias oxidantes de enxofre.

Keywords:

bacteria; biofilm; concrete; sulfate-reducing bacteria; sulfur oxidizing bacteria.

¹Doutoranda em Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, FURB, nasalamoni@gmail.com

²Doutorando em Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, FURB, gustavogutierrez01@hotmail.com

³Professor Doutor em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FURB, abrcivil@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais se tem comentado em reduzir os impactos ambientais, adotando novas tecnologias e alternativas em prol do meio ambiente. Para isso, a sustentabilidade das construções precisa ser analisada em todas as suas etapas, desde a escolha dos materiais a serem utilizados até as perdas do processo e destinação final dos rejeitos.

De acordo com o diagnóstico dos serviços de água e esgoto levantado em 2019 pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, cerca de 83,7% da população brasileira já estava sendo atendida pelo serviço de abastecimento de água, enquanto apenas 54,1% eram atendidas com coleta de esgoto, sendo a região norte a mais afetada em ambos os casos (BRASIL, 2020a).

O diagnóstico ainda apresenta índices de tratamento dos esgotos gerados e dos coletados. Estimando o volume de esgoto gerado como sendo o mesmo de água consumida, apenas 49,1% dos esgotos gerados foram tratados. Já, em relação ao esgoto coletado, cerca de 78,5% do volume foi tratado (BRASIL, 2020a).

Relacionado a isso, em julho de 2020 foi decretada a Lei Federal nº 14.026, prezando por novos investimentos no sistema de saneamento do país, a curto prazo. Com atualização do marco legal do saneamento básico, a lei define que os contratos de prestação de serviços públicos do saneamento devem estipular metas de universalização, garantindo que, até 31 de dezembro de 2033, 99% da população tenha acesso à água potável e 90% com acesso a coleta e tratamento de esgotos. Ainda devem ser definidas metas quantitativas de constância do abastecimento, redução de perdas e melhoria dos processos de tratamento (BRASIL, 2020b).

Aliado a essas novas infraestruturas que serão construídas nos próximos anos, e almejando a sustentabilidade, propõe-se a aplicação de novas tecnologias, não só para aprimoramento dos processos sanitários, mas também para conservação desse sistema, permitindo bom funcionamento durante toda sua vida útil. Dessa forma, é importante o conhecimento das manifestações patológicas que podem ocorrer nesses sistemas devido à vários fatores, como projeto, execução, materiais empregados e tempo de serviço do sistema sanitário.

Uma das principais causas da deterioração desses sistemas é a corrosão microbiologicamente induzida (CMI) do concreto (KAUSHAL; NAJAFI; LOVE, 2018). A CMI ocorre nas superfícies dos materiais, pela oxidação microbiana de sulfeto de hidrogênio (H_2SO_4), que resultará na produção de ácido sulfúrico (H_2S), causando a biodeterioração (DING; WEISS; BLATCHLEY, 2017).

A comunidade microbiana atuante na corrosão do concreto é vasta, e o objetivo de muitos estudos têm sido sua caracterização, seja no próprio biofilme corroído do sistema de esgoto (VINCKE et al., 2001; SANTO-DOMINGO et al., 2011; CAYFORD et al., 2012; LING et al., 2014; CAYFORD et al., 2017) ou em amostras de concreto/argamassa submetidas a condições de corrosão em laboratório ou em sistemas sanitários corroídos (OKABE et al., 2007; SATOH et al., 2009; LING et al., 2014; AUGUET et al., 2015; LORS et al., 2018).

Se não tratada antecipadamente, a infraestrutura afetada pela CMI poderá necessitar de reparos, que resultam em um custo elevado de manutenção (WEI et al., 2013; CHENG et al., 2016), podendo ainda suceder em transtorno para a população afetada por falta do serviço sanitário ou problemas na mobilidade urbana, por exemplo.

O meio ambiente também pode ser acometido pela CMI. A deterioração devido à formação dos ácidos é capaz de criar fissuras no concreto, podendo provocar a contaminação dos lençóis freáticos devido a vazamentos de efluentes não tratados (GÓIS, 2016).

Em consideração ao exposto, fica nítida a seriedade dessa biodeterioração, e a importância que deve ser dada à sua prevenção. Dessa forma, o presente artigo aborda uma revisão de literatura sobre os principais microrganismos presentes na CMI, tanto em estruturas de concreto existentes e quanto

em amostras de concreto produzidas em laboratório.

2 CORROSÃO MICROBIOLOGICAMENTE INDUZIDA (CMI)

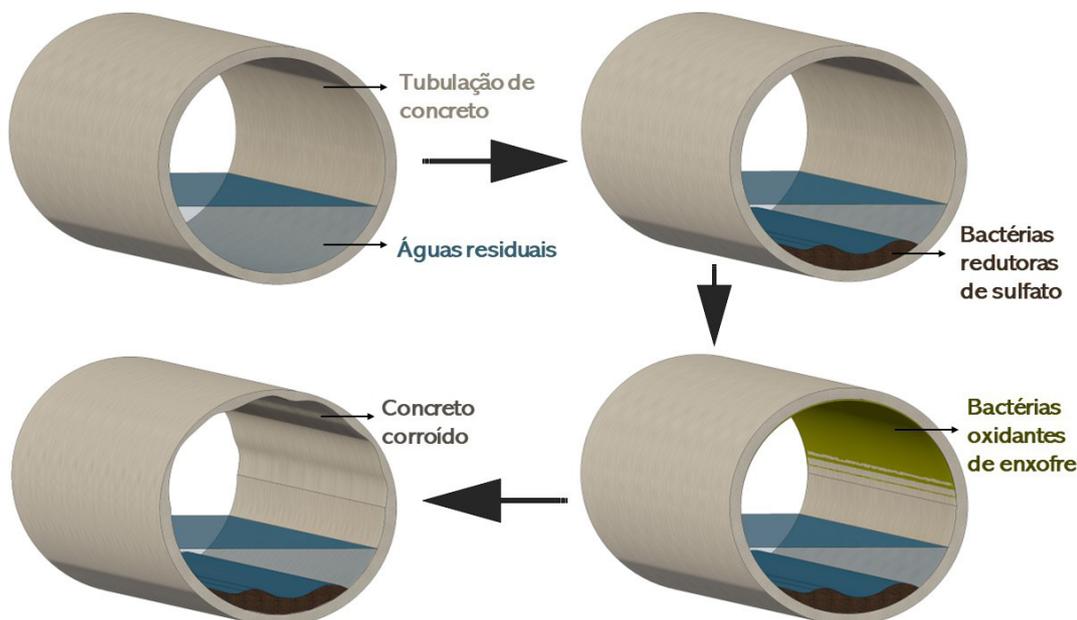
Um dos principais processos da biodeterioração em estruturas de saneamento é a CMI, conhecida na literatura internacional como *microbiologically induced corrosion* (MIC). Tal fenômeno ocorre através da oxidação microbiana de sulfeto de hidrogênio (H_2S) em ácido sulfúrico (H_2SO_4) na superfície do concreto (DING; WEISS; BLATCHLEY, 2017).

Em sistemas de esgoto, uma camada de lama sedimentar e areia é acumulada no fundo nos tubos, levando a formação de uma área com pouco oxigênio disponível. Em conjunto com os compostos de enxofre oxidados presentes no efluente, há produção anaeróbia de sulfeto de hidrogênio (H_2S) pela ação dos bactérias redutoras de sulfato (BRS) submersos no esgoto (HERISSON et al., 2013; CHENG et al., 2016).

O H_2S é liberado para a atmosfera da tubulação e absorvido pela parede úmida do concreto, podendo reagir com a matriz cimentícia e reduzir seu pH, e ainda ser utilizado indiretamente pelas bactérias oxidantes de enxofre (BOE), para produção ácido sulfúrico (H_2SO_4) (ISLANDER et al., 1991; OKABE et al., 2007).

As BOE, em conjunto com o H_2SO_4 corroem o concreto, e os produtos dessa deterioração são a gipsita e etringita (CHENG et al., 2016; GRANDCLERC et al., 2018; MEHTA; MONTEIRO, 1994). A Figura 1 representa o processo da CMI em uma tubulação de concreto de águas residuais.

Figura 1 – Processo da corrosão microbiologicamente induzida (CMI)



Fonte: Autores, 2022.

Em relação ao pH dessa deterioração, Islander et al. (1991) propõe a subdivisão do processo em três estágios. Inicialmente o pH do concreto está na faixa de 12,5 a 14 (MEHTA; MONTEIRO, 1994), impedindo naturalmente a colonização bacteriana. Entretanto, nessa primeira fase, devido a fatores do meio, como carbonatação, lixiviação de cálcio e oxidação atmosférica de H_2S , ocorre a redução do pH para 9-10, diminuindo essa resistência à colonização de microrganismos (ISLANDER et al., 1991; JOSEPH et al., 2012; ERBEKTAS; ISGOR; WEISS, 2019a).

No segundo estágio, devido ao pH do meio, as bactérias oxidantes de enxofre neutrofilicas (BOEN) se fixam na superfície do concreto e iniciam a produção de H_2SO_4 através do consumo de H_2S . Esse processo reduz o pH para valores próximos de 4 (ISLANDER et al., 1991; JOSEPH et al., 2012; ERBEKTAS; ISGOR; WEISS, 2019a). Ainda nesta etapa, as BOEN vão dando espaço as bactérias oxidantes de enxofre acidófilas (BOEA), conforme o pH do meio for acidificando (ERBEKTAS; ISGOR; WEISS, 2019b).

Por fim, no terceiro estágio, com o pH ácido e condições ideais para a proliferação contínua das BOEA, inicia-se o processo de corrosão ativa, continuando a redução do pH. Nessa etapa há perda de massa do concreto devido à formação de H_2SO_4 (ISLANDER et al., 1991; JOSEPH et al., 2012; ERBEKTAS; ISGOR; WEISS, 2019a).

Melhorias no projeto hidráulico das redes de coleta, manipulação das propriedades de águas residuais, aumento da resistência do concreto ao ácido sulfúrico e prevenção do crescimento ou proliferação de bactérias produtoras de ácido são alguns dos métodos aplicados para prevenir ou retardar os danos causados pela CMI (DING; WEISS; BLATCHLEY, 2017).

2.1 Comunidade Microbiana

Os microrganismos dificilmente são encontrados isolados no ambiente. Para uma melhor adaptabilidade, uma ou mais espécies unem suas células, e juntamente com uma matriz de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) formam os biofilmes (FLEMMING et al., 2016; BRYUKHANOV et al., 2021).

Partículas minerais e de poeira, bem como produtos que degradam o concreto podem ser acumuladas no biofilme devido ação do ar, formando uma camada superficial. Com isso, avalia-se que o modo de desenvolvimento do biofilme é influenciado pelas propriedades do concreto e condições externas (BRYUKHANOV et al., 2021).

A CMI se caracteriza pela formação de um biofilme superficial ao concreto, que devido à proliferação microbiana acaba degradando o material. O processo de corrosão tem início com a redução dos compostos de enxofre presentes no esgoto à H_2S pelas BRS, e posterior oxidação do enxofre à H_2SO_4 pelas BOE, que podem ser subdivididas ainda em BOEN e BOEA (ISLANDER et al., 1991; ERBEKTAS; ISGOR; WEISS, 2019a).

As BRS são anaeróbias e se desenvolvem em ambientes terrestres e aquáticos. Como são bactérias heterótrofas, obtêm a energia através da oxidação de matéria orgânica ou hidrogênio das águas residuais. Como subproduto dessas reações há a formação de H_2S e dióxido de carbono (CO_2). O pH desse grupo de bactérias é diversificado, reunindo espécies de pH ácido, neutro e básico. Algumas BRS presentes no processo de CMI do concreto são: Desulfovibrio, Desulfonema, Desulfobacter, Desulfobulbus e Desulfomonile (SATO et al., 2009; SANTO-DOMINGO et al., 2011; AUGUET et al., 2015; HARBULAKOVA; ESTOKOVA; LUPTAKOVA, 2018; JIN et al., 2018).

Já, as BOE são aeróbias, gram-neativas e obtêm energia através da oxidação de compostos inorgânicos, como H_2S , enxofre (S^0), tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$), tetrionato ($S_4O_6^{2-}$) e H_2SO_4 , portanto são quimioautotróficas. O processo de oxidação é responsável pela diminuição do pH. Devido à essa diminuição do pH, atuam dois tipos de bactérias, as com crescimento em meio neutro (BOEN) e ácido (BOEA) (PARKER; PRISK, 1953).

As BOEN iniciam sua colonização quando a superfície do concreto apresenta pH na faixa de 9 com espécies como *Thiothrix* spp., *Thiomonas* spp., *Thiobacillus plumbophilus*, *Thiobacillus novellus/intermedius*, *Halothiobacillus neapolitanus* (VINCKE et al., 2001; OKABE et al., 2007; SATO et al., 2009; SANTO-DOMINGO et al., 2011). *Halothiobacillus neapolitanus* atua da faixa de temperatura de 8 a 39 °C, e pH de 4,5 a 8,5 (KELLY; WOOD, 2000).

Devido à produção de ácido pelas BOEN, o pH é reduzido para cerca de 4 e, em meio ácido, a

colonização das BOEA supera a anterior, corroendo severamente o concreto. Para alguns autores, a bactéria *Acidithiobacillus thiooxidans* (BOEA) é a mais dominante no concreto corroído, apresentando maior abundância na camada superficial e redução de acordo com a profundidade e, conseqüente, limitação de oxigênio e H₂S (OKABE et al., 2007; LING et al., 2014; HARBULAKOVA; ESTOKOVA; LUPTAKOVA, 2018). Os limites de crescimento de *A. thiooxidans* são temperatura de 10 a 37 °C, e pH de 0,5 a 5,5 (KELLY; WOOD, 2000).

Para outros autores, as bactérias protagonistas do MIC de concreto em esgotos são *Acidiphilium* sp. (BOEA) e *Mycobacterium* sp., e contribuem para o processo de corrosão as Burkholderiales, Sphingobacteriales e Xanthomonadales spp. (CAYFORD et al., 2012; CAYFORD et al., 2017).

Essas bactérias estão também relacionadas à oxidação de compostos de enxofre a H₂S, no caso das Burkholderiales, Sphingobacteriales e Xanthomonadales spp., e a H₂SO₄ para as *Acidiphilium* sp. e *Mycobacterium* sp. (KUSUMI; LI; KATAYAMA, 2011; CAYFORD et al., 2012).

Bactérias responsáveis pela nitrificação também podem auxiliar na biodeterioração do concreto, já que produzem ácido nítrico. Entretanto, não são as principais bactérias envolvidas (LORS et al., 2018).

De acordo com os estudos revisados, alguns parâmetros que afetam a comunidade microbiana presente na CMI são o material analisado e as condições de exposição, como tempo e o pH. No quadro 1 estão apresentados a caracterização da comunidade microbiana de estruturas de concreto já existentes por diversos autores, enquanto no quadro 2 estão apresentados a comunidade microbiana presente em concretos ensaiados, moldados em laboratório para tal finalidade, por outros autores.

Quadro 1 – Caracterização da comunidade microbiana de estruturas de concreto existentes

Material analisado	pH	Comunidade microbiana dominante	Microrganismos identificados relacionados à CMI	Consequência
Vincke et al. (2001)				
Biofilme do topo da tubulação de esgoto	2,9 - 5,5	<i>γ-Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i>	<i>Mycobacterium</i> sp., <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> , <i>Thiobacillus novellus/intermedius</i> , <i>Halothiobacillus neapolitanus</i>	Tubo de esgoto de concreto com forte corrosão e biofilme
Biofilme da parede da tubulação de esgoto	3,3 - 6,0	<i>Actinobacteria</i> , <i>α-Proteobacteria</i> , <i>γ-Proteobacteria</i>	<i>Sphingomonas</i> sp., <i>Mycobacterium sydneyensis</i> , <i>Mycobacterium</i> sp., <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> , <i>Thiobacillus novellus/intermedius</i> , <i>Halothiobacillus neapolitanus</i>	Tubo de esgoto de concreto com corrosão moderada e biofilme
Esgoto e biofilme do fundo da tubulação de esgoto	7,2 - 7,8	<i>γ-Proteobacteria</i>	<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> , <i>Thiobacillus novellus/intermedius</i> , <i>Halothiobacillus neapolitanus</i>	Biofilme
Santo-Domingo et al. (2011)				

Região superior do tubo de esgoto		<i>β-Proteobacteria, γ-Proteobacteria, α-Proteobacteria</i>	<i>Desulfobacter e Desulfovibrio, Thiobacillus, Thiomonas spp.</i>	Tubo de esgoto de concreto com forte corrosão e biofilme
Região inferior do tubo de esgoto		<i>Bacteroidetes, β-Proteobacteria, δ-Proteobacteria</i>	<i>Desulfobacter, Desulfomicrobium, Desulfovibrio, Desulfobulbus, Desulfuregula spp.</i>	
Bueiros e poços de inspeção	-	<i>α-Proteobacteria, γ-Proteobacteria, β-Proteobacteria</i>	<i>Acidithiobacillus sp.</i>	
Transbordamento de esgoto combinado		<i>α-Proteobacteria, β-Proteobacteria, Bacteroidetes, γ-Proteobacteria</i>	-	
Cayford et al. (2012)				
Topo da tubulação de esgoto		<i>α-Proteobacteria, γ-Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes</i>	<i>Acidiphilium, Acidithiobacillus, Mycobacterium spp.</i>	-
Parede da tubulação de esgoto		<i>γ-Proteobacteria, β-Proteobacteria, Bacteroidetes, Actinobacteria</i>	<i>Acidithiobacillus, Burkholderiales, Sphingobacteriales, Xanthomonadales spp.</i>	-
Ling et al. (2014)				
Concreto corroído e biofilme de bueiros, estações elevatórias, canais de transporte e bacias de tratamento	> 2	<i>β-Proteobacteria, Firmicutes</i>	<i>Thiomonas, Thiobacillus, Sulfobacillus, Thermothioacillus spp.</i>	Ambientes levemente corroídos e níveis relativamente baixos de H ₂ S
	< 2	<i>α-Proteobacteria, γ-Proteobacteria, Actinobacteria</i>	<i>Acidithiobacillus, Acidiphilium, Mycobacterium, Metalibacterium spp.</i>	Concreto corroído, biofilme e altos níveis de H ₂ S e CO ₂
Auguet et al. (2015)				
Sistema de esgoto real de larga escala	-	<i>δ-Proteobacteria, β-Proteobacteria</i>	<i>Desulfobulbus propionicus</i>	Biofilme, geração de H ₂ S e produção de CH ₄
Cayford et al. (2017)				
Camada de corrosão do topo da tubulação de esgoto		<i>α-Proteobacteria, γ-Proteobacteria, Actinobacteria, Acidobacteria</i>	<i>Acidiphilium, Acidithiobacillus, Mycobacterium, Xanthomonadales</i>	Oxidação de sulfeto, formação de ácido sulfúrico e altos níveis de corrosão
Camada de corrosão da parede da tubulação de esgoto	-	<i>γ-Proteobacteria, β-Proteobacteria, Bacteroidetes, δ-Proteobacteria</i>	<i>Xanthomonadales, Sphingobacteriales, Burkholderiales, Desulfuromonadales</i>	
Camada de corrosão da região de respingos da tubulação de esgoto		<i>β-Proteobacteria, δ-Proteobacteria</i>	<i>Burkholderiales, Desulfuromonadales</i>	

Fonte: Autores citados.

Quadro 2 – Caracterização da comunidade microbiana de concretos ensaiados

Material analisado	Tempo de reação	pH	Comunidade microbiana dominante	Microrganismos identificados relacionados à CMI	Consequência
Okabe et al. (2007)					
Amostras de concreto colocadas em poço de inspeção severamente corrosivo de um sistema de esgoto real	42 - 83 dias	12-8,2	<i>γ-Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i>	<i>Thiothrix sp.</i> , <i>Mycobacterium farcinogenes</i> , <i>Flavobacterium psychrophilium</i>	A redução moderada inicial do pH
	102 dias	8,2-1,6	<i>Actinobacteria</i> , <i>β-Proteobacteria</i> , <i>γ-Proteobacteria</i>	<i>Thiobacillus plumbophilus</i> , <i>Thiomonas intermedia</i> , <i>Halothiobacillus neapolitanus</i> , <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> , <i>Mycobacterium oxydans</i>	Diminuição contínua do pH com o aparecimento de uma sucessão de SOB neutrofílica. Deposições semelhantes a pó branco apareceram na superfície do concreto
	1 ano	1,6	<i>α-Proteobacteria</i> , <i>γ-Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Nitrospira</i>	<i>Halothiobacillus neapolitanus</i> , <i>Acidiphilium acidophilum</i> , <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> , <i>Mycobacterium florentinum</i>	Surgimento de SOB acidófilo e corrosão severa do concreto. O concreto corroído (camada de gesso) estava úmido, pastoso e com cerca de 10 mm de espessura após 1 ano
Satoh et al. (2009)					

Biofilme de argamassas colocadas na parte inferior do poço de inspeção (0-4 cm do fundo)	105 dias	-	<i>α-Proteobacteria</i> , <i>β-Proteobacteria</i> , <i>γ-Proteobacteria</i> , <i>Deltaproteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i> , <i>Firmicutes</i>	<i>Desulfomonile tiejei</i> , <i>Thiothrix nivea</i>	Biofilme semelhante a um gel cinza-escuro, com espessura de cerca de 3 mm
Biofilme de argamassas colocadas na parte mediana do poço de inspeção (4-20 cm do fundo)			<i>α-Proteobacteria</i> , <i>β-Proteobacteria</i> , <i>γ-Proteobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i>	<i>Thiothrix sp.</i> , <i>B. thiooxidans</i>	Desenvolveu-se um biofilme tipo gel semelhante ao da parte inferior coberto por um biofilme filamentoso branco
Biofilme de argamassas colocadas na parte superior do poço de inspeção (30-48 cm do fundo)			<i>α-Proteobacteria</i> , <i>β-Proteobacteria</i> , <i>γ-Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i> , <i>Firmicutes</i>	<i>H. neapolitanus</i>	Amostras de argamassa estavam ligeiramente corroídas, sem presença de biofilme
Ling et al. (2015)					
Amostras de concreto expostas a poços de inspeção altamente corrosivos	Até 6 meses	> 2	<i>α-Proteobacteria</i> , <i>γ-Proteobacteria</i>	<i>Halothiobacillus</i> , <i>Acidithiobacillus spp.</i>	Maior perda de massa e corrosão superficial para as amostras expostas aos bueiros com maior concentração de H ₂ S e maior tempo de exposição
	Após 6 meses	< 2	<i>α-Proteobacteria</i>	<i>Acidithiobacillus sp.</i>	
Auguet et al. (2015)					
Biofilme de planta piloto de esgoto de laboratório	1 - 13 semanas	-	<i>δ-Proteobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i> , <i>β-Proteobacteria</i> , <i>γ-Proteobacteria</i>	<i>Desulfobulbus propionicus</i>	Alta emissão de H ₂ S nos estágios iniciais do desenvolvimento do biofilme, com aumento da emissão de CH ₄ após sua maturação
	1 ano		<i>δ-Proteobacteria</i> , <i>γ-Proteobacteria</i>		
Lors et al. (2018)					

Biofilme de argamassa de cimento Portland comum (OPC)	5 anos	> 3	<i>α-Proteobacteria</i> , <i>β-Proteobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i>	<i>Sphingobacteria</i> , <i>Nitrosospira</i> , <i>Thiobacillus thioparus</i> , <i>Halothiobacillus neapolitanus</i>	Maior biodeterioração nas argamassas com OPC do que CAC, tanto na microestrutura da pasta de cimento quanto na abundância relativa da comunidade bacteriana
Biofilme de argamassa de cimento de aluminato de cálcio (CAC)			<i>γ-Proteobacteria</i> , <i>β-Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i>	<i>Thiobacillus plumbophilus</i> , <i>Halothiobacillus neapolitanus</i>	

Fonte: Autores citados.

É importante ressaltar a reclassificação de algumas espécies *Thiobacillus*, entre elas *T. thiooxidans* e *T. neapolitanus* que foram reclassificadas, respectivamente, em *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Halothiobacillus neapolitanus* (KELLY; WOOD, 2000).

Okabe et al. (2007) analisaram a corrosão de amostras de concreto confeccionadas em laboratório e expostas a ambiente severamente corrosivo de um sistema de esgoto real. As amostras de concreto apresentaram perda de peso inferior a 3% aos 174 dias e 37% de após 1 ano de exposição. Através de monitoramentos, os autores ainda perceberam dois crescimentos bacterianos relevantes. O primeiro ocorreu entre os dias 73 e 102, com pH neutro, e o segundo após o dia 130, sucedido pelo aumento da concentração de sulfato (SO_4).

Cayford et al. (2017) estudaram a relação entre as comunidades bacterianas, sua posição transversal à tubulação de concreto e inundação da rede de esgoto. Os resultados obtidos apontam similaridade entre as bactérias encontradas na parede, zona de maré e inundação, e diferenças para as amostras do topo da tubulação. Dessa forma, os autores sugerem que a inundação de esgoto causa impacto na comunidade do topo da tubulação de esgoto com corrosão.

Jin et al. (2018) caracterizaram a diversidade microbiana em sistema de esgoto piloto com 1.200 m de extensão, e relataram que bactérias do gênero *Desulfovibrio* tiveram presença dominante entre as BRS no início da rede (30 m). Essas bactérias deram lugar ao gênero *Desulfonema*, que se tornou dominante entre 100 e 400 m de extensão da rede de esgoto. Entretanto, a partir dos 600 m, devido ao baixo teor de SO_4^{2-} , observou-se redução de BRS.

Ling et al. (2014) observaram que em condições mais severas de corrosão eram encontrados níveis mais elevados de CO_2 , menor riqueza de comunidade bacteriana e maior da abundância relativa de *Acidithiobacillus* spp. Em ambientes levemente corroídos, normalmente com pH superior a dois e baixos níveis de H_2S , foram encontrados as BOEA. Ainda, os autores destacam que, essas bactérias não foram observadas em ambientes dominados por BRS.

De forma semelhante, Cayford et al. (2017) observaram maior diversidade microbiana nas amostras retiradas da parede e zona de maré do que no topo da tubulação. Vincke et al. (2001) também observaram menor diversidade microbiana e maior número de BOEA nas amostras de menor pH.

A composição do cimento empregado no concreto tem grande influência na CMI. Lors et al. (2018) avaliaram o desempenho e comunidade microbiana em argamassas de cimento Portland comum (OPC) e cimento de aluminato de cálcio (CAC) expostas a um coletor de águas residuais durante 5 anos. Observaram que a população bacteriana do biofilme da argamassa OPC era cerca de 30 vezes superior que o de CAC. OPC apresentou maior abundância relativa de *Thiobacillus thioparus* (1,3%) do que CAC (inferior a 0,1%). Ainda, os autores descrevem a argamassa OPC mais rica em BOEN (1,7%) em comparação com CAC (0,1%), e ambas não apresentaram BOEA. Dessa forma, conforme esperado, a deterioração da argamassa OPC foi mais severa que a CAC quando expostas em um coletor de

água por cinco anos.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como observado nesta revisão, são vários microrganismos presentes no biofilme superficial de sistemas de esgoto, e as bactérias relacionadas à corrosão são semelhantes ao longo do processo.

O biofilme apresenta uma variedade de microrganismos que são fortemente relacionados às condições do ambiente ao seu entorno, como gradiente de nutrientes e fatores físico-químicos, como hidrodinâmica, temperatura, pH, presença de poluentes e outras substâncias (PERES, 2011; ROLIM, 2014).

Os estudos em ambiente corroído apresentam apenas BRS, apenas BOE, ou ambas. Em estruturas já existentes, a bactéria caracterizada mais identificada foi a *Acidithiobacillus thiooxidans* talvez pela elevada acidez do pH encontrado nessas superfícies (VINCKE et al., 2001; SANTO-DOMINGO et al., 2011; CAYFORD et al., 2012; LING et al., 2014; CAYFORD et al., 2017). Nos estudos em que amostras de concreto ou argamassa foram colocadas em ambiente corrosivo, foram identificadas, além de *A. thiooxidans* outras bactérias atuantes no processo de corrosão como *Halothiobacillus neapolitanus*, *Mycobacterium*, *Thiothrix* e *Thiobacillus* spp. (OKABE et al., 2007; SATOH et al., 2009; LING et al., 2015; LORS et al., 2018).

Por fim, relacionado à região de maior abundância dessas bactérias, em regiões mais severas de corrosão, com menor pH, foram encontradas menor diversidade microbiana e maior abundância relativa de BOEA (VINCKE et al., 2001; LING et al., 2014).

Por fim, a CMI é uma manifestação patológica que deve ser evitada. O conhecimento sobre suas causas e microrganismos envolvidos é de suma importância para que sejam abordadas medidas de prevenção e solução cada vez mais eficazes.

4 REFERÊNCIAS

AUGUET, O. et al. Changes in microbial biofilm communities during colonization of sewer systems. **Applied and environmental microbiology**, v. 81, n. 20, p. 7271-7280, 2015. <https://doi.org/10.1128/AEM.01538-15>.

BRASIL. Lei Federal nº 14026, de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico**. Brasília: Diário Oficial da União, 2020b.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019**. Brasília: SNS/MDR, 2020a.

BRYUKHANOV, A. L. et al. The Role of Microorganisms in the Destruction of Concrete and Reinforced Concrete Structures. **Power Technology and Engineering**, v. 54, n. 5, p. 609-614, 2021. <https://doi-org.ez71.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10749-020-01260-5>.

CAYFORD, B. I. et al. Comparison of microbial communities across sections of a corroding sewer pipe and the effects of wastewater flooding. **Biofouling**, v. 33, n. 9, p. 780-792, 2017. <https://doi.org/10.1080/08927014.2017.1369050>.

CAYFORD, B. I. et al. High-throughput amplicon sequencing reveals distinct communities within a corroding con-

crete sewer system. **Applied and environmental microbiology**, v. 78, n. 19, p. 7160-7162, 2012. <https://doi.org/10.1128/AEM.01582-12>.

CHENG, L. et al. Monitoring sulfide-oxidizing biofilm activity on cement surfaces using non-invasive self-referencing microsensors. **Water Research**, [S.L.], v. 89, p. 321-329, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.066>.

DING, L.; WEISS, W. J.; BLATCHLEY, E. R. Effects of Concrete Composition on Resistance to Microbially Induced Corrosion. **Journal of Environmental Engineering**, [S.L.], v. 143, n. 6, p. 1-9, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001197](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001197).

ERBEKTAS, A. R.; ISGOR, O. B.; WEISS, W. J. An accelerated testing protocol for assessing microbially induced concrete deterioration during the bacterial attachment phase. **Cement and Concrete Composites**, [S. L.], v. 104, p. 1-13, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103339>.

ERBEKTAS, A. R.; ISGOR, O. B.; WEISS, W. J. Evaluating the efficacy of antimicrobial additives against biogenic acidification in simulated wastewater exposure solutions. **Rilem Technical Letters**, [S.L.], v. 4, p. 49-56, 2019b. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.62>.

FLEMMING, H. et al. Biofilms: an emergent form of bacterial life. **Nature Reviews Microbiology**, v. 14, n. 9, p. 563-575, 2016. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.94>.

GÓIS, T. S. **Estudo da corrosão do concreto microbiologicamente induzida (CCMI) em estruturas de saneamento**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

GRANDCLERC, A. et al. Modelling of the sulfuric acid attack on different types of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 105, p. 126-133, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.014>.

HARBULAKOVA, V. O.; ESTOKOVA, A.; LUPTAKOVA, A. An investigation of the bacterial influence of acidithiobacillus thiooxidans on concrete composites. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2018. p. 00021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184500021>.

HERISSON, J. et al. Toward an accelerated biodeterioration test to understand the behavior of Portland and calcium aluminate cementitious materials in sewer networks. **International Biodeterioration & Biodegradation**. [S.L.], v. 84, p. 236-243, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.03.007>.

ISLANDER, R. L. et al. Microbial ecology of crown corrosion in sewers. **Journal of Environmental Engineering**. [S.L.], v. 117, n. 6, p. 751-770, 1991. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1991\)117:6\(751\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1991)117:6(751)).

JIN, P. et al. Co-variation between distribution of microbial communities and biological metabolization of organics in urban sewer systems. **Environmental science & technology**, v. 52, n. 3, p. 1270-1279, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05121>.

JOSEPH, A. P. et al. Surface neutralization and H₂S oxidation at early stages of sewer corrosion: influence of temperature, relative humidity and H₂S concentration. **Water research**. [S.L.], v. 46, n. 13, p. 4235-4245, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.011>.

KAUSHAL, V.; NAJAFI, M.; LOVE, J. Qualitative Investigation of Microbially Induced Corrosion of Concrete in Sanitary Sewer Pipe and Manholes. In: **Pipelines 2018: condition Assessment, Construction, and Rehabilitation**, 2018, Toronto. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2018. p. 768-775. <https://doi.org/10.1061/9780784481653.086>.

KELLY, D. P.; WOOD, A. P. Reclassification of some species of Thiobacillus to the newly designated genera Acidithiobacillus gen. nov., Halothiobacillus gen. nov. and Thermithiobacillus gen. nov. **International journal of systematic and evolutionary microbiology**, v. 50, n. 2, p. 511-516, 2000. <https://doi.org/10.1099/00207713-50-2-511>.

KUSUMI, A.; LI, X. S.; KATAYAMA, Y. Mycobacteria isolated from Angkor monument sandstones grow chemolithoautotrophically by oxidizing elemental sulfur. **Frontiers in Microbiology**, v. 2, p. 104, 2011. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2011.00104>

LING, A. L. et al. Carbon dioxide and hydrogen sulfide associations with regional bacterial diversity patterns in microbially induced concrete corrosion. **Environmental science & technology**, v. 48, n. 13, p. 7357-7364, 2014. <https://doi.org/10.1021/es500763e>.

LING, A. L. et al. High-resolution microbial community succession of microbially induced concrete corrosion in working sanitary manholes. **PLoS One**, v. 10, n. 3, p. e0116400, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116400>.

LORS, C. et al. Biodeterioration of mortars exposed to sewers in relation to microbial diversity of biofilms formed on the mortars surface. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 130, p. 23-31, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.03.010>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

OKABE, S. et al. Succession of sulfur-oxidizing bacteria in the microbial community on corroding concrete in sewer systems. **Applied and environmental microbiology**, v. 73, n. 3, p. 971-980, 2007. <https://doi.org/10.1128/AEM.02054-06>.

PARKER, C. U.; PRISK, J. The oxidation of inorganic compounds of sulphur by various sulphur bacteria. **Microbiology**, v. 8, n. 3, p. 344-364, 1953. <https://doi.org/10.1099/00221287-8-3-344>.

SANTO-DOMINGO, J. W. et al. Molecular survey of concrete sewer biofilm microbial communities. **Biofouling**, v. 27, n. 9, p. 993-1001, 2011. <https://doi.org/10.1080/08927014.2011.618637>.

SATOH, H. et al. Microbial community structures and in situ sulfate-reducing and sulfur-oxidizing activities in biofilms developed on mortar specimens in a corroded sewer system. **Water research**, v. 43, n. 18, p. 4729-4739, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.035>.

VINCKE, E.; BOON, N.; VERSTRAETE, W. Analysis of the microbial communities on corroded concrete sewer pipes—a case study. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 57, n. 5, p. 776-785, 2001. <https://doi.org/10.1007/s002530100826>.

WEI, S. et al. Microbiologically induced deterioration of concrete: a review. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 44, p. 1001-1007, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822014005000006>