



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
ASSESSORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS**

ITAMAR VICTOR DE LIMA COSTA

**PROSPECÇÃO DE CORROSÃO MICROBIANA EM
CONCRETO ARMADO NA PRESENÇA E AUSÊNCIA
DE SALINIDADE**

Recife, 2025

ITAMAR VICTOR DE LIMA COSTA

**PROSPECÇÃO DE CORROSÃO MICROBIANA EM
CONCRETO ARMADO NA PRESENÇA E AUSÊNCIA
DE SALINIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Mestrado em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais.

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro

Coorientadora: Profa. Dra. Galba Maria Campos-Takaki

Recife, 2025.

C837p Costa, Itamar Victor de Lima.
Prospecção de corrosão microbiana em concreto armado na presença e ausência de salinidade / Itamar Victor de Lima Costa, 2025.

127 f. : il.

Orientadora: Eliana Barreto Monteiro.
Coorientadora: Galba Maria Campos Takaki.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2025.

1. Biodegradação. 2. Bacillus subtilis. 3. Bacillus cereus.
4. Concreto - Corrosão. 5. Salinidade. I. Título.

CDU 574.6

Pollyanna Alves - CRB4/1002

PROSPECÇÃO DE CORROSÃO MICROBIANA EM CONCRETO ARMADO NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DE SALINIDADE

ITAMAR VICTOR DE LIMA COSTA

Examinadores:

Documento assinado digitalmente
 ELIANA CRISTINA BARRETO MONTEIRO
Data: 27/03/2025 12:58:33-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro (Orientadora)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Documento assinado digitalmente
 ANGELO JUST DA COSTA E SILVA
Data: 28/03/2025 11:05:29-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva (Membro Interno)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Documento assinado digitalmente
 ROMILDO ALVES BERENGUER
Data: 27/03/2025 13:27:13-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Romildo Alves Berenguer (Membro Externo)
Universidade de Pernambuco - UPE

Defendida em: 25/03/2025

Coordenador do curso: Prof. Dr. Sérgio Mendonça de Almeida

Dedico este trabalho ao meu Deus; que é meu mantenedor e rocha da minha salvação. A minha esposa. A meus pais e família. Aos meus sogros. As minhas orientadoras por acreditarem no meu potencial. A todos os meus amigos que direta e indiretamente me ajudaram na caminhada.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao meu Deus por me conceder folego de vida e forças para concluir mais esta etapa na minha vida.

Agradeço a minha esposa, Maria Eduarda, que sempre me apoiou e me motivou a chegar ao fim desta jornada.

Agradeço aos meus pais, Itamar Félix e Maria da Conceição, e toda minha família que me apoiaram em todos os sentidos. Eles são parte primordial desta conquista.

Agradeço aos meus sogros, Edmilson Fragoso e Maria Camilo, por me ajudarem em todos os sentidos, me proporcionando chegar ao fim desta jornada.

Agradeço ao meu tio do coração, Moacir José, que lutou com todas as forças e me ajudou a adentrar a universidade Católica; ele se mostrou incansável nesta luta. Agradeço também pelas caronas para voltar para casa; que eram um descanso nos dias pesados.

As minhas orientadoras Eliana Barreto e Galba Takaki, que sempre com calma, trouxeram os seus conhecimentos e me ajudaram a elaborar este trabalho.

Agradeço aos meus amigos que antes do curso já estavam comigo. Estando eles distante, fisicamente, sempre se mostraram atentos, sendo: Jamim Cecilia, Gabriel Fernandes, Matheus Ferreira, Alysson Luiz e Felipe Eliakine.

Agradeço aos meus companheiros de luta. Os amigos e irmãos que fiz ao longo deste ciclo. Dos quais, posso citar: Leidson Ramos, Bruno Augusto, Antônio Pereira, Layne Cardoso, Larissa Montalvão e João Almeida, João Vitor, Alcides Junior, Fernanda, Virginia Fonseca entre outros.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| <i>AGRADECIMENTO</i> | <i>VI</i> |
| <i>SUMÁRIO</i> | <i>VII</i> |
| <i>LISTA DE FIGURAS</i> | <i>XI</i> |
| <i>LISTA DE QUADROS</i> | <i>XIII</i> |
| <i>LISTA DE TABELAS</i> | <i>XIV</i> |
| <i>RESUMO</i> | <i>XV</i> |
| <i>ABSTRACT</i> | <i>XVI</i> |
| | |
| CAPÍTULO I | 17 |
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 2 OBJETIVOS | 20 |
| 2.1 Objetivo Geral | 20 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 20 |
| 3 REVISÃO DA LITERATURA | 21 |
| 3.1 Evolução dos Métodos Construtivos..... | 21 |
| 3.1.1 Primeira revolução: construções em rocha | 21 |
| 3.1.2 Segunda revolução: aço estrutural | 22 |
| 3.1.3 Terceira revolução: concreto armado | 22 |
| 3.1.4 Quarta revolução: concreto protendido | 23 |
| 3.2 Patologias de Construção | 23 |
| 3.3 Corrosão de Estruturas | 24 |
| 3.3.1 Consequências da corrosão de armaduras | 24 |
| 3.3.2 Fatores que Aceleram a Corrosão | 26 |
| 3.3.3 Mecanismos da corrosão de armaduras | 27 |
| 3.4 Corrosão Induzida Por Microrganismos (CIM) | 32 |
| 3.4.1 Fungos | 32 |
| 3.4.2 Algas | 32 |

| | |
|--|----|
| 3.4.3 Bactérias | 33 |
| 3.5 Mecanismos Da Corrosão Induzida Por Microrganismos (CIM)..... | 34 |
| 3.5.1 Biofilme..... | 35 |
| 3.5.2 Biodeterioração e Biocorrosão: Casos investigados | 38 |
| 3.6 <i>Bacillus cereus</i> E Suas Características | 41 |
| 3.6.1 <i>Bacillus cereus</i> e sua ligação com a CIM e mecanismos investigados | 42 |
| | |
| 3.7 <i>Bacillus subtilis</i> e Suas Características | 44 |
| 3.7.1 <i>Bacillus subtilis</i> : um modelo de estudos..... | 45 |
| 3.7.2 <i>Bacillus subtilis</i> e sua ligação com a CIM e mecanismos investigados | 45 |
| | |
| 3.8 Resíduos Gerados e Sustentabilidade | 47 |
| 4 REFERÊNCIA..... | 49 |
| CAPÍTULO II | 55 |
| 1 INTRODUÇÃO | 58 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO..... | 59 |
| 2.1 Patologias de construção: Corrosão de armaduras | 59 |
| 2.1.1 Mecanismo da Corrosão De Estruturas | 59 |
| 2.2 Corrosão induzida por microrganismos (CIM)..... | 61 |
| 2.3 Biofilme | 62 |
| 2.3.1. Formação do biofilme | 62 |
| 2.4 Características e Aplicações do <i>Bacillus Subtilis</i> | 64 |
| 2.4.1 <i>Bacillus subtilis</i> : Um modelo de Estudo. | 64 |
| 2.5 <i>Bacillus subtilis</i> e a CIM..... | 65 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 66 |
| 3.1 Moldagem dos Corpos De Prova..... | 66 |
| 3.1.2 Moldagem e cura dos corpos de prova | 66 |
| 3.2 Ensaio de Biocorrosão Acelerada..... | 70 |
| 3.2.1 Esquematização dos ensaios | 70 |
| 3.2.2 Ensaio secos | 71 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.3 Ensaio úmido | 73 |
| 4 RESULTADOS..... | 77 |
| 4.1 Ensaio seco | 77 |
| 4.2 Ensaio úmido | 79 |
| 4.2.1 Resultados dos parâmetros avaliados | 79 |
| 4.2.3 Contagem de colônias | 80 |
| 3.7 Avaliação visual..... | 84 |
| 3.7.1 Medição 1 | 84 |
| 3.7.2 Medição 2..... | 85 |
| 3.7.3 Medição 3..... | 87 |
| 4 CONCLUSÕES | 89 |
| 5 REFERÊNCIAS..... | 90 |
| CAPÍTULO III | 93 |
| RESUMO | 94 |
| ABSTRACT | 95 |
| 1 INTRODUÇÃO | 96 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO..... | 98 |
| 2.1 Concreto, Construção e Patologia | 98 |
| 2.2 Corrosão de Armaduras | 98 |
| 2.2.1 Processo de corrosão..... | 99 |
| 2.3 Corrosão induzida ou acelerada por microrganismos | 100 |
| 2.4 Biofilme | 101 |
| 2.5 <i>Bacillus cereus</i> : Características e áreas de interesse..... | 103 |
| 2.5.1 <i>Bacillus cereus</i> , CIM e mecanismos estudados | 103 |
| 2.5.2 <i>Bacillus cereus</i> e a corrosão no concreto armado | 104 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 106 |
| 3.1 Moldagem dos Corpos De Prova..... | 106 |
| 3.1.1 Moldagem e cura dos corpos..... | 106 |
| 3.2 Ensaio de Biocorrosão Acelerada..... | 109 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 3.2.1 Ensaio úmido | 110 |
| 4 RESULTADOS..... | 114 |
| 4.1 Ensaio Úmido | 114 |
| 4.1.1 Parâmetros analisados | 114 |
| 4.1.2 Contagem de colônias | 115 |
| 4.2 Avaliação visual..... | 119 |
| 4.2.1 Primeira medição..... | 119 |
| 4.2.2 Segunda medição..... | 120 |
| 4.3.3 Terceira medição..... | 122 |
| 5 CONCLUSÃO | 125 |
| 7 REFERÊNCIAS..... | 126 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Flambagem da armadura | 24 |
| Figura 2 - Ferragem exposta por causa do alto grau de corrosão | 25 |
| Figura 3 - Queda do edifício Palace II | 25 |
| Figura 4 - Mecanismo da corrosão de armaduras | 28 |
| Figura 5 - Tipos de corrosão de armaduras..... | 29 |
| Figura 6 - Mecanismos da carbonatação | 30 |
| Figura 7 - Penetração de agentes agressivos | 31 |
| Figura 8 - Etapas de formação do biofilme | 36 |
| Figura 9 - Degradação de tubulações de esgoto na Grécia por produção de ácido sulfúrico biogênico..... | 39 |
| Figura 10 - Deterioração da estação elevatória de esgoto | 39 |
| Figura 11 - <i>Bacillus cereus</i> imagem do MEV | 41 |
| Figura 12 - Mecanismo de corrosão por <i>Bacillus cereus</i> | 43 |
| Figura 13 - Misturador de bancada..... | 67 |
| Figura 14 - Características dos corpos de prova | 68 |
| Figura 15 - Corpo de Prova no Molde | 68 |
| Figura 16 - Corpos de Prova Moldados..... | 69 |
| Figura 17 - Corpos de prova em cura..... | 69 |
| Figura 18 -Perfuração dos corpos de prova | 70 |
| Figura 19 - Esquematização dos furos | 70 |
| Figura 20 - Inoculação dos corpos de prova..... | 71 |
| Figura 21 - Corpos de prova preparados para o ensaio | 72 |
| Figura 22 - Bandeja na estufa | 72 |
| Figura 23 - Coleta da água do mar..... | 73 |
| Figura 24 - Filtração da água do mar | 73 |
| Figura 25 - Retirada dos inóculos..... | 75 |
| Figura 26 - Metal no meio de cultura | 76 |
| Figura 27 - Ensaios secos..... | 77 |
| Figura 28 - Placas com o crescimento da bactéria | 78 |
| Figura 29 - Contaminação das caixas | 81 |
| Figura 30 - Placas com as colônias crescidas a partir dos algodões | 82 |
| Figura 31 - Crescimento das bactérias a partir dos metais..... | 83 |
| Figura 32 - A esquerda os corpos contaminados a direita o controle | 85 |
| Figura 33 - Corpos de prova contaminados..... | 86 |
| Figura 34 - Blocos do controle na segunda medição..... | 86 |

| | |
|---|-----|
| Figura 35 - Corpos de prova contaminados - terceira medição | 87 |
| Figura 36 - Corpos de prova - controle..... | 88 |
| Figura 37 - Blocos de relação 0,4 a/c demonstrando pouca corrosão | 88 |
| Figura 38 - Mecanismo de corrosão por <i>Bacillus cereus</i> | 104 |
| Figura 39 - Misturador de bancada..... | 107 |
| Figura 40 - Especificação dos corpos de prova..... | 108 |
| Figura 41 - Corpos dentro do molde..... | 108 |
| Figura 42 - Corpos de prova durante a cura em água | 109 |
| Figura 43 - Preparação dos corpos de prova | 109 |
| Figura 44 - Coleta da água do mar..... | 110 |
| Figura 45 - Processo de filtração da água do mar | 111 |
| Figura 46 - Remoção dos inóculos..... | 112 |
| Figura 47 - Metais no meio de cultura | 113 |
| Figura 48 - Placas com o crescimento da bacia bactéria presente na água dos ensaios..... | 115 |
| Figura 49 - Crescimento do microrganismo retirado dos algodões..... | 116 |
| Figura 50 - Crescimento da bactéria no metal..... | 117 |
| Figura 51 - Contaminação dos blocos controle por <i>Bacillus subtilis</i> | 118 |
| Figura 52 - Primeira medição - <i>Bacillus cereus</i> | 119 |
| Figura 53 - Blocos controle na primeira medição..... | 120 |
| Figura 54 – Blocos contaminados por <i>Bacillus cereus</i> – segunda medição. 121 | |
| Figura 55 - Blocos não contaminados - segunda medição | 122 |
| Figura 56 - Blocos contaminados na terceira retirada | 123 |
| Figura 57 - Corpos de prova controle na terceira medição | 124 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 - Classe de agressividade ambiental | 26 |
| Quadro 2 - Concreto de cobertura | 27 |
| Quadro 3 - Relação água cimento..... | 27 |
| Quadro 4 - Esquematização dos ensaios..... | 71 |
| Quadro 5 - Amostras do metal | 72 |
| Quadro 6 - Amostras dos inóculos | 75 |
| Quadro 7 - Amostras dos metais retirados | 76 |
| Quadro 8 - Análise qualitativa da presença da bactéria..... | 78 |
| Quadro 9 - Crescimento do microrganismo | 81 |
| Quadro 10 - Contagem das colônias | 82 |
| Quadro 11 - Análise quantitativa do crescimento da bactéria | 83 |
| Quadro 12 - Crescimento da bactéria a partir do metal retirado | 84 |
| Quadro 13 - Etapas de formação do biofilme | 101 |
| Quadro 14 - Matérias da moldagem | 106 |
| Quadro 15 - Traços e quantidade de material | 106 |
| Quadro 16 - Disposição das amostras | 112 |
| Quadro 17 - Disposição das amostras da coleta de ferro | 113 |
| Quadro 18 - Análise qualitativa do crescimento e presença do microrganismo | 116 |
| | |
| Quadro 19 - Análise qualitativa das amostras dos algodões | 116 |
| Quadro 20 - Análise qualitativa da presença do microrganismo nas hastes | 117 |
| Quadro 21 - Análise quantitativa da presença de contaminação do metal nos blocos controle..... | 118 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Materiais utilizados..... | 66 |
| Tabela 2 - Resultados da medição dos parâmetros | 79 |
| Tabela 3 - Resultado dos parâmetros analisados..... | 114 |

RESUMO

O concreto possui em sua composição agregado graúdo, miúdo e pode receber o reforço de barras de aço; sendo chamado assim de concreto armado. Acreditava-se que o concreto era indestrutível, no entanto com o passar dos anos, foi-se percebendo que agentes agressivos presentes na atmosfera atacavam as estruturas, corroendo as armaduras e gerando diversos problemas nas construções. Foi descoberto que bactérias também possuem a capacidade de corroer ligas metálicas por um processo chamado corrosão induzida por microrganismos (CIM). Bactérias redutoras de sulfato, oxidantes de enxofre, oxidantes de ferro e redutoras de nitrato se destacam nas pesquisas de biocorrosão. Nesse sentido se apresentam as bactérias do grupo bacillus, que podem ser encontradas nos mais variados ambientes, *Bacillus subtilis* e *Bacillus cereus*, que possuem diversos trabalhos na literatura demonstrando o seu potencial corrosivo. Ambas são bactérias que precipitam o carbonato de cálcio (CaCO_3) e por esse motivo são utilizadas no concreto autocicatrizante. No entanto, não existem estudos que investiguem a possibilidade dessas bactérias induzirem a corrosão nas barras de aço no concreto armado em ambiente salino, o que abre margem para essa investigação e prospecção.

Palavras-chave: Biocorrosão. Biofilme. *Bacillus subtilis*. *Bacillus cereus*. Patologias.

ABSTRACT

Concrete has coarse and fine aggregates in its composition and can be reinforced with steel bars; thus, it is called reinforced concrete. It was believed that concrete was indestructible, however, over the years, it was realized that aggressive agents present in the atmosphere attacked the structures, corroding the reinforcement and causing several problems in constructions. It was discovered that bacteria also have the ability to corrode metal alloys through a process called microbially induced corrosion (MIC). Sulfate-reducing, sulfur-oxidizing, iron-oxidizing and nitrate-reducing bacteria stand out in biocorrosion research. In this sense, we present the bacteria of the *Bacillus* group, which can be found in the most varied environments, *Bacillus subtilis* and *Bacillus cereus*, which have several studies in the literature demonstrating their corrosive potential. Both are bacteria that precipitate calcium carbonate (CaCO₃) and for this reason are used in self-healing concrete. However, there are no studies investigating the possibility of these bacteria inducing corrosion in steel bars in reinforced concrete in a saline environment, which opens the way for this investigation and prospecting.

Keywords: Biocorrosion. Biofilm. *Bacillus subtilis*. *Bacillus cereus*. Pathologies.

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material composto por agregado graúdo, agregado miúdo, água e cimento, que atua como plastificante. Assim, tanto na forma simples quanto na armada, ele desempenha um papel fundamental dentro de um sistema construtivo (Damme, 2018). Essa indústria que transita por todas as atividades têm o cimento como elemento principal (Da Silva, 2022).

O concreto se apresenta como um dos materiais mais novos que existem. Seu componente principal, o cimento, já se apresenta como um dos materiais mais consumidos da terra, só ficando atrás da água (Souza et al., 2021).

Por sua vez, a indústria da construção é fundamental para qualquer sistema econômico. Ao longo da história, essa indústria teve um papel de destaque no PIB de diversos países, consolidando-se como um dos setores que mais gera empregos e renda (Barbosa e De Oliveira Valin Jr, 2023).

Os métodos construtivos passaram por diversas modificações e inovações e nos primórdios acreditava-se que o concreto tivesse durabilidade infinda. Entretanto, a ação de agentes agressivos e os erros de projeto mostraram o contrário (Schmoeller e Lima, 2021).

Nesse contexto surge o estudo das patologias de construção, termo mais conhecido na medicina, mas difundido também na construção civil. Termo empregado para o estudo de problemas de projetos, execução e da ação de agentes externos (Neves e Vázquez, 2021). Da mesma forma que na medicina, cada patologia da construção apresenta seus sintomas, e se tratados com antecedência podem evitar problemas maiores (Nunes, 2021).

Nunes (2021), afirma que as principais patologias de construção são fissuras, trincas, rachaduras, gretamento, carbonatação e corrosão de armaduras. De todas essas, de acordo com Shamoeller e Lima (2021), a corrosão de armaduras é uma das mais preocupantes, pois pode gerar ruptura total ou parcial das estruturas.

Essa corrosão é um processo eletroquímico onde existe a degradação do metal e a deterioração química dos componentes do concreto (Martins, 2022). Entre os fatores que podem influenciar e até acelerar a corrosão de armaduras se destacam: agressividade ambiental, relação água/cimento e o concreto de cobertura (Caldas e Nogueira, 2023).

No mesmo sentido das patologias de construção se apresenta a corrosão induzida por microrganismos (CIM). Este seguindo os mesmos princípios da corrosão eletroquímica, no entanto as atividades metabólicas dos microrganismos podem

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

acelerar o processo ainda mais. Nesse sentido os microrganismos podem iniciar e/ou acelerar o processo de corrosão (Santos et al., 2024).

De acordo com Hu et al.(2022), a corrosão galvânica é favorecida devido à atividade metabólica dos microrganismos presentes nos biofilmes, que liberam substâncias corrosivas. Além disso, o diferencial na aeração de oxigênio também contribui para o processo. Alguns grupos de bactérias se destacam na CIM, dentre eles os principais são: bactérias redutoras de sulfato, bactérias oxidantes de enxofre, bactérias oxidantes de ferros e bactérias redutoras de nitrato (Videla, 2003).

Nesse sentido, duas bactérias do grupo bacillus, ambas redutoras de nitrato (Liu et al., 2021), vem se destacando no estudo da biocorrosão, são elas *Bacillus cereus* e *Bacillus subtilis*. Wan (2028) destaca a corrosão de tubos de aço x80 por *Bacillus cereus*. Wang et al., demonstram a corrosão do aço 10MnNiCrCu em ambiente marinho por *Bacillus subtilis*.

Ambas são utilizadas atualmente como aditivo no concreto autocicatrizante, pela sua capacidade de precipitar Carbonato de cálcio (CaCo₃) (Jena et al., 2020; Reyad e Mokhtar, 2023). Entretanto, não existem estudos conclusivos que mostrem o potencial corrosivo em concreto armado. Essa falta de estudos abre margem para uma investigação e prospecção de biocorrosão do aço no concreto armado, visando observar essa possibilidade, bem como os seus mecanismos.

Frente ao que foi citado se tem a geração de resíduos que aumenta devido às atividades de recuperação e demolição de estruturas devido a essas patologias. Sabendo que a indústria da construção civil utiliza cerca de 20 a 50% de todos os recursos naturais do mundo (Miranda e Balduino, 2021), tendo a indústria do cimento, base da construção civil como emissor de 8% de Co₂ em todo o mundo (Rodgers, 2018).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo compreender o comportamento, em relação a corrosão de armaduras no concreto armado, de *Bacillus subtilis* e *Bacillus cereus*, na presença e ausência de salinidade.

2.2 Objetivos Específicos

- Confeccionar corpos de prova de duas relações a/c;
- Induzir a corrosão por *Bacillus subtilis* e *Bacillus cereus*;
- Observar o comportamento do meio salino e dos ensaios secos;
- Comparar com a corrosão por íons cloretos;
- Observar o comportamento das bactérias em relação a corrosão em meio salino.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Evolução dos Métodos Construtivos

O concreto é um composto formado por agregado graúdo, agregado miúdo água e plastificante (cimento). Dessa forma, o concreto, armado ou não, se constitui como elemento participativo de um sistema construtivo (Damme, 2018).

Materiais a base de concreto são amplamente utilizados. Isso devido às características como baixa porosidade e elevada resistência mecânica. Quando reforçado com a introdução de vergalhões de aço cria-se um material extremamente durável e resistente chamado de concreto armado, o que possibilita a construção de pontes, edifícios entre outros (Damme, 2018).

O concreto é um dos materiais de construção mais novos que existem. Foi criado no século XIX e foi muito difundido a partir do século XX. O cimento já é um dos materiais mais consumidos da terra, só perdendo para a água (Souza et al., 2021). No Brasil, o concreto é o principal elemento construtivo e o mais utilizado. Basicamente toda construção do Brasil é feita em alvenaria; tendo raras exceções (Souza et al., 2021).

Os métodos de construção sofreram alteração ao longo das décadas. Essas revoluções podem ser divididas em quatro, partindo da construção utilizando pedras e chegando até o concreto protendido.

3.1.1 Primeira revolução: construções em rocha

A construção com rochas foi o principal método utilizado pelas civilizações antigas, sendo fundamental no desenvolvimento das primeiras grandes estruturas arquitetônicas. Esse método predominou até a Revolução Industrial, quando surgiram materiais mais avançados. Imhotep, considerado o primeiro arquiteto da história, destacou-se por projetar a primeira pirâmide durável, a Pirâmide de Djoser, em cerca de 3200 a.C. Essa obra foi um marco evolutivo na construção, consolidando o uso da pedra como material de grande resistência e durabilidade (Helene e Andrade, 2007).

Outras civilizações também adotaram as rochas como elemento essencial em suas construções. Gregos, astecas e muitas outras culturas criaram templos, palácios e monumentos usando ferramentas rudimentares para trabalhar as pedras. No entanto, as estruturas feitas com esse método tinham limitações, como a dificuldade em vencer grandes vãos ou atingir alturas significativas, ficando restritas a formatos como arcos e abóbadas. Com o tempo, essas restrições levaram à necessidade de inovações que revolucionaram a arquitetura (Helene e Andrade, 2007).

3.1.2 Segunda revolução: aço estrutural

Esta grande transformação ocorreu no final do século XVIII e início do XIX, com a introdução do aço, que permitiu a criação de estruturas com vãos maiores. Um exemplo significativo é a Coalbrookdale Bridge, localizada em Telford, cuja construção foi finalizada em 1781 (Helene e Andrade, 2007).

Outra obra importante dessa época, ainda em funcionamento, é a Ponte do Brooklyn, em Nova York. Vale lembrar que, antes da invenção do concreto armado, as fundações dessa ponte foram feitas com blocos de pedra (Helene e Andrade, 2007).

Com o tempo, outras pontes foram projetadas, aprimorando os métodos construtivos com o uso do aço estrutural. Em 1888, Leroy Buffington patenteou um novo método de construção, que consistia em um esqueleto formado por vigas, pilares e lajes (Helene e Andrade, 2007).

Essa inovação tornou possível a construção de arranha-céus de grandes alturas, com paredes desempenhando principalmente a função de vedação. Esse método ficou conhecido como a Escola de Chicago (Helene e Andrade, 2007).

3.1.3 Terceira revolução: concreto armado

A terceira revolução na construção civil está associada à utilização do concreto armado como elemento estrutural. O concreto simples, empregado desde a Roma Antiga, era uma mistura básica de cal hidratada e argila pozolânica, utilizada em pavimentos e rodovias.

No entanto, o desenvolvimento de técnicas modernas de concreto teve início em 1824, com a patente do cimento Portland por John Aspdin, mas foi somente em 1892 que François Hennebique introduziu um método revolucionário: o concreto armado (Helene e Andrade, 2007).

O concreto armado consiste em reforçar o concreto com barras de aço, unindo a resistência à compressão do concreto com a resistência à tração do aço. Essa inovação permitiu a criação de estruturas mais seguras e versáteis. Hennebique aplicou esse método em obras icônicas, como a construção da primeira ponte de concreto armado em 1899 e de um edifício de sete andares em 1901, que já apresentava pilares, lajes e vigas similares às práticas modernas (Helene e Andrade, 2007).

Esse método transformou a engenharia civil, proporcionando a base para a construção de edifícios e pontes mais altos e resistentes, consolidando-se como uma das principais inovações do setor (Helene e Andrade, 2007).

3.1.4 Quarta revolução: concreto protendido

Para atender à demanda por maior resistência e pela construção de vãos mais amplos, no final do século XX, Freyssinet desenvolveu a patente do concreto protendido. Esse processo envolve a introdução de tensões prévias no concreto por meio de cabos de aço esticados desde o início da obra. Esse pré-tensionamento gera forças compressivas no concreto, o que aumenta significativamente sua resistência (Souza et al., 2021).

Em outras palavras, a técnica consiste em aplicar tensão antecipadamente ao concreto, fortalecendo-o contra forças de tração que possam atuar posteriormente. Esse avanço permitiu a construção de estruturas com vãos maiores e desempenhou um papel crucial na edificação de grandes pontes e obras de engenharia arrojadas (Souza et al., 2021).

3.2 Patologias de Construção

A indústria da construção civil faz parte da base de qualquer sistema econômico se mostrando como um setor de bastante lucratividade em todo o mundo. Instalações elétricas, telecomunicações, hospitais entre outras estruturas, estão dentro do escopo de atuação dessa indústria.

O cimento é o elemento base e o mais utilizado pela indústria da construção civil; indústria essa que transita por todas as atividades e que é a base do saneamento e da infraestrutura de qualquer região (Da Silva, 2022).

Acreditava-se nos primórdios que o concreto, pelas suas propriedades fosse indestrutível, entretanto com o passar do tempo foi percebido que agentes agressores presentes no ambiente, bem como erros de projeto culminaram na deterioração das estruturas.

O termo patologia é muito utilizado na área médica. De acordo com o dicionário Priberam, é a parte da medicina que estuda as doenças e os desvios e patologias que as causam ou caracterizam.

Da mesma maneira o termo patologia pode ser empregado na construção civil. No caso, a edificação passa a ser o paciente, e o estudo fica voltado aos problemas de projeto, execução e de agentes externos que possam afetar a estrutura (Neves e Vázquez, 2021).

Schmoeller e Lima (2021) afirmam também que as patologias na construção dizem respeito a falhas que aparecem com o tempo, afetando a durabilidade, estabilidade, desempenho ou funcionalidade da estrutura.

Assim como nos estudos das doenças, na medicina, cada patologia de construção apresenta sintomas únicos e se constatadas nos períodos iniciais podem ser

reversíveis, no entanto com o passar do tempo, sem correção podem se transformar em problemas (Nunes, 2021).

De acordo com Nunes (2021), os principais tipos de patologia são trincas, fissuras, porosidade, desbotamento, rachaduras, gretamento, infiltração, bolhas, destacamento, carbonatação e corrosão de armaduras.

Dentre essas patologias a principal, de acordo com Shamoeller e Lima (2021) a corrosão de armaduras se mostra como uma das patologias mais preocupantes. Isso porque a corrosão pode gerar ruptura parcial ou total de uma estrutura; além de que a correção desta patologia requer mão de obra especializada e equipamentos específicos, elevando o custo do reparo.

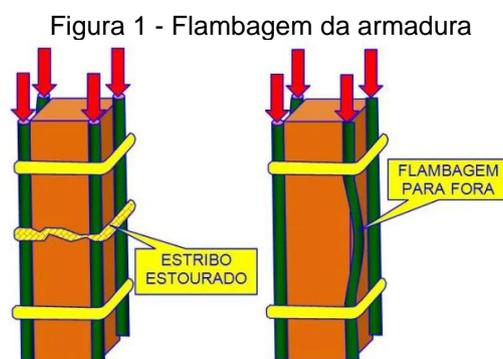
3.3 Corrosão de Estruturas

Como mencionado anteriormente, o concreto armado é composto por cimento, água, agregados e aço. É importante dizer que, mesmo estando protegido fisicamente e quimicamente pelo concreto, o aço presente no concreto armado pode sofrer corrosão, gerando inúmeros problemas.

De acordo com Martins (2022), a corrosão das armaduras é uma das patologias mais comuns em estruturas de concreto. Trata-se de um fenômeno eletroquímico que envolve dois processos principais: a degradação do metal e a deterioração química dos materiais não metálicos presentes no concreto.

3.3.1 Consequências da corrosão de armaduras

Vale ressaltar que a perda de seção do aço ocasionada pela corrosão, pode gerar problemas graves na estrutura. Quando os estribos dos pilares têm a sua função prejudicada pela corrosão, a armadura pode sofrer flambagem, que é a curvatura longitudinal, podendo ter sua ruptura a qualquer momento (Watanabe, 2023). Observe a figura 1:



Fonte: (Watanabe, 2023)

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Outro problema relacionado à corrosão de estruturas é o surgimento de fissuras e rachaduras. Isso se dá pelo fato de os produtos de corrosão gerados pelas reações eletroquímicas serem expansivos, gerando assim tensões no concreto (Donadio; Capacho; Santander, 2023).

Essa expansão gera além das fissuras o surgimento de destacamentos da estrutura. Observe a figura 2 o destacamento e, uma estrutura:

Figura 2 - Ferragem exposta por causa do alto grau de corrosão



Fonte: (ASOPE Engenharia, 2018)

Podem ser encontrados casos na literatura de ruptura total ou parcial tendo como causa a corrosão de armaduras. Um dos exemplos de ruptura total é o desabamento do edifício Palace II, que fica localizado no Rio de Janeiro (Nóbrega, 2018 apud).

Esse desabamento ocorreu no dia 27 de fevereiro de 1998 e no laudo oficial anexado no processo jurídico foram apontadas falhas de projeto e falta de manutenção adequada. Esses problemas facilitaram a corrosão das armaduras, e se deram pela falta de cobrimento adequado dos pilares, gerando assim trincas e rachaduras. Observe a figura 3 a que parcial do edifício.

Figura 3 - Queda do edifício Palace II



Fonte: (Lincolins, 2019)

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Ao todo o desabamento deixou 8 vítimas fatais, além das perdas de bens materiais e financeiros (Lopez, 1998 apud Caldas e Nogueira, 2023).

Outro caso que ganhou notoriedade foi a ruptura parcial do viaduto da marginal Pinheiros, em São Paulo, no dia 15 de novembro de 2018. O viaduto cedeu aproximadamente 2 metros deixando 5 veículos danificados e ferindo uma pessoa; deixando o trânsito com bastante lentidão São Paulo, 2019 apud 1998 apud Caldas e Nogueira, 2023).

De acordo com o Ministério Público de São Paulo, dentre os principais problemas se destacam a oxidação do concreto, o desgaste das juntas de dilatação, infiltração de água, oxidação do concreto e corrosão das armaduras (Caldas e Nogueira, 2023).

3.3.2 Fatores que Aceleram a Corrosão

Vários fatores podem influenciar a corrosão de armaduras, entretanto os que se destacam são: Agressividade ambiental, Relação água/cimento e o concreto de cobertura (Caldas e Nogueira, 2023).

3.3.2.1 Agressividade ambiental

A presença de gás carbônico (CO₂) bem como a presença de salinidade no ambiente são fatores preponderantes para o aumento da agressividade ambiental.

O macroclima e a atmosfera em que a construção está inserida também interfere nos fatores de agressividade ambiental. De acordo com a norma NBR 6118/14 classifica os ambientes quanto a sua agressividade. Observe o quadro 1 a seguir:

Quadro 1 - Classe de agressividade ambiental

| Agressividade | Classe de Agressividade | Ambiente | Risco de deterioração |
|---------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| Fraca | I | Rural e Submerso | Insignificante |
| Moderada | II | Urbano | Pequeno |
| Forte | III | Marinho e Industrial | Grande |
| Muito forte | IV | Respingo de Maré | Elevado |

Fonte: (ABNT, 2014).

3.3.2.2 Concreto de cobrimento

O concreto fornece a armadura proteção química e física. Quimicamente falando, ao ser misturado com a água o concreto torna-se alcalino, com um pH próximo a 12,5, garantindo proteção contra agentes agressivos externos (Gentil, 2022 apud Caldas e Nogueira, 2023).

A espessura da cobertura confere, por sua vez, proteção física, impedindo a penetração de agentes agressivos como íons cloretos, entre outros. Helene (1993) (apud Caldas e Nogueira, 2023) afirma que existindo um cobrimento adequado, a ação

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

de agentes da corrosão eletroquímica é impedida; sendo um fator importante para a mitigação dessa patologia.

A mesma norma citada acima também prevê o cobrimento adequado para cada nível de agressividade ambiental. Observe no quadro 2 a seguir:

Quadro 2 - Concreto de cobrimento

| Tipo de estrutura | Componentes | Classe de agressividade (Cobrimento (mm)) | | | |
|---------------------|-----------------------|---|----|-----|----|
| | | I | II | III | IV |
| Concreto armado | Laje | 20 | 25 | 35 | 45 |
| | Viga/pilar | 25 | 30 | 40 | 50 |
| | Elementos estruturais | 30 | 30 | 40 | 50 |
| Concreto protendido | Laje | 25 | 30 | 40 | 50 |
| | Viga/pilar | 30 | 35 | 45 | 55 |

Fonte: (ABNT, 2014).

3.3.2.3 Relação água/cimento

A relação água/cimento é um fator preponderante para a penetração de agentes agressivos no concreto. Ela diz respeito a proporção de água relacionada a proporção de cimento. Está também relacionada diretamente com a porosidade e a resistência do concreto (Caldas e Nogueira, 2023).

Quanto maior for relação água cimento, maior será a presença de água e conseqüentemente, maior presença de espaços vazios no concreto; entendendo os espaços vazios como porosidade. Dessa forma, a Norma referida acima também estipula uma faixa de relação água cimento para cada classe de agressividade ambiental (Santos; Silva; Leite, 2021). Observe o quadro 3 a seguir:

Quadro 3 - Relação água cimento

| Concreto | Tipo | Classe de Agressividade | | | |
|-------------|------|-------------------------|--------|--------|--------|
| | | I | II | III | IV |
| Relação a/c | CA | ≤ 0,65 | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,45 |
| | CP | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,50 | ≤ 0,45 |

Fonte: (ABNT, 2014).

3.3.3 Mecanismos da corrosão de armaduras

A corrosão de armaduras, como citado acima, é um processo eletroquímico. Nesse processo duas reações ocorrem sendo a reação de oxidação e a de redução. Pode-se compreender a reação de oxidação como a de perda de elétrons e a reação de redução de ganho de elétrons (Schmoeller e Lima, 2021).

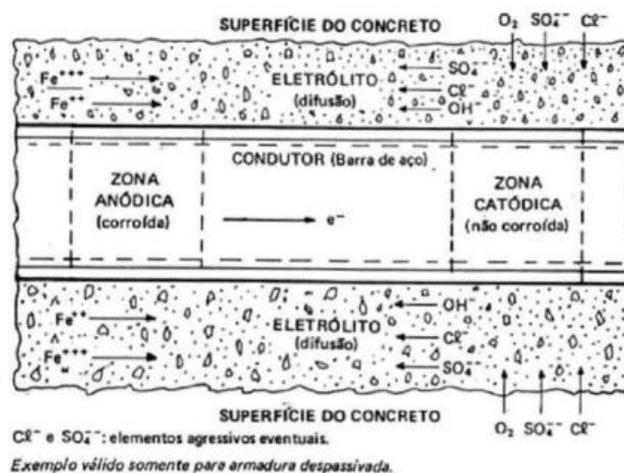
No mecanismo da corrosão um fator que é de extrema importância é a presença do eletrólito de diferença de potencial, que nesse caso é a água presente na mistura do concreto (Helene, 1986).

No interior do concreto, a barra de aço desenvolve uma pilha eletroquímica, resultando na formação de duas regiões distintas no metal: uma anódica e outra

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

catódica. Com a presença do eletrólito mencionado anteriormente e o estabelecimento de uma diferença de potencial, ocorre o fluxo de uma corrente elétrica (Helene, 1986). Observe esse mecanismo na figura 4:

Figura 4 - Mecanismo da corrosão de armaduras



Fonte: (Helene, 1986).

Dependendo do gradiente de oxigênio e da corrente elétrica criada, ocorrerá corrosão (Martins, 2022).

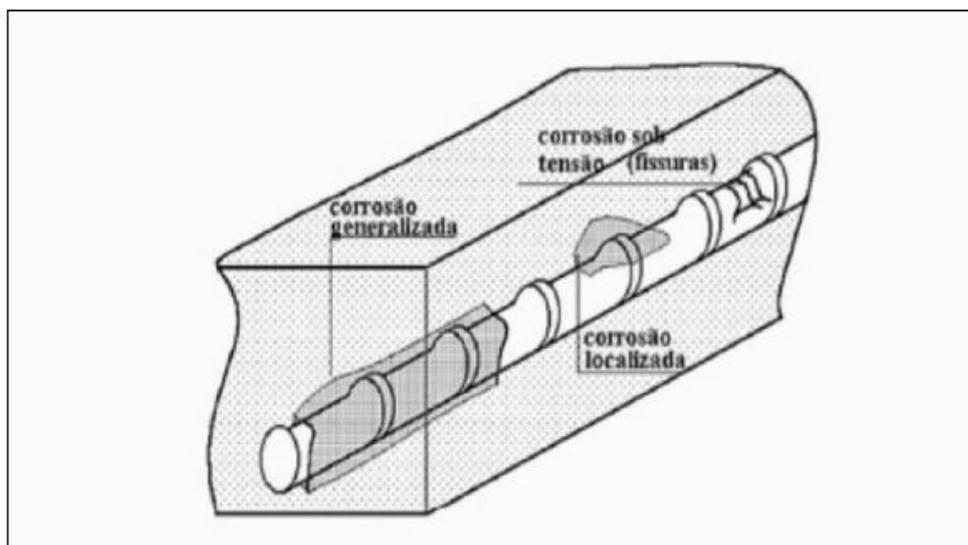
A formação da pilha eletroquímica ocorre devido à diferença de potenciais entre duas regiões do metal, que tende a se equilibrar, resultando na criação de uma dupla camada elétrica. Esse fluxo de elétrons acontece ao longo da barra de aço, que atua como condutor (Cascardo, 1997).

Na zona anódica ocorre a perda de elétrons, resultando na oxidação do metal. Já a zona catódica recebe os elétrons advindos da zona anódica, ocorrendo assim deposição catódica (Cascardo, 1997).

Alguns fatores podem acelerar ou agravar a corrosão das armaduras em concreto armado. Dentre eles é válido citar a presença de sulfetos, dióxido de carbono, nitritos, cloretos e como será visto mais adiante a presença de fungos, bactérias que também podem contribuir para a iniciação da corrosão e seu agravamento (Marcelli, 2007 apud Martins, 2022).

A corrosão do aço no concreto armado pode tomar 3 formas distintas sendo elas por pites podendo ser também generalizada, corrosão sob tensão fraturante e a corrosão por hidrogênio atômico. Destas, a mais preocupantes é a por pites, que em sua maioria é causada pela presença de agentes agressivos (Souza e Ripper, 1998). Observe a figura 5 a seguir:

Figura 5 - Tipos de corrosão de armaduras



Fonte: (Souza e Ripper, 1998).

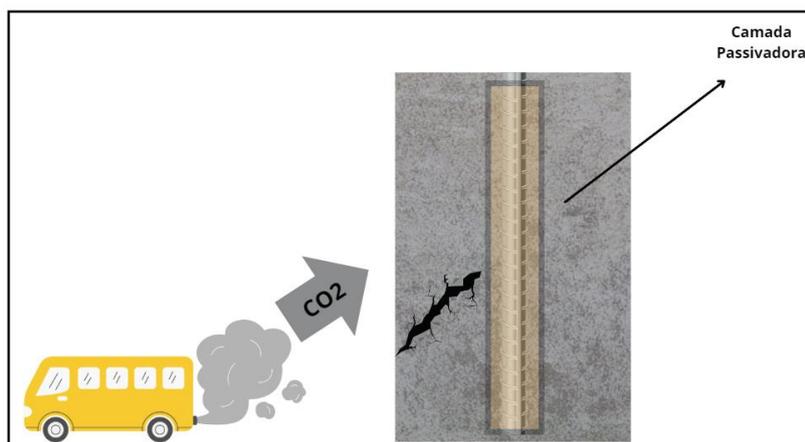
Como dito anteriormente, o concreto possui um pH de aproximadamente 12,5. Esse ambiente alcalino confere proteção a armadura, fazendo com que se forme uma camada passivadora ao longo das barras de aço. A carbonatação e a ação dos íons cloretos podem ser responsáveis pela despassivação (Schmoeller e Lima, 2021).

3.3.3.1 Carbonatação

Como já se sabe a questão envolvendo a propagação do dióxido de carbono na atmosfera é vasta e engloba vários setores. Não diferente dos demais, a indústria da construção civil também é afetada pela presença desse gás na atmosfera (Krug et al., 2023).

O CO_2 é responsável por afetar a durabilidade das estruturas afetando diretamente a sua vida útil. Isso porque o dióxido de carbono é responsável por um processo conhecido como carbonatação (Krug et al., 2023). Isso acontece porque o gás reage com os compostos do cimento hidratado, formando assim carbonato de cálcio (Krug et al., 2023). Observe na figura 6 a seguir:

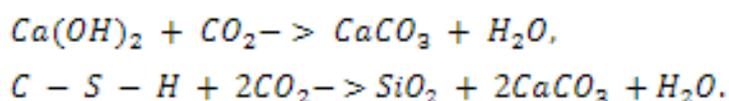
Figura 6 - Mecanismos da carbonatação



Fonte: Autoria própria (2025).

Quimicamente falando, o dióxido de carbono penetra pelos poros do concreto, como demonstrado na figura 6. Dessa forma, reage com os produtos resultantes da hidratação do concreto, como hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio (c-s-h) hidratado, dessa reação se resultam o carbonato de cálcio (CaCO_3) juntamente com o gel de sílica. Observe a equação 1 a seguir (Rostami et al., 2012 apud Krug et al., 2023):

Equação 1 - Reação de carbonatação

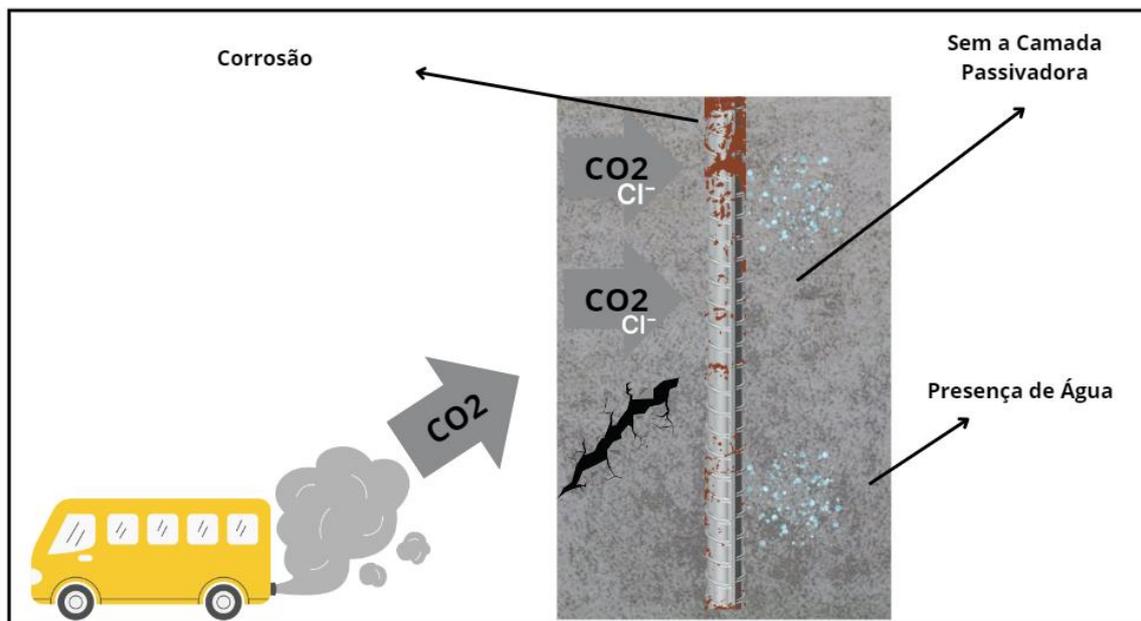


Fonte: Rostami et al., 2012 (apud Krug et al., 2023)

A camada passivadora se forma devido à alta presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resultante da hidratação dos silicatos presentes no cimento, o que eleva o pH do concreto. Com a penetração do CO_2 , ocorre a produção de H_2O e CaCO_3 . Dessa forma, estabelece-se uma relação inversamente proporcional: à medida que a concentração de água e CaCO_3 aumenta, a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reduz (LU et al., 2018).

Esse processo em si pode não ser danoso do ponto de vista da corrosão, tendo em vista que o CaCO_3 preenche os poros do concreto conferindo assim mais resistência. No entanto, quando essa carbonatação chega na profundidade da armadura, a deixa suscetível a agentes agressivos como íons cloretos e a água, pois baixando o pH do concreto gradualmente a camada passivadora deixa de existir (LU et al., 2018). Observe na figura 7:

Figura 7 - Penetração de agentes agressivos



Fonte: Autoria própria (2025).

3.3.3.2 Ação dos íons cloretos

O ataque de íons cloretos é uma das principais causas de corrosão de armaduras. É válido citar que os cloretos podem atuar tanto destruindo a camada passivadora como também impedindo a sua formação (Marcelli, 2007 apud Martins, 2022).

A presença de íons cloreto no concreto pode ocorrer devido à contaminação de seus componentes, como água, agregados ou aditivos à base de cloreto de cálcio. Além disso, devido à sua porosidade, o concreto permite a penetração desses íons, que podem ser transportados pela névoa salina em áreas litorâneas ou por águas industriais e residuais (Soares et al., 2015 apud Martins 2023).

Após a penetração no concreto os íons cloretos atravessam a camada passivadora e formam o anodo, sendo o catodo a parte da superfície passivada. Dessa forma, as seguintes reações acontecem:

Equação 2 - Reação dos íons cloretos e a barra de aço



Fonte: Soares et al., 2015 apud Martins (2023).

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Conforme a equação acima demonstra, ocorre a formação de cloreto de ferro, o que indica uma aceleração do processo de corrosão. Essas moléculas vão se tornando instáveis e, por meio da hidrólise, geram hidróxido de ferro, liberando íons cloreto para outras regiões (Meira, 2017 apud Bertuci; Duarte; Rezende, 2023).

De modo geral, a corrosão ocorre em duas etapas sequenciais: iniciação e propagação. Na fase de iniciação, os agentes agressivos penetram no concreto e provocam a despassivação da armadura (Bertuci; Duarte; Rezende, 2023).

Já na fase de propagação, a presença de umidade e oxigênio acelera o processo corrosivo. É nesse estágio que surgem manifestações patológicas, como fissuras e destacamentos, comprometendo a durabilidade da estrutura e podendo resultar em rupturas parciais ou totais (Bertuci; Duarte; Rezende, 2023).

3.4 Corrosão Induzida Por Microrganismos (CIM)

A corrosão induzida por microrganismos (CIM) ocorre devido à atividade metabólica dos biofilmes, que intensificam o processo corrosivo nas superfícies afetadas. Isso significa que esses microrganismos podem liberar substâncias corrosivas e, além disso, provocar corrosão galvânica por meio da distribuição irregular da cobertura na superfície ou da diferença na aeração. (Hu et al., 2022).

Dessa forma, pode-se afirmar que a corrosão induzida por microrganismos segue os mesmos princípios da corrosão eletroquímica, diferenciando-se apenas na etapa inicial. Em outras palavras, os microrganismos têm a capacidade de tanto iniciar quanto acelerar a reação eletroquímica responsável pela corrosão (Santos et al., 2024).

De acordo com Videla (2003) alguns microrganismos podem se envolver em diferentes graus no processo de biocorrosão. Dentre eles é válido citar:

3.4.1 Fungos

A biocorrosão causada por fungos pode ocorrer na aviação, especialmente em tanques de combustível de aeronaves. Segundo Videla (2003), o fungo *Hormoconis resiniae* pode se desenvolver em sistemas que contêm água e combustível.

O crescimento desse fungo é mais evidente na interface entre a água e o combustível, resultando na redução do pH devido à produção de ácidos orgânicos. Esses ácidos contribuem para a corrosão das ligas de alumínio empregadas na fabricação dos tanques de combustível (Videla, 2003).

3.4.2 Algas

As algas são microrganismos eucarióticos que podem ser encontrados nos mais diversos ambientes. Além disso, são organismos autotróficos e que realizam a fotossíntese (Videla, 2003).

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

As algas estão mais relacionadas com a bioacumulação e contaminação de sistemas de abastecimento de água. Estão frequentemente ligadas a casos de bioacumulação em plataformas offshore (Videla, 2003).

As algas, através de bioacumulação, favorecem o crescimento de organismos heterotróficos facilitando assim os processos de deterioração de rochas (Videla, 2003).

3.4.3 Bactérias

As bactérias são os principais microrganismos responsáveis pelos processos de biocorrosão e bioacumulação. Dentre os diversos grupos, os que se destacam são aqueles que participam na natureza do ciclo do enxofre (Videla, 2003). A seguir pode-se observar os principais tipos que participam da biocorrosão citadas na literatura:

3.4.3.1 Bactérias oxidantes de enxofre

Entre as bactérias oxidantes de enxofre se sobressaem as bactérias do gênero *thiobacillus* (Videla, 2003). Elas são em sua maioria autotróficas; podendo ser encontrado algumas bactérias heterotróficas (Kumar *et al.*, 2020).

Os *thiobacillus* possuem alguns gêneros relacionados sendo eles *Acidithiobacillus*, *thermithiobacillus* e *Halothiobacillus*. Estes constituem três grupos importantes de bactérias oxidantes de enxofre (Kumar *et al.*, 2020).

Esse grupo de microrganismos apresenta dois mecanismos para oxidação de enxofre. observe a seguir (Kumar *et al.*, 2020):

- **Oxidação Aeróbica**

Nesse processo o O₂ é utilizado como acceptor de elétrons terminal. O que ocorre é que o enxofre é oxidado em sulfito.

- **Oxidação Anaeróbica**

Nesse mecanismo as enzimas da classe das oxidoreductase, que são enzimas que aceleram reações de oxidação-redução, são utilizadas como acceptoras de elétrons terminal, gerando sulfato (Zhang *et al.*, 2018 apud Kumar *et al.*, 2020).

Esse gênero pode ser encontrado em ambientes extremos, como por exemplo ambientes ácidos e abundante em enxofre e ferro. Essas interações são capazes de fazê-los se desenvolver em ambientes com déficit de nutrientes (Kumar *et al.*, 2020).

As principais características desses microrganismos são a utilização de dióxido de carbono como fonte principal de carbono. São em sua maioria aeróbicas, podendo ser também anaeróbica, e possuem formato de bacilos curtos (Videla, 2003).

Sua temperatura ótima está entre 10 e 37°C; entretanto existem algumas termofilias que podem crescer em temperaturas superiores a 55°C. São bactérias em sua grande maioria gram-negativas (Videla, 2003).

3.4.3.2 Bactérias redutoras de sulfato (BRS)

Essas bactérias, como o próprio nome sugere, são bactérias que são participantes do ciclo do enxofre, entretanto reduzem o íon sulfato. Essa redução pode ocorrer por dois mecanismos distintos (Videla, 2003).

As bactérias redutoras de sulfato são divididas em dois grupos distintos; sendo essa distinção feita a partir da capacidade de formação de esporos. O primeiro gênero é o *Desulfotomaculum* que possui sete espécies. Já o segundo gênero é o *Desulfovibrio* que possui cinco espécies (Videla, 2003).

As bactérias redutoras de sulfato podem ser visualizadas como bacilos curvos em formato de vírgula. A temperatura ótima para o crescimento é entre 22 e 44°C, e o pH em torno de 5,5 e 9,0. São estritamente anaeróbicas e possuem movimentação feita por flagelo polar (Videla, 2003).

As bactérias redutoras de sulfato por vezes trabalham em associação com bactérias aeróbicas que consomem o oxigênio do meio através da respiração. São heterotróficas e possuem a habilidade de se fixar a vários tipos de superfícies formando biofilmes com outros tipos de bactérias. (Santos et al., 2022)

Elas agem após o filme passivo que recobre a superfície do metal, e possuem dois mecanismos que podem acontecer separados ou ao mesmo tempo (Dinh et al., 2004).

- **Mecanismo direto:**

Esse mecanismo está diretamente relacionado à capacidade hidrogenástica das BRs, conforme descrito na teoria da despolarização catódica (Dinh et al., 2004).

Ao consumir o hidrogênio presente na superfície do metal, ocorre uma modificação que inibe a recombinação dos átomos de hidrogênio na região catódica, resultando na aceleração do processo de corrosão (Videla, 2003).

- **Mecanismos Indireto:**

Nesse mecanismo a corrosão acontece pela formação de H₂S (ácido sulfúrico), a partir do processo metabólico de redução do sulfato para sulfeto. Outros mecanismos também estão envolvidos nesse mecanismo, como a atuação da enzima hidrogenase sobre o composto FeS (Videla, 2003).

3.5 Mecanismos Da Corrosão Induzida Por Microrganismos (CIM)

Observe a seguir quais os agentes e como se dá a biocorrosão e a biodeterioração, e como esses dois fatores podem estar ligados quando se fala de concreto armado.

A corrosão através de processos eletroquímicos continua ocorrendo e se mantém presente na biocorrosão. Ou seja, os microrganismos podem atuar acelerando

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

ou iniciando a reação eletroquímica da corrosão. Um fator indispensável para a manutenção desse processo é a formação do biofilme, onde a comunidade bacteriana, por meio do seu processo metabólico, pode influenciar diretamente a concentração de oxigênio (Videla, 2003; Larry & Hamilton, 2007 apud Dos Santos *et al.*, 2024).

Em resumo, pode-se esclarecer o processo biológico da corrosão da seguinte forma (Videla, 2003, p.2):

- Os microrganismos se prendem à superfície e formam o biofilme, que é composto pela excreção dos exopolissacarídeos (EPS);
- Abaixo da colônia de bactérias, por causa do processo de respiração (levando em consideração que as bactérias desse exemplo são aeróbias), existe o consumo de oxigênio, criando assim uma região anaeróbia sobre a superfície;
- Como o biofilme não recobre toda extensão da superfície, existirá outra região com maior presença de oxigênio;
- Dessa forma, na região sob a colônia microbiana as reações anódicas (oxidação) acontecerão, e em outro ponto, onde não existe a presença dos microrganismos as reações catódicas (redução) acontecerão;
- Entretanto, a corrosão tende a ser piorada pela excreção de substâncias por parte das bactérias, como também pela manutenção da variação da concentração do oxigênio.

Videla (2003) afirma que a formação do biofilme interfere e modifica a interação entre o metal e a bactéria, podendo induzir, acelerar ou até mesmo inibir os processos relacionados à corrosão possibilitando a ocorrência do processo descrito acima. Observe a seguir como se dá a formação do biofilme e qual a sua composição:

3.5.1 Biofilme

Os microrganismos possuem a capacidade de se aderir a qualquer superfície, seja ela inerte ou não. Tecidos vivos, rochas, ferro e outras superfícies estão sujeitas a aderência e posteriormente acúmulo de microrganismos (Alotaibi e Bukhari, 2021).

O que possibilita a fixação e a possibilidade de suportar condições adversas do ambiente, bem como a formação de consórcio microbiano é o biofilme; consórcio formado por comunidades complexas (Asma *et al.*, 2022). O biofilme pode ser compreendido como agregações, ou aglutinações, de células fixadas a uma superfície, estando envoltas em uma matriz de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) (Alotaibi e Bukhari, 2021).

Uma série de fatores podem influenciar diretamente na composição do biofilme. Dentre esses fatores é válido citar a disponibilidade de nutrientes, o pH e a temperatura. Mesmo que existam diferenças entre cada composição do biofilme, os principais

nutrientes encontrados são EPS, água e células bacterianas; estima-se que 97% da composição do biofilme seja água (Alotaibi e Bukhari, 2021).

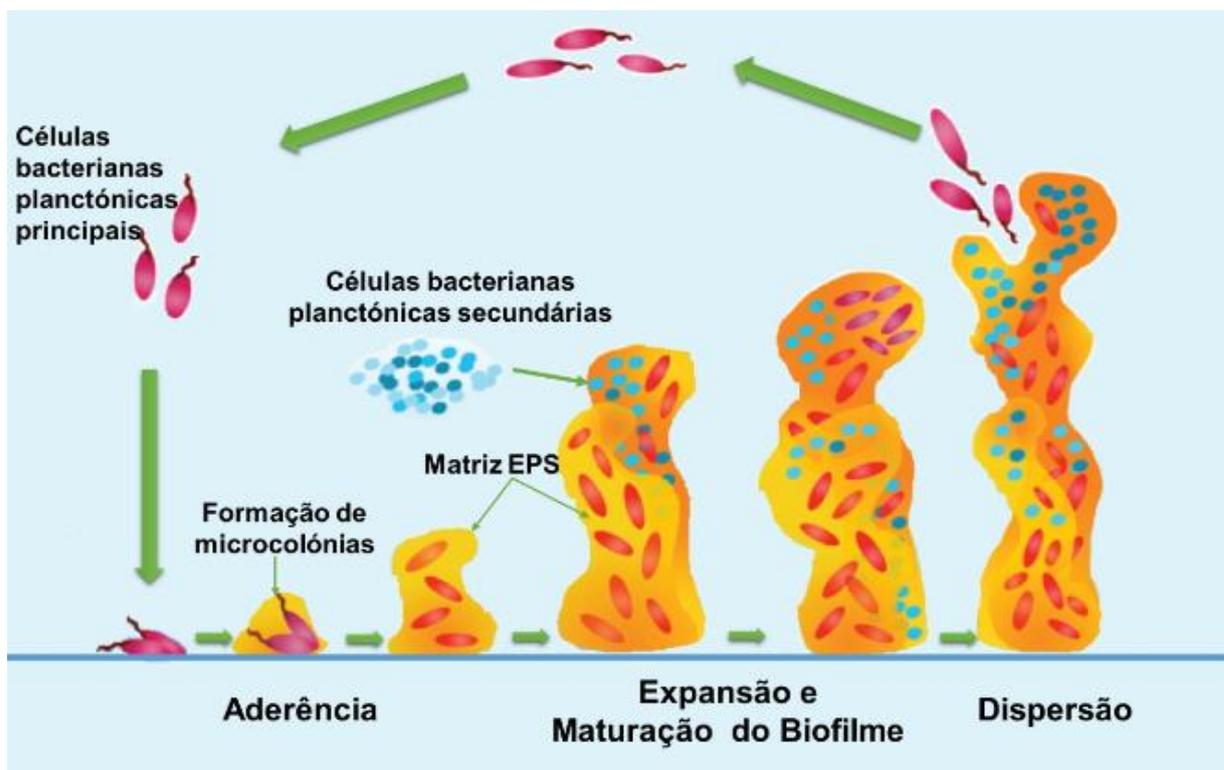
De acordo com Sutherland (2001) (apud Alotaibi e Bukhari, 2021) as substâncias poliméricas extracelulares apresentam 1-2% da composição mássica do biofilme, já as células microbianas aproximadamente 2-5%.

Conforme Vasudevan (2014) (apud Alotaibi e Bukhari, 2021) explica, a água tem um papel muito importante na composição do biofilme, pois ela conforma canais que contribuem para a distribuição de nutrientes, oxigênio e de microrganismos.

3.5.1.1 Formação do biofilme

O processo de fixação de microrganismos em uma superfície e formação do biofilme se dá em 5 etapas sendo respectivamente fixação reversível inicial, anexo irreversível, desenvolvimento da arquitetura do biofilme, maturação e por fim dispersão (Alotaibi e Bukhari, 2021). observe a seguir como ocorre cada uma dessas etapas e a exemplificação na figura 8:

Figura 8 - Etapas de formação do biofilme



Fonte: (Barbosa, 2020).

- **Fixação reversível inicial**

Essa etapa se caracteriza pela fixação dos primeiros microrganismos, estando suspensos em um fluido, a superfície. Esses microrganismos formam uma camada

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

chamada de camada de condicionamento, facilitando assim a ancoragem de outros microrganismos (Alotaibi e Bukhari, 2021).

Essa etapa pode ser formada em pouco tempo e pode ser influenciada por diversos fatores tais como as cargas da superfície e a rugosidade. Em relação aos microrganismos o que pode influenciar positivamente a fixação é a existência de pili, fímbrias e flagelos, que são apêndices externos que auxiliam na fixação e/ou locomoção dos microrganismos (Alotaibi e Bukhari, 2021).

Kumar e Anand (1998) (apud Alotaibi e Bukhari, 2021) afirmam que a adesão reversível pode sofrer alteração dependendo das tensões impostas pelo meio tais como forças eletrostáticas, interações hidrofóbicas, forças de atração de van der Waals e as tensões de cisalhamento de um fluido.

- **Anexo irreversível**

Nessa fase o arraste ou tensões impostas pelo fluido ou superfície não podem reverter a fixação pois os microrganismos fixados começam a sintetizar os EPS, gerando uma forte interação com a superfície (Zhao et al., 2017 apud Alotaibi e Bukhari, 2021).

De acordo com Dunne (2002) (apud Alotaibi e Bukhari, 2021) os organismos planctônicos, nessa fase, podem se agregar tanto uns aos outros como também a outros organismos presentes na comunidade dentro do biofilme, aumentando ainda mais afixação a superfície.

- **Desenvolvimento de Arquitetura de Biofilme**

Banerjee, Singh, Sharma (2015) (apud Alotaibi e Bukhari, 2021) afirmam que após a fixação irreversível dos microrganismos, a produção de apêndices que seriam utilizados para a locomoção, são inibidos, haja vista a não necessidade de locomoção.

A população microbiana nessa fase começa a crescer de maneira exponencial. As células microbianas começam a se dividir, utilizando nesse processo os nutrientes presentes. Nesse processo os microrganismos produzem mais EPS que servem para aumentar a adesão da colônia à superfície (Kumar e Anand (1998) apud Alotaibi e Bukhari, 2021).

Ligações mais estáveis são favorecidas pela produção de polímeros de adesão intercelular (PIA) e pela presença de cátions divalentes, isso porque os processos biológicos começam a dominar essa etapa (Alotaibi e Bukhari, 2021).

- **Maturação**

Na etapa de maturação as comunidades microbianas se encontram fixadas e se desenvolvendo em um biofilme formado e maduro. Nessa fase um dos atores fundamentais é a comunicação (Alotaibi e Bukhari, 2021).

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

De acordo com Oliveira e Saenz (2023), a comunicação é importante devido a necessidade de regulação do consumo de nutrientes, do crescimento e para reconhecimento dos demais microrganismos.

O responsável pela comunicação é o mecanismo denominado Quorum Sensing (QS). Esse mecanismo é formado por autoindutores que transpassam a membrana celular e criam uma cadeia de respostas e detecção de respostas; essas respostas podem ser, por exemplo, maior produção de biofilmes em caso de estresse. (Oliveira e Saenz, 2023).

Conforme Silverstein (2003) (apud Alotaibi e Bukhari, 2021) explica, o biofilme após a maturação possui três camadas, sendo elas uma película de união que fixa o biofilme a superfície, uma película formada por uma densa camada de bactérias e uma camada flutuante onde é possível o surgimento de bactérias flutuantes.

- **Dispersão**

Essa é a última etapa de formação do biofilme a acreditar que ela seja um dos principais responsáveis pela disseminação de patógenos, pois essas bactérias podem livremente se fixar a outras partes da superfície ou sistema reiniciando o processo de criação do biofilme. Essa dispersão pode ocorrer por diversos motivos (Alotaibi e Bukhari, 2021).

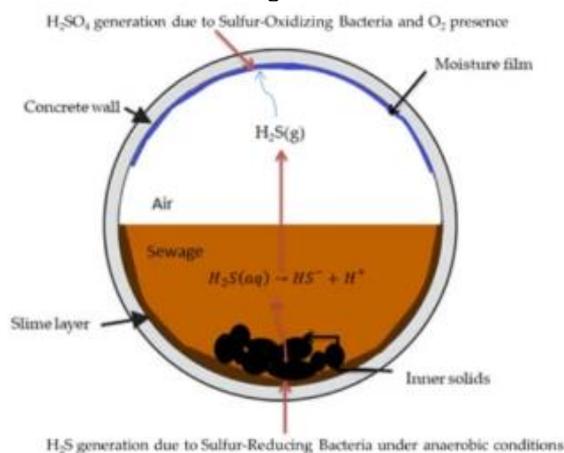
A limitação de nutrientes bem como características de escoamento do fluido e forças de cisalhamento podem ser responsáveis pela dispersão; a eliminação de células filhas também podem ser a causa da dispersão (Alotaibi e Bukhari, 2021).

3.5.2 Biodeterioração e Biocorrosão: Casos investigados

Biodeterioração está relacionada com a desintegração de matérias promovido pelas bactérias. Ou seja, o ataque promovido pelas bactérias no concreto armado pode desencadear o processo de deterioração das estruturas, bem como a corrosão das armaduras (Videla, 2003; Fytianos et al., 2020). Processos de deterioração de estruturas de concreto armado e corrosão de estruturas metálicas por microrganismos podem ser observados na literatura.

Um dos casos que pode ser usado para exemplificar o que foi dito acima é o citado por Fytianos et al. (2020). O trabalho relata a biodegradação de tubulações de esgoto na Grécia, onde se observou a produção de H_2S (sulfeto de hidrogênio), pelas bactérias e a transformação, através de reações químicas, como demonstrado na figura 9, com o meio e com bactérias redutoras de enxofre, em H_2SO_4 (ácido sulfúrico) levando a uma lenta deterioração do concreto das tubulações.

Figura 9 - Degradação de tubulações de esgoto na Grécia por produção de ácido sulfúrico biogênico



Fonte: (Fytianos et al., 2020).

Coni et al. (2022) demonstraram tanto a biodegradação da pasta cimentícia, como também a degradação do aço em uma estação elevatória de esgoto. De acordo com os autores, a degradação, em virtude da presença dos microrganismos ocorreu antes do tempo esperado.

Os autores descreveram que bactérias como, *desulfovibrio*, através da sua atividade metabolizando sulfatos, produzem ácido sulfúrico facilitando assim a deterioração da pasta cimentícia.

Outro fator importante é que a presença do biofilme e a produção de sulfeto de hidrogênio (H₂S) faz com que o PH do meio diminua, aumentando a probabilidade da despassivação da armadura e o ataca a mesma (Coni et al., 2022). A figura 10 demonstra as condições em que se encontrava a estação elevatória:

Figura 10 - Deterioração da estação elevatória de esgoto



Fonte: (Coni et al., 2022).

Hoppe Filho et al. (2014) descreveram a ação de bactérias oxidantes de enxofres nos reatores da ETE Santa Quitéria, situada na cidade de Curitiba – PR. Os

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

autores demonstraram que as paredes do reator, acima do nível da água, apresentavam maior nível de degradação; isso se comparado com o concreto das lajes de cobertura do tanque. Essa degradação foi evidenciada pela formação de gipsita; este sendo o produto da degradação desencadeada pelo ataque de ácido sulfúrico biogénico.

É válido ressaltar que a alcalinidade do concreto restringe a presença dos microrganismos. Entretanto a carbonatação e o ataque do ácido sulfúrico biogénico baixa o PH do concreto possibilitando a contaminação por bactérias redutoras de enxofre como *thiobacillus thioparus* (Islander et al., 1991).

Thiobacillus novellus e *Thiobacillus neapolitanus*, após a queda do pH, colonizam os poros do concreto e após o declínio do pH até aproximadamente 3 outras bactérias como *Thiobacillus thiooxidans* continuam a oxidação do enxofre e a produção de outros compostos que também degradam a pasta do concreto (Islander et al., 1991).

Ao observar os casos acima citados, pode-se observar que a degradação da pasta do concreto ocorre em três etapas sendo:

a) Primeira etapa:

Fatores do meio influenciam na redução do pH do concreto. Dentre os fatores os mais comuns são a carbonatação, oxidação atmosférica do H_2S e lixiviação de cálcio (Islander et al., 1991).

b) Segunda etapa:

Após a queda do pH, as bactérias redutoras de enxofre, que possuem as características de serem neutrofílicas, consumindo o H_2S produzem H_2SO_4 ; baixando ainda mais o pH do meio (Islander et al., 1991; Salomani et al., 2022).

c) Terceira etapa:

Nessa etapa outras bactérias se aderem a superfície formando biofilmes de comunidades complexas continuando assim os processos descritos na fase anterior (Salomani et al., 2022).

Os mecanismos de biodeterioração graduação e biocorrosão promovidos pelas bactérias já são consolidados na literatura (Salomani et al., 2022). No entanto, existe grande variedade de estudos focados em bactérias que participam do ciclo do enxofre, ficando de fora outros tipos de bactérias.

Bactérias como as redutoras de nitrato possuem a capacidade de induzir a corrosão nas mais diversas ligas metálicas investigadas (Liu et al., 2021). Dentre elas, se destacam na pesquisa as bactérias do grupo Bacillus, do qual as mais investigadas são *Bacillus subtilis* e *Bacillus cereus* (Hu et al., 2022).

Essas bactérias, pela capacidade de formar biofilmes complexos e de utilizar nitrato como aceptor final de elétrons induzem a corrosão em ligas metálicas por diversos mecanismos investigados (Hu et al., 2022). Ambas precipitam o carbonato de

cálcio e são utilizadas, em algumas pesquisas, como aditivo no concreto autocicatrizante (Sohail et al., 2022; Bonifácio et al., 2022).

Não foram encontrados estudos que evidenciassem a corrosão da armadura ou a degradação da pasta por *Bacillus cereus* e *Bacillus subtilis*. No entanto, seu potencial corrosivo, aliado a um ambiente agressivo pode ter o potencial de desencadear esses processos; tendo em vista o mecanismo de transferência de elétrons extracelulares (TEE) investigado por Hu et al. (2022).

3.6 *Bacillus cereus* E Suas Características

É válido dizer que, como proposto por Smith et al., 1952 (apud Drobniewski, 1993) o grupo *Bacillus* é constituído por 3 grupos grandes, dos quais, *Bacillus cereus*, se encontra no primeiro. Tendo assim células grandes com esporos cilíndricos ou elipsóides. Observe na figura 11 uma foto retirada com microscópio eletrônico de varredura:

Figura 11 - *Bacillus cereus* imagem do MEV



Fonte: (FEBRAPDP - FEDERAÇÃO BRASILEIRA DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 2024).

De acordo com Drobniewski (1993), *Bacillus cereus* é um bacilo aeróbio ou anaeróbio facultativo, é gram-positivo e possui a capacidade de formar esporos. Possui ainda uma temperatura ótima de crescimento entre 10 e 48°C (Vilas-bôas; Peruca; Arantes, 2007).

É uma espécie amplamente distribuída, podendo ser encontrada em diversos ambientes devido à sua capacidade de adaptação. Embora vivam como saprófitas, também estão presentes em alimentos de origem animal e vegetal, sendo especialmente comuns em laticínios (Vilas-bôas; Peruca; Arantes, 2007).

O *Bacillus cereus* é um dos principais microrganismos responsáveis por doenças transmitidas por alimentos (Jovanovic et al., 2023). Sua presença pode modificar a textura e o sabor dos alimentos devido à liberação de toxinas. Quando

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

ingerido o alimento contaminado, pode causar intoxicação alimentar em poucas horas, dependendo do tipo de toxina produzida (Vilas-bôas; Peruca; Arantes, 2007).

É interessante dizer que o *Bacillus cereus*, de acordo com Pandey (2003) (apud Júnior et al., 2021), é considerado um dos principais microrganismos que é capaz de produzir as enzimas amilases. É válido dizer que essa enzima possui grande importância na indústria de alimentos e na produção de glicose e frutose (Carvalho, 2008).

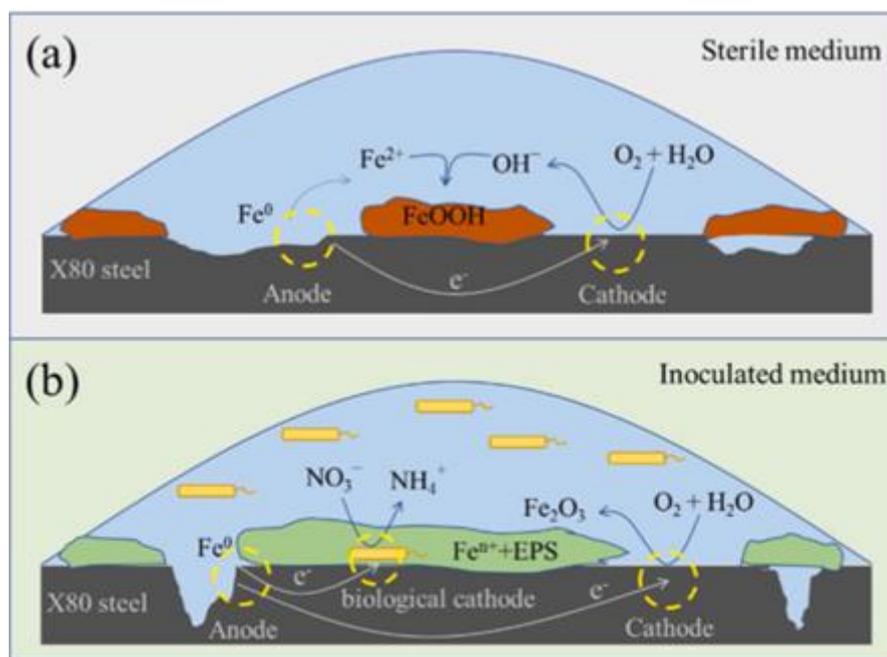
3.6.1 *Bacillus cereus* e sua ligação com a CIM e mecanismos investigados

Como dito anteriormente, os grupos destacados na indução da corrosão são bactérias redutoras de sulfato, bactérias oxidantes de enxofre, bactérias oxidantes de ferro e produtoras de ácido. Poucas pesquisas focam na indução da corrosão por bactérias redutoras de nitrato (Liu et al., 2021).

Dentre os poucos trabalhos encontrados na literatura se destaca o publicado por Wan (2018), o qual destaca a corrosão de tubulações feitas do aço x80. Outro caso que pode ser encontrado na literatura é o relatado por Parthipan (2017), onde foi constatado a oxidação de manganês e ferro. Foi constatado que o *Bacillus cereus* foi capaz de formar uma camada sobre a superfície do metal induzindo a corrosão por pites no aço carbono.

Como já evidenciado anteriormente, a formação do biofilme é fundamental para induzir a corrosão por microrganismos ou inibir a corrosão. De fato, não existem muitas pesquisas relacionando os biofilmes criados por *Bacillus cereus* e a corrosão (Liu et al., 2021).

Liu et al. (2021) investigaram a corrosão do aço x80, comumente utilizado em gasodutos. No trabalho foi imerso o aço x80 num solo contaminado artificialmente por *Bacillus cereus*. Foi evidenciado que a formação do biofilme sobre a superfície do metal e que a redução de nitrato pela bactéria, bem como as alterações do biofilme promoveram a corrosão e a formação de pites. Observe a figura 12:

Figura 12 - Mecanismo de corrosão por *Bacillus cereus*

Fonte: Liu et al., 2021.

Como se sabe, *Bacillus cereus* é aeróbio ou anaeróbio facultativo (Drobniowski, 1993). Estudos apontam que as bactérias redutoras de nitrato, assim como bactérias redutoras de sulfato, utilizam nitrato como aceptor final com a finalidade de oxidar compostos orgânicos em ambientes anaeróbios e microanaeróbio; utilizando essa energia para crescer (Kalkowski, 1991).

Dessa forma, devido ao comportamento mencionado anteriormente, as bactérias redutoras de nitrato atuam como um cátodo natural, como demonstrado na figura 12, favorecendo a dissolução do ânodo e aumentando a taxa de corrosão, o que dá início à formação de pites. (Liu et al., 2021).

Outro fator importante é que as forças motrizes termodinâmicas na CIM das bactérias redutoras de nitrato são maiores do que as das bactérias redutoras de sulfato. Isso significa dizer que para as bactérias redutoras de nitrato ganham elétrons de ferro e conseguem produzir pites mais agressivos (Li et al., 2020).

3.6.1.1 *Bacillus cereus* e a corrosão no concreto armado.

Não foram encontrados na literatura nenhuma pesquisa investigando a possibilidade de corrosão da armadura em concreto armado. O que pode ser encontrado é a utilização de *Bacillus cereus* na criação de concreto autocicatrizante.

Pesquisas como a de Sohail et al. (2022), demonstraram que algumas cepas de *Bacillus cereus* foram capazes de preencher as fissuras do concreto através da

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

formação de carbonato de cálcio; formado a partir das reações entre o biofilme e os componentes do concreto.

Reyad e Mokhtar (2023) demonstraram, através do microscópio eletrônico de varredura também que uma das cepas de *Bacillus cereus* ao ser adicionada na mistura do cimento foi capaz de curar fissuras no concreto.

Outra pesquisa foi realizada por Priyon et al. (2023) onde foi evidenciado que a inserção de *Bacillus cereus* melhorou eventualmente as propriedades físicas do concreto, isso através da formação de cristais de calcita.

Entretanto, como evidenciado anteriormente, a pesquisa de Liu et al. (2021) destacou que na presença de nitrato, as bactérias redutoras de nitrato possuem facilidade em se transformar em um catodo natural. Dessa forma ganham elétrons de ferro mais facilmente.

De fato, existem alguns aditivos no concreto que possuem nitrato na sua composição tais como nitrato de cálcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) que é um aditivo acelerador de resistência, que também é utilizado como inibidor de corrosão (Costa et al., 2018). Outra questão é a ausência de estudos sobre o potencial de biocorrosão por *Bacillus cereus* no concreto armado em ambientes salinos, o que abre espaço para uma análise mais detalhadas.

3.7 *Bacillus subtilis* e Suas Características

Como citado anteriormente o grupo *Bacillus* se destaca por sua ampla distribuição, sendo encontrado em diversos tipos de ambientes. Essa presença generalizada está diretamente ligada à sua extraordinária capacidade de adaptação (Iqbal et al., 2023).

Esse grupo de bactérias apresenta uma ampla diversidade genética. As espécies que o compõem são Gram-positivas, não patogênicas, possuem formato de bastonete e têm a capacidade de formar esporos (Iqbal et al., 2023).

Diversos estudos têm demonstrado uma variedade de aplicações práticas para essas bactérias, com destaque para:

- **Agricultura:** atuam como rizobactérias que estimulam o crescimento das plantas.
- **Indústria biotecnológica:** são empregadas em diferentes processos e na biossíntese de diversos produtos naturais e enzimas.

Devido a essas características, o *Bacillus subtilis* é amplamente utilizado como organismo modelo em pesquisas sobre a formação de biofilmes, fator crucial nos estudos sobre corrosão induzida por microrganismos (CIM) (Iqbal et al., 2023).

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Além disso, o microrganismo em questão é um redutor de nitrato, o que significa que tem a capacidade de utilizar nitrato (NO_3^-) como aceptor final de elétrons, em vez do oxigênio, convertendo-o em nitrito (NO_2^-) (Hu et al., 2022).

3.7.1 *Bacillus subtilis*: um modelo de estudos

As bactérias possuem mecanismos de adaptação que permitem sua sobrevivência em uma ampla variedade de ambientes, o que as torna objetos de estudo em diferentes áreas do conhecimento.

O *Bacillus subtilis*, em particular, tem sido objeto de pesquisa há várias décadas, sendo considerado um microrganismo modelo para investigações sobre escassez de nutrientes e a capacidade de formar esporos (Qin; Angelini; Chai, 2022).

Esse microrganismo se destaca por processos como a formação de esporos dormentes, que são extremamente resistentes a estresses ambientais, e por apresentar diferenças em mecanismos subjacentes que permitem tais adaptações (Qin; Angelini; Chai, 2022).

3.7.2 *Bacillus subtilis* e sua ligação com a CIM e mecanismos investigados

O *Bacillus subtilis* é um microrganismo modelo conhecido pela sua formação de biofilme, o que lhe proporciona maior resistência a fatores externos, conforme mencionado anteriormente.

Por isso, é importante investigar se esse microrganismo pode afetar o processo de corrosão do aço em concreto armado, seja iniciando ou acelerando sua deterioração.

Como citado anteriormente, outros microrganismos são responsáveis por causar a biocorrosão; dentre eles o que se tem mais trabalhos relacionados são os redutores de sulfato. Uma das características que o *Bacillus subtilis* tem em comum com esses microrganismos é a capacidade de gerar biofilmes densos e capazes de se fixar em diversas superfícies; e a capacidade de se associar a outros microrganismos (Dergham et al., 2021).

Conforme o estudo de Wang et al. (2020) (citado por Hu et al., 2022), que analisou a corrosão induzida por microrganismos (CIM) em ambiente marinho no aço 10MnNiCrCu, foi possível observar que a estrutura frouxa do biofilme formado por *Bacillus subtilis* facilita a migração contínua de íons cloreto em direção à superfície do aço. Ainda segundo a pesquisa de Wang et al. (2020), a secreção de material metabólico, como ácidos orgânicos, facilitava a corrosão localizada.

Hu et al. (2022) investigaram o mecanismo de corrosão, desencadeada por *Bacillus subtilis*, por meio da transferência de elétrons extracelulares (TEE). E destacaram que alguns estudos sugerem que o *Bacillus subtilis* pode gerar substâncias

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

que solubilizam e transportam o ferro, conhecidas como sideróforos. Essas substâncias ajudam no deslocamento entre o biofilme e a superfície, facilitando a dissolução dos óxidos de ferro.

3.7.2.1 *Bacillus subtilis* e a corrosão no concreto armado

Assim como o *Bacillus cereus*, não foram encontrados trabalhos que investigassem o potencial da CIM *Bacillus subtilis* no concreto armado. O que pode ser encontrado na literatura é a utilização de *Bacillus subtilis* como “aditivo no concreto”.

Bonifácio et al. (2022) fizeram um levantamento bibliográfico e demonstraram que *Bacillus subtilis* tem potencial para ser utilizado na produção de concreto autocicatrizante, tendo em vista a participação na reação de precipitação do CaCO_3 .

Karimi e Mostofinejad (2020) investigaram a adição de *Bacillus subtilis* no concreto reforçado com fibras, agindo como agente produtor de sedimentos. Foi evidenciado no estudo que a mistura do concreto com a bactéria gerou depósitos de calcita, diminuindo a profundidade de carbonatação.

Ibrahim et al. (2025) concluíram que ao acrescentar *Bacillus subtilis* em argamassa houve um aumento significativo na resistência à flexão e à compressão. Os escritores ainda fazem a ressalva de que são foram investigadas concentrações de 5% e 10%, sendo necessário análises em faixas de concentração de microrganismos maiores.

Ibrahim et al. (2025) ainda afirmam que o aumento na resistência à flexão e à compressão foram maiores especificamente nos 28 dias iniciais. Tendo um aumento de aproximadamente 15% na resistência; isso com a concentração de 5% da bactéria.

Jena et al. (2020) investigaram o concreto autocicatrizante por precipitação de calcita induzida por microrganismos (MICP). Nesse estudo constataram que houve um aumento máximo de 32% na resistência à compressão e de 14% na resistência à tração e ainda o aumento de 29% na resistência à flexão; isso utilizando *Bacillus subtilis* na mistura do concreto.

Ao analisar no MEV, Jena et al. (2020) constataram que houve o acréscimo de materiais de enchimento e deposição de calcita dentro dos poros do concreto, o que resulta no aumento de resistência citado acima.

Ahmad et al. (2025) investigaram a capacidade de cura de *Bacillus subtilis* em um ambiente com sulfatos e constatou que, em uma concentração ótima, a resistência no ambiente com sulfatos foi de 22,84%. Esse resultado foi possível, de acordo com os autores, devido a capacidade de precipitação de CaCO_3 , indicando a provável eficiência na correção de fissuras.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Como dito anteriormente, não foram encontrados na literatura experimentos que colocassem a prova a corrosão de armaduras no concreto armado por *Bacillus subtilis*, o que pode levar a uma discussão, tendo em vista o potencial corrosivo em ambientes salinos, descrito por Wang et al. (2020).

3.8 Resíduos Gerados e Sustentabilidade

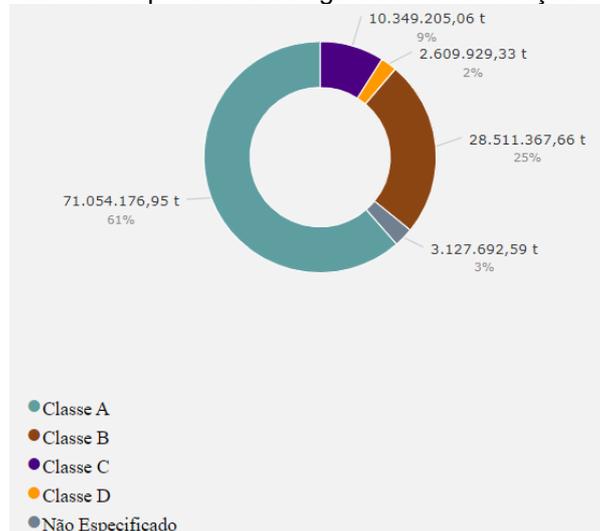
A construção civil em geral possui um consumo elevado de recursos naturais. Sendo assim, o desenvolvimento de técnicas sustentáveis de construção se mostra como um grande desafio (Masuero, 2021).

Gomes et al. (2021) concluíram que a construção civil se constitui como um dos setores que mais geram resíduos sólidos, gerando por muitas vezes impactos negativos sobre o meio ambiente; isso quando não se tem uma destinação adequada.

Silva (2007) (apud Miranda e Balduino, 2021), afirma que 50% de toda madeira retirada no mundo é destinada à construção civil. Outro dado importante é que 20 a 50% de todos os recursos naturais são utilizados pela construção civil.

De acordo com o relatório emitido pelo Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), no relatório emitido em 2021, 61% de todo o resíduo coletado da construção civil são resíduos classe A. Observe o gráfico 1:

Gráfico 1 - Tipo de resíduo gerado na construção civil

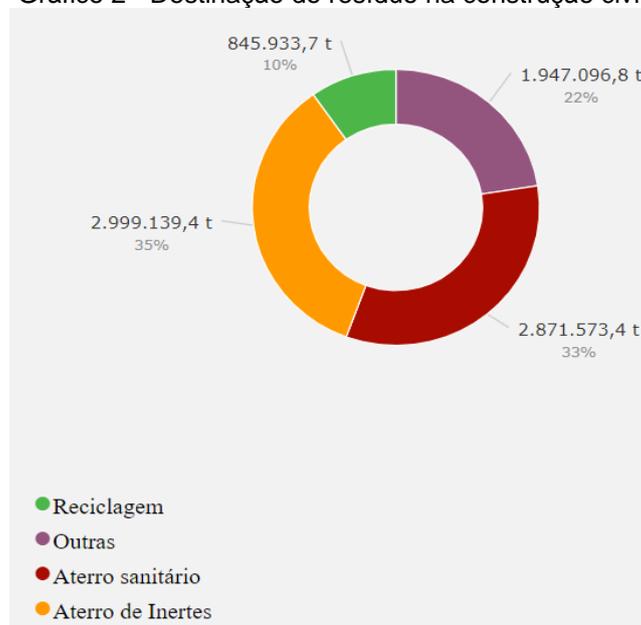


Fonte: SINIR (2021).

Os resíduos de classe A são aqueles provenientes de demolição, reformas, reparos entre outros. São eles tijolos, telhas, blocos, placas, entre outros. Esses resíduos juntamente com os da classe B são aqueles que podem ser reutilizados e reciclados.

Os resíduos de classe B, citados anteriormente constituem um total de 25% de toda massa de resíduos de construções gerados no Brasil, isso de acordo com o SINIR (2021). O que é relevante nesse levantamento é que apenas 10% do resíduo gerado pela construção civil no Brasil são reciclados, como demonstra o gráfico 2 a seguir:

Gráfico 2 - Destinação do resíduo na construção civil



Fonte: SINIR (2021).

A maior parte dos resíduos gerados são destinados a aterros ou outras formas de destinação. Ou seja, o potencial reciclável e de reutilização dos resíduos não é utilizado.

Outra questão, além da geração de resíduos, é a geração de gases do efeito estufa. De acordo com o Instituto Britânico Chatham House (apud Rodgers, 2018), a indústria de produção de cimento é responsável pela emissão de 8% de Co₂ em todo o mundo. Isso significa dizer que, se fosse um país, seria o terceiro maior emissor, ficando atrás apenas de Estados Unidos e China.

Como esses problemas citados acima, se faz necessário buscar medidas para mitigar ou diminuir as grandes correções ou demolições provenientes de problemas gerados pelas patologias, tais como a corrosão de armaduras citada no trabalho.

A avaliação e investigação de possibilidade de corrosão induzida por microrganismos nas barras de aço no concreto armado se faz necessário, pois ao descobrir esses mecanismos, inibidores podem ser desenvolvidos evitando assim mais reparos, que vão gerar cada vez mais resíduos e conseqüentemente poluição do meio ambiente.

4 REFERÊNCIA

ABNT - ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118. Projeto de Estruturas de Concreto** – Procedimento. 2014.

AHMAD, Seleem et al. **Investigating the repair of cracks through bacterial self-healing for sustainable concrete in aggressive sulfate attack environments.** Fracture and Structural Integrity, v. 19, n. 71, p. 194-210, 2025.

ALOTAIBI, Ghazay F.; BUKHARI, Mamdouh A. **Factors influencing bacterial biofilm formation and development.** Am. J. Biomed. Sci. Res, v. 12, n. 6, p. 617-626, 2021.

ASMA, Syeda Tasmia et al. **An overview of biofilm formation–combating strategies and mechanisms of action of antibiofilm agents.** Life, v. 12, n. 8, p. 1110, 2022.

BARBOSA, Jonathan Lima; DE OLIVEIRA VALIN JR, Marcos. **Análise de patologias em juntas de dilatação em ponte de concreto: estudo de caso em Cuiabá-MT.** In: TECNOLOGIA EM CONTROLE DE OBRAS: 20 ANOS DE CONTRIBUIÇÕES DO IFMT PARA CONSTRUÇÃO CIVIL. Editora Científica Digital, 2023. p. 426-443.

BARBOSA, Juliana. **Biofilmes nas indústrias de alimentos: o que são e como se formam?** - Food Safety Brazil. 17 ago. 2020. Imagem. Disponível em: <https://foodsafetybrazil.org/biofilmes-o-que-sao-e-como-se-formam/>. Acesso em: 4 mar. 2025

BONIFÁCIO, Diego Rodrigues et al. **Bacillus subtilis uma adição incomum com benefícios inesperados Ao Concreto.** REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA, v. 14, n. 2, 2022.

CALDAS, Iza Karla Rodrigues de Souza; NOGUEIRA, Núbia Alves de souza. **PATOLOGIA EM ESTRUTURAS: CORROSÃO NO CONCRETO ARMADO-ESTUDO DE CASO.** 2023.

CARVALHO, Raquel Vieira de et al. **Otimização das condições de cultivo para a produção de amilases pelo termofílico Bacillus sp. e hidrólise de amidos pela ação da enzima.** Food Science and Technology, v. 28, p. 380-386, 2008.

CASCUDO, O. **Controle da Corrosão de Armaduras de Concreto**, 1ª. Ed., Editora PINI Ltda., S. Paulo, 1997.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

COSTA, Felipe Lima et al. **Influência do uso de aditivo acelerador de resistência baseado em nitrato de cálcio no desempenho de argamassas de cimento Portland com adição de cinza volante.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, p. e12204, 2018.

DA SILVA, Leandro Souza. **INDÚSTRIA BRASILEIRA DO CIMENTO: CONSUMO E IMPACTOS AMBIENTAIS.** CONSTRUINDO, v. 14, n. 1, 2022.

DERGHAM, Yasmine et al. **Comparação das características genéticas envolvidas na formação de biofilme de *Bacillus subtilis* usando abordagens de multicultura.** *Microorganisms* , v. 9, n. 3, p. 633, 2021.

DINH, Hang T. et al. **Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms.** Nature, v. 427, n. 6977, p. 829-832, 2004.

DONADIO, M.; CAPACHO, J.; SANTANDER, L. **Gestão Total da Corrosão. Análise documental.** Revista ALCONPAT, v. 13, n. 2, p. 235-253, 2023.

DOS SANTOS, Ellen et al. **Biocorrosão e o Biofouling—uma revisão de literatura.**

DROBNIEWSKI, Francis A. ***Bacillus cereus* and related species.** Clinical microbiology reviews, v. 6, n. 4, p. 324-338, 1993.

ENGENHARIA, ASOPE. **Corrosão de armadura: o que causa e como amenizar esse dano?** 9 out. 2018. Imagem. Disponível em: <https://www.asope.com.br/single-post/2018/10/09/corrosao-de-armadura>. Acesso em: 28 fev. 2025.

FEBRAPDP - FEDERAÇÃO BRASILEIRA DO SISTEMA PLANTIO DIRETO. **Combinação de nano e biotecnologia traz avanços para o controle biológico na agricultura.** 3 abr. 2024. Imagem. Disponível em: <https://plantiodireto.org.br/combinacao-de-nano-e-biotecnologia-traz-avancos-para-o-controle-biologico-na-agricultura>. Acesso em: 6 mar. 2025.

GOMES, Carla Pinheiro et al. **Impacto Ambiental e Gerenciamento de Resíduos Sólidos Advindos da Construção Civil no Brasil: Uma Revisão de Literatura/Environmental Impact and Solid Waste Management Arising from Civil Construction in Brazil: A Literature Review.** ID on line. Revista de psicologia, v. 15, n. 55, p. 729-742, 2021.

HELENE, Paulo R. L. e FIGUEIREDO, A. **Corrosão de armaduras para concreto armado.** Revista Engenharia Mackenzie, v. 71, n. 180, p. 7-10, 1986Tradução. Acesso em: 03 mar. 2025.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto de cimento Portland. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, v. 2, p. 945-984, 2007.

HU, Yuting et al. **Microbiologically influenced corrosion of stainless steels by *Bacillus subtilis* via bidirectional extracellular electron transfer**. Corrosion Science, v. 207, p. 110608, 2022.

IBRAHIM, Osama Ahmed et al. **The influence of adding *B. subtilis* bacteria on the mechanical and chemical properties of cement mortar**. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, v. 14, n. 1, p. 3, 2025.

ISLANDER, Robert L. et al. **Ecologia microbiana da corrosão de coroa em esgotos**. Journal of Environmental Engineering , v. 117, n. 6, p. 751-770, 1991.

JENA, Shradha et al. **Impact of *Bacillus subtilis* bacterium on the properties of concrete**. Materials Today: Proceedings, v. 32, p. 651-656, 2020.

JOVANOVIC, Jelena et al. ***Bacillus cereus* food intoxication and toxicoinfection. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 4, p. 3719-3761, 2021.

JÚNIOR, Jefferson Alves da Costa et al. **Biotechnology: identification and evaluation of the *Bacillus cereus* amyolytic activity**. Research, Society and Development, v. 10, n. 13, p. e437101321301-e437101321301, 2021.

KALKOWSKI, Ingbert; CONRAD, Ralf. **Metabolism of nitric oxide in denitrifying *Pseudomonas aeruginosa* and nitrate-respiring *Bacillus cereus***. FEMS microbiology letters, v. 82, n. 1, p. 107-111, 1991.

KARIMI, Nasrin; MOSTOFINEJAD, Davood. ***Bacillus subtilis* bacteria used in fiber reinforced concrete and their effects on concrete penetrability**. Construction and Building Materials, v. 230, p. 117051, 2020.

KRUG, Lucas Fernando et al. **PROCESSO DE CARBONATAÇÃO NO CONCRETO E MODELOS PARA SUA PREVISÃO: UMA REVISÃO**. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão (ISSN: 2525-4782), v. 8, n. 2, 2023.

KUMAR, Murugan et al. **Thiobacillus. In: Beneficial microbes in agro-ecology**. Academic Press, 2020. p. 545-557.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

LI, Jun et al. **Evidencing the uptake of electrons from X80 steel by *Bacillus licheniformis* with redox probe, 5-cyano-2, 3-ditoyl tetrazolium chloride.** Corrosion Science, v. 168, p. 108569, 2020.

LINCOLINS, Thiago. **Edifício Palace II: a tragédia na Barra da Tijuca.** 15 out. 2019. Disponível em: <https://aventurasnahistoria.com.br/noticias/reportagem/historia-palace-ii.phtml>. Acesso em: 1 mar. 2025

LIU, Bo et al. **Study of biofilm-influenced corrosion on X80 pipeline steel by a nitrate-reducing bacterium, *Bacillus cereus*, in artificial Beijing soil.** Colloids and Surfaces B: biointerfaces, v. 197, p. 111356, 2021.

LU, Cai-feng et al. **Effects of micro-environmental climate on the carbonation depth and the pH value in fly ash concrete.** Journal of Cleaner Production, v. 181, p. 309-317, 2018.

MARTINS, Debora Kelly Garcia. **Corrosão de armaduras em concreto armado.** CONSTRUINDO, v. 14, n. 2, 2022.

MASSARU WATANABE, Roberto. **Trincas causadas por infiltração e corrosão da armadura.** 26 jan. 2023. Acesso em: 28 fev. 2025.

MASUERO, Angela Borges. **Desafio da Construção Civil: crescimento com sustentabilidade ambiental.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, n. 04, p. e13123, 2021.

MIRANDA, Ana Carolina Lopes; BALDUINO, Angelo Ricardo. **Gerenciamento resíduos gerados na construção civil: uma revisão bibliográfica.** Management waste generated in civil construction: a bibliographic. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 6, p. 57392-57400, 2021.

NEVES, Moises Balenga Jose; VAZQUEZ, Elaine Garrido. **Patologias das estruturas.** Boletim do Gerenciamento, v. 22, n. 22, p. 11-19, 2021.

NUNES, Priscila. **Patologias das construções: conheça os principais tipos** - Blog da Disponível em: <https://www.orcafascio.com/papodeengenheiro/patologias-das-construcoes>. Acesso em: 28 fev. 2025.

OLIVEIRA, Vinícius Freitas de ; SAENZ , Charlotte Cesty Borda de. **Fatores inibitórios do Quorum sensing e sua relação com o biofilme.** Atas de Ciências da Saúde (ISSN 2448-3753), v. 11, n. 4, 2023.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

PARTHIPAN, Punniyakotti et al. **Biocorrosion and its impact on carbon steel API 5LX by *Bacillus subtilis* A1 and *Bacillus cereus* A4 isolated** from Indian crude oil reservoir. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, v. 3, p. 1-12, 2017.

PRIYOM, Sudipto Nath et al. **Efficacy of *Bacillus cereus* Bacteria in Improving Concrete Properties through Bio-precipitation.** *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, v. 47, n. 6, p. 3309-3320, 2023.

QIN, Yuxuan; ANGELINI, Letícia Lima; CHAI, Yunrong. **Diferenciação celular de *Bacillus subtilis*, formação de biofilme e prevalência ambiental.** *Microorganisms* , v. 10, n. 6, p. 1108, 2022.

REYAD, Amany M.; MOKHTAR, Gehad. **Impact of the immobilized *Bacillus cereus* MG708176 on the characteristics of the bio-based self-healing concrete.** *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 500, 2023.

RODGERS, Lucy. **Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte, mas você talvez não saiba** - BBC News Brasil. 17 dez. 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral46591753#:~:text=Segundo%20o%20instituto%20de%20pesquisa,de%20China%20e%20Estados%20Unidos>. Acesso em: 8 mar. 2025.

SALAMONI, Natália; DE OLIVEIRA RODRIGUES, Gustavo Gutierrez; ROHDEN, Abrahão Bernardo. **CORROSÃO MICROBIOLOGICAMENTE INDUZIDA EM ESTRUTURAS DE SANEAMENTO: COMUNIDADE MICROBIANA.** *Revista de Estudos Ambientais* , v. 1, pág. 54-65, 2022.

SANTOS, Henrique Resende dos; LEITE, Darlan Ulhoa. **Análise da corrosão das estruturas de concreto armado através da resistividade elétrica: revisão de literatura.**

SCHMOELLER, Francieli; LIMA, Maryangela Geimba de. **Inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado: uma revisão.** *CONCRETO & Construções*, v. XLIX, n. 103, p. 34-38, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/1809-7197.2021.103.0002>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SOHAIL, Muazzam Ghous et al. **Bio self-healing concrete using MICP by an indigenous *Bacillus cereus* strain isolated from Qatari soil.** *Construction and Building Materials*, v. 328, p. 126943, 2022.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

SOUSA, Emanuel Messias Silva de et al. **UTILIZAÇÃO DO CONCRETO PROTENDIDO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Revista Mangaio Acadêmico, v. 6, n. 1, p. 136-152, 2021.

SOUZA, Vicente Custodio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. Pini, 1998.

VAN DAMME, Henri. **Concrete material science: Past, present, and future innovations**. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 5-24, 2018.

VIDELA, Héctor A. **Biocorrosão, Biofouling e Biodeterioração de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

VILAS-BÔAS, GT; PERUCA, APS; ARANTES, OMN **Biologia e taxonomia de *Bacillus cereus*, *Bacillus anthracis* e *Bacillus thuringiensis***. Revista canadense de microbiologia , v. 53, n. 6, p. 673-687, 2007.

WAN, Hongxia et al. **Corrosion effect of *Bacillus cereus* on X80 pipeline steel in a Beijing soil environment**. Bioelectrochemistry, v. 121, p. 18-26, 2018.

WANG, Y. S. et al. **Effect of *Bacillus subtilis* on corrosion behavior of 10MnNiCrCu steel in marine environment**. Scientific reports, v. 10, n. 1, p. 5744, 2020.

CAPÍTULO II

**INVESTIGAÇÃO DE CORROSÃO MICROBIANA
EM CONCRETO ARMADO NA PRESENÇA E
AUSÊNCIA DE SALINIDADE POR *BACILLUS
SUBTILIS***

RESUMO

O concreto é composto por agregado graúdo e miúdo e pode ser reforçado com barras de aço, sendo então denominado concreto armado. Inicialmente, acreditava-se que esse material era indestrutível, porém, com o tempo, verificou-se que agentes agressivos presentes na atmosfera atacam as estruturas, corroendo as armaduras e causando diversos danos às construções. Além disso, descobriu-se que certas bactérias podem corroer ligas metálicas por meio de um processo conhecido como corrosão induzida por microrganismos (CIM). Entre os microrganismos associados à biocorrosão, destacam-se bactérias redutoras de sulfato, oxidantes de enxofre, oxidantes de ferro e redutoras de nitrato. Nesse contexto, as bactérias do gênero *Bacillus*. Estudos demonstram que essas espécies possuem potencial corrosivo, além de serem capazes de precipitar carbonato de cálcio (CaCO_3), característica que as torna úteis na formulação de concreto autocicatrizante. No entanto, ainda não há pesquisas que investiguem se essas bactérias podem induzir corrosão nas barras de aço. Para testar essa hipótese foram moldados 18 corpos de prova, sendo 9 de relação a/c e 9 de relação 0,7 a/c. Todos os corpos foram perfurados com dois furos de lados opostos nos ensaios secos pouco pode ser visto, entretanto a bactéria foi capaz de contaminar as barras de aço sobressalente formando uma fina camada de óxidos. Nos ensaios úmidos a caixa com os blocos contaminados apresentou um ambiente menos agressivo do que a caixa sem a contaminação. A corrosão iniciou primeiro no controle, mostrando que a bactéria retardou a corrosão. Nos blocos contaminados com a bactéria houve maior crescimento na relação 0,7 a/c; isso por causa da maior presença de água e espaços vazios. Nos blocos de relação 0,4 a/c tanto na caixa 1 quanto na caixa 2 houve contaminação do metal sobressalente, onde a contaminação foi maior, visivelmente a corrosão foi menor, mostrando que a bactéria foi capaz de atenuar a corrosão, tendo assim uma atuação benéfica.

Palavras-chave: Biocorrosão. Biofilme. Patologias.

ABSTRACT

Concrete is composed of coarse and fine aggregate and can be reinforced with steel bars, and is then called reinforced concrete. Initially, it was believed that this material was indestructible, but over time, it was discovered that aggressive agents present in the atmosphere attack the structures, corroding the reinforcement and causing various damages to the buildings. In addition, it was discovered that certain bacteria can corrode metal alloys through a process known as microbially induced corrosion (MIC). Among the microorganisms associated with biocorrosion, sulfate-reducing, sulfur-oxidizing, iron-oxidizing and nitrate-reducing bacteria stand out. In this context, bacteria of the genus *Bacillus*. Studies show that these species have corrosive potential, in addition to being capable of precipitating calcium carbonate (CaCO_3), a characteristic that makes them useful in the formulation of self-healing concrete. However, there is still no research investigating whether these bacteria can induce corrosion in steel bars. To test this hypothesis, 18 test specimens were molded, 9 with a .4 w/c ratio and 9 with a 0.7 w/c ratio. All specimens were drilled with two holes on opposite sides; in the dry tests, little could be seen; however, the bacteria was able to contaminate the spare steel bars, forming a thin layer of oxides. In the wet tests, the box with the contaminated blocks presented a less aggressive environment than the box without contamination. Corrosion started first in the control, showing that the bacteria delayed corrosion. In the blocks contaminated with the bacteria, there was greater growth in the 0.7 w/c ratio; this is due to the greater presence of water and empty spaces. In the blocks with a 0.4 w/c ratio, both in box 1 and box 2, there was contamination of the spare metal, where contamination was greater; corrosion was visibly less, showing that the bacteria was able to attenuate corrosion, thus having a beneficial effect.

Keywords: Biocorrosion. Biofilm. Pathologies.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, os métodos construtivos passaram por diversas atualizações. Acreditava-se, nos primórdios, que o concreto possuísse durabilidade infinita, no entanto foi percebido com o passar do tempo que agentes externos diminuía a vida útil e geravam grandes problemas (Schmoeller e Lima, 2021).

Nesse contexto surge o estudo das patologias de construção, bem como a análise dos problemas por elas causados (Neves e Vázquez, 2021). De acordo com Shamoeller e Lima (2021) a corrosão de armadura é uma das principais patologias de construção e das mais preocupantes também, podendo gerar graves problemas como ruptura total ou parcial da estrutura.

A corrosão de armaduras é um processo eletroquímico e pode ser acentuada quando existe a penetração de agentes externos no concreto (Caldas e Nogueira, 2023). Os principais agentes causadores da corrosão são os íons cloretos e o dióxido de carbono (Co₂) (Martins, 2022).

A corrosão induzida por microrganismos (CIM) também ocorre, seguindo os princípios da corrosão eletroquímica. No entanto, as atividades metabólicas desses microrganismos podem intensificar ainda mais o processo. Dessa forma, eles são capazes de tanto acelerar quanto retardar a corrosão (Santos et al., 2022).

Um dos principais desafios nas indústrias de recursos hídricos, gás natural e gasodutos de combustível é a corrosão induzida por microrganismos (CIM). Esse fenômeno ocorre quando o processo eletroquímico é iniciado, acelerado pela ação dos microrganismos (Wang et al., 2020).

A fixação desses microrganismos ocorre por meio da formação de biofilme, processo intrinsecamente relacionado à produção de EPS. Ao se aderirem à superfície de maneira heterogênea, esses microrganismos alteram a carga da superfície, iniciando o processo de corrosão (Wang et al., 2020).

Segundo Hu et al. (2022), a corrosão galvânica é intensificada pela atividade metabólica dos microrganismos presentes nos biofilmes, os quais liberam substâncias corrosivas. Além disso, a diferença na aeração de oxigênio também influencia esse processo. Diversos grupos de bactérias desempenham um papel relevante na corrosão induzida por microrganismos (CIM), sendo os principais: bactérias redutoras de sulfato, bactérias oxidantes de enxofre, bactérias oxidantes de ferro e bactérias redutoras de nitrato (Videla, 2003).

O *Bacillus subtilis*, uma bactéria redutora de nitrato, é uma das espécies mais comuns associadas à biocorrosão, dado sua ampla presença em diversos ambientes. Vários estudos têm demonstrado a atuação desse grupo no processo de CIM (Wang et

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

al., 2020). Wang et al. (2020) evidenciam a corrosão do aço 10MnNiCrCu em ambiente marinho devido à ação de *Bacillus subtilis*.

Atualmente tem-se utilizado *Bacillus subtilis* como aditivo no concreto autocicatrizante, pela sua capacidade de precipitar Carbonato de cálcio (CaCO₃) (Jena et al., 2020; Reyad e Mokhtar, 2023). Entretanto, não existem estudos conclusivos que mostram o potencial corrosivo em concreto armado. Essa falta de estudos abre margem para uma investigação e prospecção de biocorrosão do aço no concreto armado, visando observar essa possibilidade, bem como os seus mecanismos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Patologias de construção: Corrosão de armaduras

De acordo com o dicionário Oxford, o termo patologia é muito utilizado nas áreas médicas para indicar qualquer desvio fisiológico ou anatômico que caracterize alguma doença. Não diferente, porém pouco conhecido, esse termo também é utilizado na área da construção civil.

Áreas diferentes, porém o significado é bastante parecido, a única diferença é que o “paciente” passa a ser uma construção, e o médico o engenheiro. Sendo assim, patologias de construção são defeitos que surgem com o passar do tempo e comprometem a durabilidade, estabilidade, eficiência ou funcionalidade de alguma construção (Schmoeller e Lima, 2021).

As patologias podem estar relacionadas a fatores que vão desde problemas na execução da obra até materiais de baixa qualidade; esses fatores contribuem para o aumento dos custos com manutenção (Diniz e Souza, 2023).

Nesse contexto, uma das principais patologias de construção é a corrosão. De acordo com Schmoeller e Lima (2021), a corrosão é uma das patologias mais preocupantes e recorrentes em obras. Essa preocupação se dá pelo fato de a corrosão de armaduras ter o poder de ocasionar ruptura total ou parcial de uma estrutura.

Ainda de acordo com Schmoeller e Lima (2024), problemas com corrosão requerem mão de obra especializadas e técnicas de recuperações mais difíceis, levando a um alto custo de manutenção.

2.1.1 Mecanismo da Corrosão De Estruturas

A corrosão origina-se de uma reação de oxirredução; reação eletroquímica. Nessa reação dois processos distintos ocorrem, sendo:

- **Oxidação:** Perda de elétrons;

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

- **Redução:** Ganho de elétrons.

Sendo assim, de acordo com Andrade (1992) (Apud Schmoeller e Lima, 2021, a corrosão é um processo eletroquímico, onde existe a formação de uma corrente iônica e de uma corrente elétrica.

Essa reação gera duas zonas na superfície do metal. Uma zona catódica, onde há a perda de elétrons e outra zona denominada anódica, onde existe o ganho de elétrons (Schmoeller e Lima, 2021).

No concreto criasse um ambiente alcalino. Esse ambiente alcalino forma uma camada fina de óxidos e hidróxidos, denominada camada passivadora. Essa camada garante proteção contra a corrosão (Helena, 1986; Lima 1996 apud Schmoeller e Lima, 2021).

A corrosão de armadura se dá em duas etapas, sendo:

2.1.1.1 Iniciação

Nessa etapa, existe a penetração de agentes agressivos como íons cloretos comuns em zonas de atuação da névoa salina, onde há maior deposição de íons cloretos (Pongsaksawad *et al.*, 2021).

Alguns fatores facilitam a propagação e penetração dos íons cloretos, e o principal deles é a carbonatação. Esse, por sua vez, é um processo físico-químico, resultado da reação entre o gás carbônico (CO_2) e os compostos presentes no cimento (Ramos *et al.*, 2022).

Quimicamente falando, a reação de carbonatação se dá quando o CO_2 , que está presente na atmosfera, penetra, através dos poros, no concreto e reage com o Ca(OH)_2 , precipitando assim CaCO_3 . Progressivamente essa reação vai avançando até chegar a armadura (Moraes *et al.*, 2023).

À medida que a reação de carbonatação avança, existe a queda do pH do concreto para 9, onde usualmente é alcalino estando aproximadamente entre 12,5 a 13,5. Essa queda do pH, descontrola o concreto quimicamente, destruindo a camada passivadora que existe na barra de aço introduzida no concreto armado (Ramos *et al.*, 2022).

Esse descontrole, como citado acima, também facilita a penetração de agentes agressivos, como íons cloretos, sendo assim desse início ao processo de oxidação e posteriormente o de corrosão; entendo ambos como processos distintos (Ramos *et al.*, 2022).

2.1.1.2 Propagação

Após a despassivação da armadura a próxima etapa de deterioração é a perda de seção do aço. Agentes agressivos, como íons cloretos, penetram pelos poros do concreto e, sem a proteção da camada passivadora, iniciam o processo de corrosão (Pongsaksawad *et al.*, 2021).

Como citado acima, o processo de corrosão é eletroquímico. Quimicamente falando a reação de corrosão passa a ser acelerada quando existe a reação dos íons de ferro da armadura e os íons cloretos. Essa reação resultou na formação do composto FeCl_2 , denominado cloreto de ferro (Meire, 2017, apud Bertuci; Duarte; Rezende, 2023).

Com o decorrer do tempo, as moléculas de cloreto de ferro vão perdendo estabilidade. Ocorrendo o processo de alteração da substância pela água, ou seja, hidrólise, existe a formação de hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) (Bertuci; Duarte; Rezende, 2023).

Dessa maneira, o arranjo da célula eletroquímica fica despido, tendo o concreto atuando como eletrólito, a presença de oxigênio e umidade e a barra de aço funcionando como transporte de elétrons ânodo para o cátodo (James *et al.* apud Bertuci; Duarte; Rezende, 2023).

2.2 Corrosão induzida por microrganismos (CIM)

A corrosão induzida por microrganismos (CIM) ocorre devido à ação metabólica dos biofilmes, que aceleram o processo corrosivo nas superfícies afetadas. Isso significa dizer que os microrganismos podem secretar metabólitos corrosivos e, através da cobertura heterogênea da superfície ou diferencial de aeração, induzir a corrosão galvânica (Hu *et al.*, 2022).

Nesse sentido é válido dizer que o processo de corrosão induzida por microrganismos ocorre da mesma maneira que a corrosão eletroquímica, porém com a etapa inicial diferente. Em outras palavras, os microrganismos podem tanto iniciar quanto acelerar a reação eletroquímica de corrosão (Santos *et al.*, 2022).

Um elemento essencial para a iniciação deste processo é a formação do biofilme, no qual a comunidade bacteriana, através do seu metabolismo, pode influenciar diretamente a concentração de oxigênio (Videla, 2003; Larry & Hamilton, 2007 apud Santos *et al.*, 2022). De forma sistemática, de acordo com Videla (2003) o processo biológico da corrosão pode ser explicado da seguinte ordem:

- Os microrganismos aderem à superfície e originam o biofilme, formado pela excreção dos exopolissacarídeos (EPS);

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

- Sob a colônia bacteriana, devido ao processo respiratório das bactérias aeróbias, ocorre o consumo de oxigênio, criando uma região anaeróbia na superfície;
- Como o biofilme não cobre toda a extensão da superfície, em determinadas áreas há maior concentração de oxigênio;
- Assim, na região abaixo da colônia microbiana, ocorrem reações anódicas (oxidação), enquanto em pontos onde não há microrganismos, acontecem reações catódicas (redução);
- Além disso, a corrosão pode ser intensificada tanto pela excreção de substâncias bacterianas quanto pela manutenção da variação da concentração de oxigênio.

2.3 Biofilme

Como citado no tópico 2.2, a formação do biofilme e a sua arquitetura está intrinsecamente ligado à iniciação ou aceleração da corrosão por microrganismos. É válido então, exemplificar e demonstrar como ocorre o processo de formação do biofilme.

Os microrganismos têm a capacidade de se aderir a diferentes superfícies, sejam elas vivas ou inertes, como tecidos biológicos, rochas e metais. Esse processo leva à fixação e ao acúmulo dessas células, possibilitando sua sobrevivência em condições adversas (Alotaibi e Bukhari, 2021).

O biofilme, formado por comunidades microbianas organizadas, desempenha um papel essencial nesse processo, criando uma matriz protetora composta por substâncias poliméricas extracelulares (EPS) (Asma et al., 2022).

A composição do biofilme pode variar conforme fatores como disponibilidade de nutrientes, pH e temperatura, mas sua estrutura é predominantemente composta por água, EPS e células bacterianas (Alotaibi e Bukhari, 2021).

De acordo com Vasudevan (2014) (apud Alotaibi e Bukhari, 2021) a água, em especial, desempenha um papel fundamental ao formar canais que facilitam a distribuição de nutrientes, oxigênio e microrganismos dentro da estrutura do biofilme.

2.3.1. Formação do biofilme

De acordo com Alotaibi e Makkah (2020), o processo de adesão de microrganismos a uma superfície e a formação do biofilme ocorrem em cinco etapas sequenciais: fixação reversível inicial, adesão irreversível, desenvolvimento da estrutura do biofilme, maturação e, por fim, dispersão (Alotaibi e Bukhari, 2021).

- **Fixação reversível inicial**

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Na etapa inicial do biofilme, microrganismos aderem à superfície, formando uma camada que facilita a fixação de outros. Fatores como carga, rugosidade e apêndices externos influenciam esse processo (Alotaibi e Bukhari, 2021).

A adesão pode ser alterada por forças eletrostáticas, hidrofóbicas e tensões do fluido. Esse estágio ocorre rapidamente e é essencial para a formação do biofilme (Alotaibi e Bukhari, 2021).

- **Anexo irreversível**

Nessa fase, os microrganismos fixados não podem ser removidos pelas tensões do fluido ou superfície, pois começam a produzir EPS, estabelecendo uma forte ligação com a superfície. Além disso, os organismos podem se agrupar entre si ou com outros microrganismos do biofilme, reforçando ainda mais sua fixação (Alotaibi e Bukhari, 2021).

- **Desenvolvimento de Arquitetura de Biofilme**

Após a fixação irreversível, os microrganismos inibem apêndices de locomoção e começam a crescer exponencialmente, dividindo-se e utilizando os nutrientes disponíveis. Eles produzem mais EPS para fortalecer a adesão à superfície (Alotaibi e Bukhari, 2021).

A produção de polímeros de adesão intercelular e a presença de cátions divalentes ajudam a estabilizar as ligações. Nessa fase, os processos biológicos dominam a formação do biofilme (Alotaibi e Bukhari, 2021).

- **Maturação**

Na fase de maturação, as comunidades microbianas se desenvolvem em um biofilme maduro, onde a comunicação entre os microrganismos é crucial para regular o consumo de nutrientes, o crescimento e o reconhecimento entre eles (Alotaibi e Bukhari, 2021).

Esse processo é mediado pelo mecanismo de Quorum Sensing (QS), que utiliza autoindutores para criar uma cadeia de respostas. Após a maturação, o biofilme possui três camadas: uma película de união, uma camada densa de bactérias e uma camada flutuante com bactérias livres (Alotaibi e Bukhari, 2021).

- **Dispersão**

Na última etapa do biofilme, ocorre a dispersão dos microrganismos, o que pode facilitar a propagação de patógenos, permitindo que as bactérias se fixem em novas superfícies e reiniciem a formação do biofilme (Alotaibi e Bukhari, 2021).

Essa dispersão pode ser causada pela limitação de nutrientes, características do fluido e forças de cisalhamento, além da eliminação de células filhas (Alotaibi e Bukhari, 2021).

2.4 Características e Aplicações do *Bacillus Subtilis*

Uma das principais características do grupo *Bacillus* é sua ampla distribuição, sendo encontrado nos mais variados ambientes. Essa onipresença está diretamente relacionada à sua notável capacidade de adaptação (Iqbal *et al.*, 2023).

O gênero *Bacillus* foi identificado há várias décadas e tem sido amplamente estudado ao longo dos anos. Ele é composto por quatro espécies principais: *Bacillus subtilis*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus amyloliquefaciens* e *Bacillus licheniformis* (Iqbal *et al.*, 2023).

Esse grupo apresenta uma significativa diversidade genética. As espécies pertencentes a ele são Gram-positivas, não patogênicas, possuem formato de bastonetes e são capazes de formar esporos (Iqbal *et al.*, 2023).

Diversos estudos têm revelado inúmeras aplicações práticas para essas bactérias, destacando-se principalmente:

- **Agricultura:** devido ao fato de serem rizobactérias que promovem o crescimento das plantas;
- **Indústria biotecnológica:** por serem utilizadas em diferentes processos e na biossíntese de variados produtos naturais e enzimas.

Por essas razões, o *Bacillus subtilis* é frequentemente utilizado como organismo modelo para pesquisas relacionadas à formação de biofilmes, um aspecto essencial nos estudos sobre corrosão induzida por microrganismos (CIM) (Iqbal *et al.*, 2023).

É interessante dizer que o microrganismo objeto de estudo é redutor de sulfato, ou seja possui a capacidade de utilizar o nitrato (NO_3^-) comoceptor final de elétrons, ao invés do oxigênio, convertendo em nitrito (NO_2^-) (Hu *et al.*, 2022).

2.4.1 *Bacillus subtilis*: Um modelo de Estudo.

As bactérias possuem mecanismos de adaptação que lhes permitem sobreviver em diversos ambientes, tornando-se objetos de estudo em várias áreas do conhecimento.

O *Bacillus subtilis*, em particular, tem sido estudado há décadas e é considerado um microrganismo modelo para pesquisas em condições de escassez de nutrientes e possibilidade de formação de esporos (Qin; Angelini; Chai, 2022).

De acordo com Qin; Angelini; Chai (2022), o *Bacillus subtilis* se diferencia em diferentes processos como o de esporos dormentes, que possuem alta resistência a estresses provenientes do meio; diferenças também presentes em mecanismos subjacentes.

2.5 *Bacillus subtilis* e a CIM

O *Bacillus subtilis* se destaca como um microrganismo modelo devido à sua estrutura única de biofilme, que lhe confere maior resistência a agentes externos; como já posto anteriormente.

Diante disso, torna-se relevante investigar se esse microrganismo pode influenciar o processo de corrosão do aço em concreto armado, seja iniciando ou acelerando essa deterioração.

É válido ressaltar que na literatura outros microrganismos são citados como causadores de corrosão. De acordo com Magalhães et al. (1996) (apud Albuquerque; Andrade; Neves, 2014), às bactérias redutoras de sulfato são as principais responsáveis pelo processo de corrosão na superfície de metais em indústria de petróleo e gás.

Assim como as bactérias redutoras de sulfato, o *Bacillus subtilis* também possui a capacidade de gerar biofilmes que possuem fixação em qualquer tipo de superfície e a capacidade de se associar a outros microrganismos gerando biofilmes complexos (Dergham et al., 2021).

De acordo com a pesquisa de Wang et al. (2020) (apud Hu et al., 2022), que investigou a CIM em ambiente marinho no aço 10MnNiCrCu, foi possível demonstrar que a estrutura solta do biofilme formado por *Bacillus subtilis* favorece a migração continuada de íons cloretos para a superfície do aço.

Ainda de acordo com a pesquisa de Wang et al. (2020) (apud Hu et al., 2022), foi demonstrado que a secreção de metabólitos corrosivos tais como ácidos orgânicos podem desencadear a corrosão localizada.

Outra forma da CIM ocorrer é a através da transferência de elétrons extracelulares (TEE). Alguns estudos apontam que o *Bacillus subtilis* pode produzir substâncias que solubilizam e transportam o ferro (Sideróforos) fazendo-as transitar entre o biofilme e a superfície, o que facilita a dissolução de óxidos de ferro (Hu et al., 2022).

Diante do exposto, este artigo busca investigar a possibilidade de corrosão da armadura no concreto armado. É importante destacar que não foram encontradas na literatura metodologias que correspondessem a um ensaio acelerado de biocorrosão. Por essa razão, os autores desenvolveram uma abordagem específica para evidenciar a biocorrosão na armadura causada pela bactéria *Bacillus subtilis*.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos algumas metodologias foram utilizadas. Metodologias que partiram desde a moldagem dos corpos de prova, até a preparação.

Entretanto, como dito no item 2.5, não foram encontradas na literatura métodos de ensaio de biocorrosão acelerada para o concreto armado. Dessa forma, os autores elaboram uma metodologia para a investigação desse fenômeno.

3.1 Moldagem dos Corpos De Prova

A moldagem dos corpos de prova foi baseada na NBR 7215:96. O objetivo do estudo não era obter um concreto muito resistente, como é a ideia da NBR, mas um concreto que “recrie” uma condição de obra visando evidenciar a biocorrosão.

Os materiais utilizados para confecção dos corpos de prova estão descritos na tabela 1:

Tabela 1 - Materiais utilizados

| | | |
|---------|-----------------|---------|
| Cimento | Areia | Treliça |
| CP II Z | Lavada (normal) | Aço |

Fonte: Autoria própria (2025).

De acordo com o fabricante do cimento, o tipo CP II Z possui adição de 6% a 14% de componente pozolânico.

3.1.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados em formato cilíndrico possuindo uma barra de aço de 5 mm localizada no centro e com duas relações água/cimento, sendo 0,4 e 0,7. A moldagem se deu da seguinte forma:

3.1.2.1 Primeira etapa: separação e pesagem

Foram feitos os cálculos para a quantidade de material na mistura, com a finalidade de obter corpos de prova com duas relações água cimento distintas.

A quantidade de material utilizada para confecção dos corpos de prova de 0,4 a/c e 0,7 a/c foi a seguinte:

- **0,4 a/c:** 1 Kg de cimento, 2 Kg de areia e 400 mL de água;
- **0,7 a/c:** 1 Kg de cimento, 3 Kg de areia e 700 mL de água.

A areia foi, previamente, peneirada a fim de se obter um diâmetro máximo padrão de 1,18 mm. Após o peneiramento todos os materiais foram pesados a fim de se misturar o traço no misturador de bancada; como pode ser visto na figura 13:

Figura 13 - Misturador de bancada



Fonte: Autoria própria (2025).

Com os traços de cimento 0,4 a/c e 0,7 a/c prontos, seguiu-se para a preparação dos moldes.

3.1.2.2 Segunda etapa: preparação dos moldes e montagem

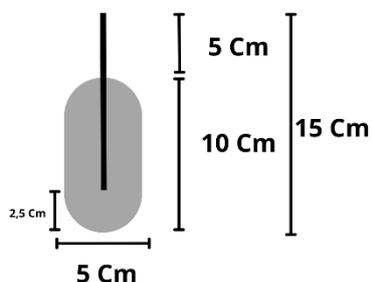
Na segunda etapa foi feita a cobertura interna dos moldes com o desmoldante, para assim facilitar a retirada dos corpos de prova dos moldes; O desmoldante utilizado foi o óleo de caminhão queimado.

Após a cobertura interna com o desmoldante foi feito o preenchimento com os traços da seguinte forma:

- Moldado com quatro camadas;
- Foram dados 30 golpes com um varão de 05 mm a cada camada do corpo de prova com a finalidade de compactar.
- Depois de completo com argamassa, os corpos de prova receberam o aço de 5 mm que foi introduzido no centro.

Vale ressaltar, que a barra de aço ficou a aproximadamente 2,5 Cm do fundo do corpo de prova e a aproximadamente 5 Cm para fora do corpo de prova. Observe o esquema na figura 14:

Figura 14 - Características dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2025).

Como mostra a figura 14 os corpos de prova possuem 15 cm de altura, contando com a sobressalência da barra de aço. Possuem também aproximadamente 5 Cm de diâmetro.

Vale ressaltar que, o termo “aproximadamente” é utilizado pois, para facilitar o desmolde, os moldes possuem variação em seu diâmetro; alguns não podendo ser totalmente fechados, gerando assim pequenas variações de diâmetro dos corpos de prova. Observe a seguir a figura 15 de um corpo de prova moldado:

Figura 15 - Corpo de Prova no Molde



Fonte: Autoria Própria (2025).

3.1.2.3 Terceira etapa: desmoldagem e cura em água

Após 48 horas, como visto na figura 16, os corpos de prova seguiram para a desmoldagem. Desmoldagem que foi feita dando golpes no fundo dos moldes e aumentando o diâmetro do molde.

Figura 16 - Corpos de Prova Moldados



Fonte: Autoria própria (2025).

Após a desmoldagem os corpos de prova foram submersos em água por 7 dias, para que a argamassa chegasse a 70% de sua resistência; observe a figura 17:

Figura 17 - Corpos de prova em cura



Fonte: Autoria própria (2025).

Ao todo foram confeccionados 18 corpos de prova sendo 9 com a relação água/cimento 0,4 e outros 9 com a relação água cimento 0,7.

3.1.2.4 Quarta etapa: perfuração dos corpos de prova

Com a finalidade de se inocular as bactérias foram feitos dois furos em cada corpo de prova utilizando uma broca de 10 mm. Esses furos possuíam em média 2 Cm de profundidade, ficando a uma distância de 0,5 Cm da barra introduzida no corpo de prova. Observe abaixo a perfuração de um dos corpos na figura 18:

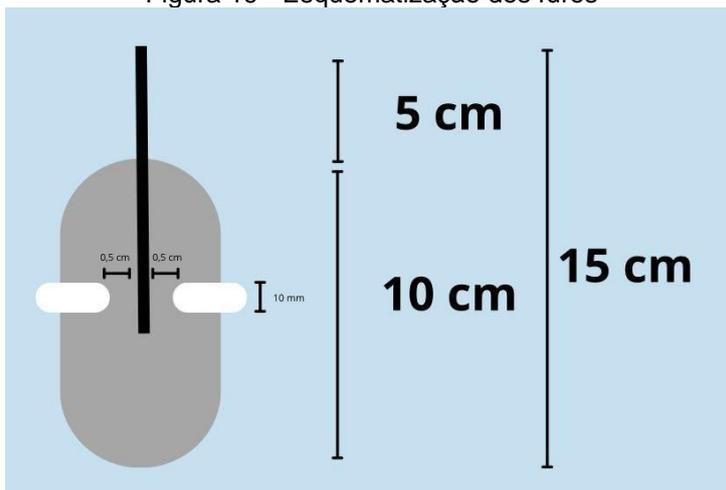
Figura 18 -Perfuração dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2025).

Observe a seguir a figura 19 que demonstra esquematicamente como ficaram os corpos de prova após as perfurações:

Figura 19 - Esquematização dos furos



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2 Ensaios de Biocorrosão Acelerada

Com a falta de metodologias referentes ao ensaio de biocorrosão e prospecção de biocorrosão em concreto armado, foi preciso elaborar uma metodologia única.

Observe a seguir a esquematização dos ensaios, bem como a montagem de cada etapa.

3.2.1 Esquematização dos ensaios

Os ensaios de biocorrosão foram divididos em duas partes. Sendo uma parte seca e uma parte úmida. Observe o quadro 4 a seguir com a esquematização dos ensaios:

Quadro 4 - Esquematização dos ensaios

| ENSAIOS SECOS | | | |
|----------------|-------------------|---------------|--------------------------|
| | Quantidade | Relação (a/c) | Bactéria |
| BANDEJA | 3 Corpos de prova | 0,4 | <i>Bacillus subtilis</i> |
| | 3 Corpos de prova | 0,7 | <i>Bacillus subtilis</i> |
| ENSAIOS ÚMIDOS | | | |
| | Quantidade | Relação (a/) | Bactéria |
| CAIXA 1 | 3 Corpos de prova | 0,4 | <i>Bacillus subtilis</i> |
| | 3 Corpos de prova | 0,7 | <i>Bacillus subtilis</i> |
| CAIXA 4 | 3 Corpos de prova | 0,4 | - |
| | 3 Corpos de prova | 0,7 | - |

Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.2 Ensaios secos

Os corpos de prova foram inoculados em ambos os furos com a bactéria *Bacillus subtilis*. Observe na figura 20 a seguir a inoculação:

Figura 20 - Inoculação dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2025).

Em seguida foram colocados em uma bandeja. Sendo colocados de um lado três da relação 0,4 a/c e três da relação 0,7 a/c. Observe a figura 21 a seguir:

Figura 21 - Corpos de prova preparados para o ensaio



Fonte: Autoria própria (2025).

Em seguida, os corpos de prova foram levados para a estufa a uma temperatura de 35° C. Sendo retirados em intervalos de dias intercalados para a avaliação da evolução ou da presença de corrosão. Observe a figura 22:

Figura 22 - Bandeja na estufa



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.2.1 Contagem das colônias

A barra de aço excedente dos corpos de prova foi cortada utilizando um alicate. Cada amostra recebeu uma letra de identificação e foi levada ao meio para analisar a presença da bactéria no produto da corrosão. Observe o quadro 5:

Quadro 5 - Amostras do metal

| Amostra | Bactéria | Relação (a/c) |
|---------|--------------------------|---------------|
| 1 Ar | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,4 |
| 2 Ar | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,4 |
| 3 Ar | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,4 |

| | | |
|------|--------------------------|-----|
| 1 Br | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,7 |
| 2 Br | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,7 |
| 3 Br | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,7 |

Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.3 Ensaio úmidos

O primeiro passo para a preparação dos ensaios úmidos foi a coleta da água do mar. Isso porque a bactéria utilizada no estudo é halofílica, ou seja, possui afinidade com o meio salino

A água foi coletada na praia de Boa Viagem, na região metropolitana do Recife, a aproximadamente 5 M da praia. Foram coletados 60 L e levados ao laboratório para filtração e autoclavagem. Observe a figura 23 a seguir:

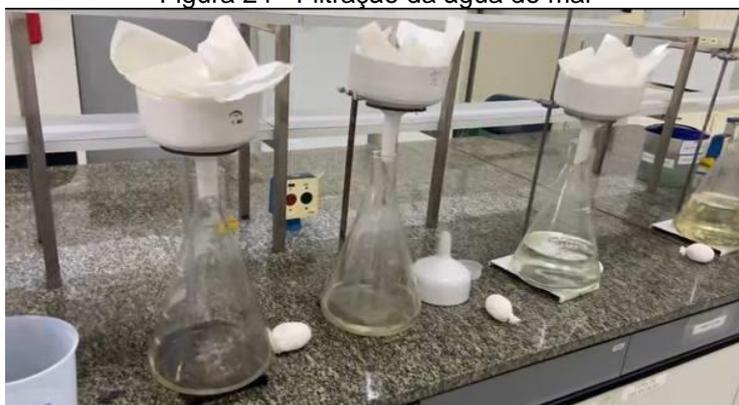
Figura 23 - Coleta da água do mar



Fonte: Autoria própria (2025).

A filtração teve o intuito de remover as impurezas e as partículas de areia presentes na água do mar. Para este fim, foi utilizado filtros de papel simples, funis e erlenmeyers de 4 litros, como se pode ver na figura 24 abaixo:

Figura 24 - Filtração da água do mar



Fonte: Autoria própria (2025).

Em seguida, o material dentro do erlenmeyer foi vedado com tampões e papel alumínio e seguiu para a autoclavagem. Esse processo foi feito com a finalidade de eliminar microrganismos que pudessem estar presentes na água do mar.

Foi feita a medição de alguns parâmetros sendo eles, condutividade, salinidade, densidade e pH, com a finalidade de caracterização e parametrização da água. Após a obtenção da água do mar autoclavada, seguiu-se para a preparação dos banhos.

3.2.3.1 Preparação dos ensaios úmidos

A preparação dos banhos se deu da seguinte forma: Foram separados duas caixas, com tampa, de aproximadamente 10 L.

A caixa 1, continha 6 corpos de prova, sendo 3 de relação 0,4 a/c e 3 de relação 0,7 a/c, inoculados com o *Bacillus subtilis*. A caixa 2 recebeu a mesma quantidade e disposição de corpos de prova, porém sem a presença da bactéria; este recebeu o nome de controle e serviu para comparar os dados.

Após receber os corpos de prova, as caixas foram preenchidas com 4 L de água cada e levadas, fechadas, para a estufa a uma temperatura de aproximadamente 35° C.

3.2.3.2 Parâmetros analisados

Os ensaios se deram da seguinte forma: Em intervalos de 10 a 15 dias os organizadores eram retirados da estufa e tirava-se 40 mL de água para a medição dos seguintes parâmetros:

- pH;
- Densidade;
- Salinidade;
- Condutividade;
- Avaliação visual de corrosão.

Os valores eram comparados com os da água do mar armazenada; a mesma utilizada no estudo. A altura do fluido também foi medida e a cada etapa foram feitos registros fotográficos.

Após cada medição as caixas eram devidamente fechadas e colocadas na estufa a aproximadamente 35° C.

3.2.3.3 Contagem de Colônias

Para constatação da presença do microrganismo nas barras de aço e na água o mar colocado nas caixas foi feita a seguinte metodologia:

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Cada corpo de prova na caixa recebeu uma letra de identificação e o algodão, que tampanava o inóculo das bactérias, foi retirado e colocado no meio para verificar se a bactéria ainda se encontrava viva depois desse tempo no concreto. Observe a figura 25:

Figura 25 - Retirada dos inóculos



Fonte: Autoria própria (2025).

Dessa forma, as letras que cada bloco recebeu está descrito no quadro 6:

Quadro 6 - Amostras dos inóculos

| ORG | Amostras | Bactéria | Relação (a/c) |
|---------|----------|--------------------------|---------------|
| CAIXA 1 | 1 A | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,4 |
| | 2 A | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,4 |
| | 3 A | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,4 |
| | 1 B | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,7 |
| | 2 B | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,7 |
| | 3 B | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,7 |

Autoria própria (2025).

Foi feito um corte, com um alicate, na barra de aço sobressalente dos corpos de prova; cada um recebendo uma letra de identificação e levado ao meio para verificar a presença da bactéria no produto de corrosão. Observe a figura 26:

Figura 26 - Metal no meio de cultura



Fonte: Autoria própria (2025).

As letras que os metais retirados receberam para identificação foram as descritas no quadro 7:

Quadro 7 - Amostras dos metais retirados

| ORG | Amostras | Bactéria | Relação (a/c) |
|---------|----------|--------------------------|---------------|
| CAIXA 1 | 1 a | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,4 |
| | 2 a | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,4 |
| | 3 a | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,4 |
| | 1 b | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,7 |
| | 2 b | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,7 |
| | 3 b | <i>Bacillus subtilis</i> | 0,7 |
| CAIXA 4 | 1 g | - | 0,4 |
| | 2 g | - | 0,4 |
| | 3 g | - | 0,4 |
| | 1 h | - | 0,7 |
| | 2 h | - | 0,7 |
| | 3 h | - | 0,7 |

Fonte: Autoria própria (2025).

É válido dizer também que foram coletadas as águas de cada caixa e levada ao meio de cultura para ver se houve contaminação por *Bacillus subtilis*.

4 RESULTADOS

Observe a seguir os resultados obtidos durante 45 dias em que os corpos de prova foram submetidos aos banhos, e os 60 dias em que os corpos de prova ficaram na estufa no ensaio seco.

4.1 Ensaio secos

Nos ensaios secos, pouco pode ser observado. Ou seja, na presença do meio salino foram vistas mais modificações e interações entre o meio e os corpos de prova. Mesmo assim, na contagem de colônias, pôde-se perceber a presença de *Bacillus subtilis* nas barras de ferro sobressalentes. Observe abaixo a figura 27, onde está demonstrado dois momentos distintos com diferença de 24 dias entre eles.

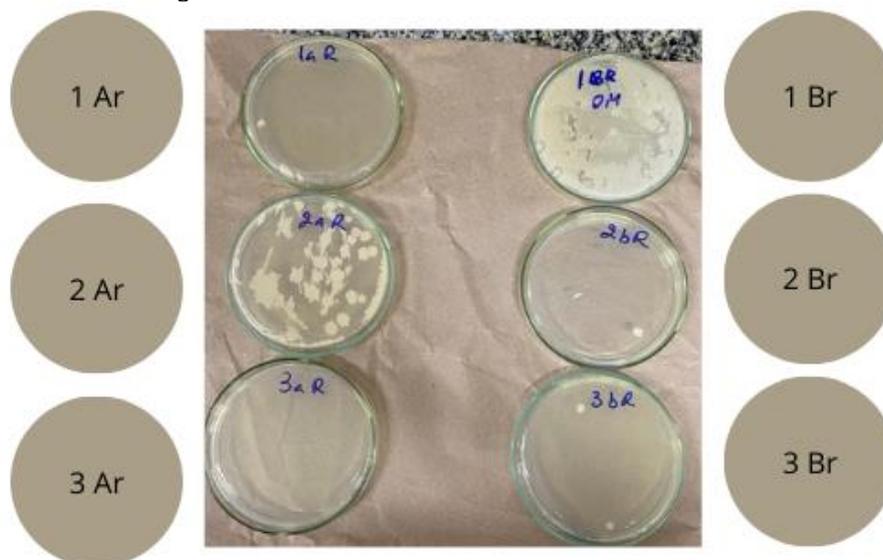
Figura 27 - Ensaio secos



Fonte: Autoria própria (2025).

Como dito acima, pode ser observado o crescimento da bactéria objeto de estudo nas barras de aço. Observe na figura 28 as placas com onde foram realizados os ensaios e a contagem de colônias também:

Figura 28 - Placas com o crescimento da bactéria



Fonte: Autoria própria (2025).

Observe no quadro 8 a análise quantitativa e qualitativa referente a contagem de colônias:

Quadro 8 - Análise qualitativa da presença da bactéria

| Amostra | Relação (a/c) | Contagem | Obs. |
|---------|---------------|----------|------------|
| 1 Ar | 0,4 | ++ | 4 Colônias |
| 2 Ar | 0,4 | +++ | |
| 3 Ar | 0,4 | - | |
| 1 Br | 0,7 | ++++ | |
| 2 Br | 0,7 | + | |
| 3 Br | 0,7 | + - | 2 Colônias |
| 1 g | 0,4 | - | |
| 2 g | 0,4 | - | |
| 3 g | 0,4 | - | |
| 1 h | 0,7 | - | |
| 2 h | 0,7 | - | |
| 3 h | 0,7 | - | |

Fonte: Autoria própria (2025).

Como se pode ver, a presença da bactéria foi bem variada, estando a relação 0,4 a/c levemente mais propícia à contaminação. Entretanto, onde se pôde ver maior crescimento, e por sua vez maior presença da bactéria, foi na amostra 1 br.

É interessante dizer, que nos registros fotográficos foi possível perceber a formação de uma fina camada de óxidos, que por sua vez pode estar ligada a aeração diferencial criada pelo biofilme bacteriano, como descrito por Videla (2003). Essa fina camada de óxidos ajuda a proteger as barras de aço contra agentes externos e corrosão (Schmoeller e Lima, 2021).

4.2 Ensaio úmidos

Após a preparação dos ensaios úmidos, as caixas com os corpos de prova foram levadas à estufa, a 35°C, onde lá ficaram por 13 dias até a primeira retirada para a avaliação dos parâmetros.

A segunda medição foi feita 14 dias após a primeira e a terceira medição foi feita 24 dias após a segunda. A finalização do experimento, juntamente com a retirada dos corpos de prova e introdução dos inóculos retirados dos blocos nos meios de cultura, foi feita 3 dias após a terceira retirada. A duração total do experimento foi de 54 dias.

4.2.1 Resultados dos parâmetros avaliados

Observe na tabela 2 o resultado dos parâmetros avaliados tanto da caixa 1, onde existe o inóculo da bactéria, e da caixa 2; denominado controle. Esses valores comparados também com a medição da água do mar:

Tabela 2 - Resultados da medição dos parâmetros

| Parâmetros | Medição 1 | | | Medição 2 | | | Medição 3 | | |
|---------------|--------------------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|-------------|
| | <i>Bacillus subtilis</i> | Controle | Água do mar | <i>Bacillus subtilis</i> | Controle | Água do mar | <i>Bacillus subtilis</i> | Controle | Referência |
| Condutividade | 54,45 mS/cm | 55,51 mS/cm | 55,18 mS/cm | 56,57 mS/cm | 54,51 mS/cm | 54,51 mS/cm | 75,78 mS/cm | 132,4 mS/cm | 67,29 mS/cm |
| Salinidade | 40 ‰ | 40 ‰ | 40 ‰ | 39 ‰ | 45 ‰ | 39 ‰ | 43 ‰ | 70,1 ‰ | 40 ‰ |
| PH | 8,83 | 8,48 | 7,98 | 8,02 | 7,7 | 7,58 | 8,56 | 7,6 | 7,76 |

Fonte: Autoria própria (2025).

Pode-se observar na tabela 2 que na primeira medição, a condutividade ficou bastante próxima dos valores de referência. É válido dizer que em estudo feito por Barbosa et al. (2022) a água do mar coletada no Paiva (praia da região metropolitana do Recife-Pe) apresentou uma condutividade de 64,67 mS/cm; o estudo justificou essa condutividade alta pelo fato de haver esgotos no local.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Mesmo a condutividade da água do mar estando abaixo do valor apresentado por Barbosa et al. (2022), é mais que suficiente para influenciar na taxa de corrosão. Pode-se observar que com o passar do tempo, já na segunda medição pode-se perceber um aumento na condutividade na água onde os corpos de prova estavam contaminados com a bactéria; estando com o valor maior do que o da referência.

Na terceira medição o que chama atenção é o alto valor apresentado pelo controle; valor de 132,4 mS/cm. O que significa dizer que o processo corrosivo se apresentou de maneira mais severa, tendo em vista que a alta condutividade afeta positivamente a movimentação dos íons cloretos.

Observe também que, mesmo estando abaixo do controle, a caixa contaminada pela bactéria também apresenta o valor mais alto do que o da água do mar, sendo 75,78 mS/cm. O que indica que o processo corrosivo pode também está se desenvolvendo.

Como se pode ver na tabela 2 o resultado da salinidade ficou muito próximo em todas as medições. Inicialmente, os valores estão próximos dos valores obtidos por Barbosa et al. (2022); o valor encontrado pelo autor foi de 41,53 ‰.

Na terceira medição da salinidade houve um grande aumento no controle, com o valor de 70,1 ‰. Esse valor alto culmina com o valor da condutividade obtido na terceira medição. Ambos os valores estão intrinsecamente ligados, tendo em vista que a condutividade está ligada à disponibilidade de íons no meio (Silva filho, 2016).

Observe que em todas as medições, o pH se mostra como alcalino. O PH mais baixo foi medido no controle e foi 7,6, o que pode ser explicado pelo acúmulo de sais, como visto nas medições de salinidade e condutividade.

O que é mais interessante é que nas 3 medições no ambiente contaminado o pH esteve mais alto do que o controle e mais alto do que a água do mar de referência. Isso pode ser causado pela precipitação de (CaCO_3), presente nos corpos de prova, causado pelo *Bacillus subtilis* (Jonkers, 2011 apud Bonifácio et al., 2022). Precipitação estudada e descrita também por Ibrahim et al. (2025).

O que se pode perceber é que o ambiente com a bactéria se apresentou menos agressivo do que o ambiente sem a presença dela. Isso fica mais evidente quando se observa os valores do PH. Isso está intrinsecamente ligado à atividade metabólica da bactéria.

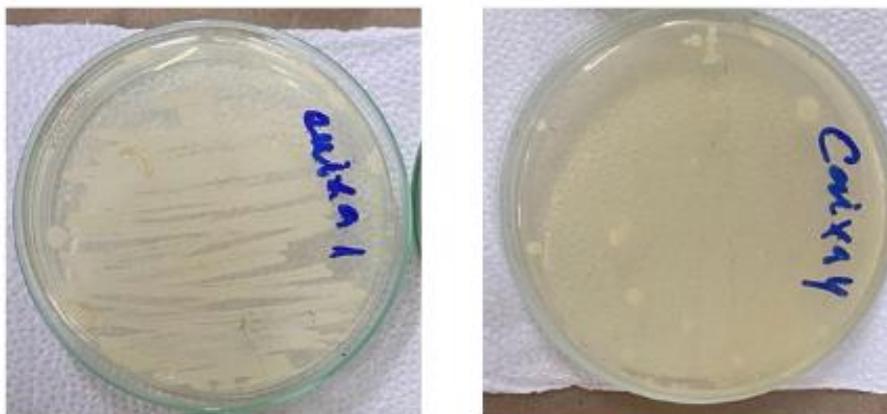
4.2.3 Contagem de colônias

Observe o resultado da contagem de colônias:

4.2.3.1 Água das caixas

As águas foram coletadas e cada amostra foi passada para o meio de cultura. Observe a seguir a figura 29 onde se pode ver o crescimento das colônias.

Figura 29 - Contaminação das caixas



Fonte: Autoria própria (2025).

O que se pode ver, é que ambas as caixas estavam contaminadas com *Bacillus subtilis*. Entretanto, o controle, à direita na foto, apresenta poucas colônias, indicando uma contaminação pequena. Já na caixa 1, pôde-se ver que estava bastante infectada, não sendo possível contar a quantidade de colônias. Mesmo estando inoculada no corpo de prova, e vedada com pingos de vela, a bactéria foi capaz de infectar a água do meio.

Essa alta contaminação da água presente na caixa 1 culmina com os parâmetros encontrados e com o dito no item anterior; a bactéria, através do seu metabolismo atenuou o ambiente, deixando menos agressivo do que na caixa com o controle. Observe no quadro 9 a análise do crescimento das colônias:

Quadro 9 - Crescimento do microrganismo

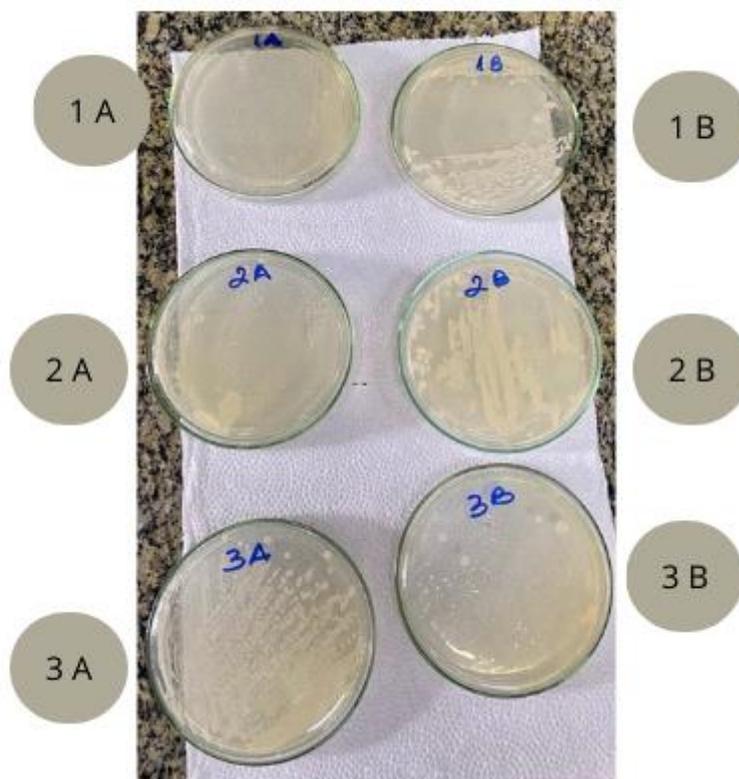
| Recipiente | Crescimento | Obs. |
|------------|-------------|-------------------|
| Caixa 1 | ++++ | |
| Caixa 4 | + | Pouco Crescimento |

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.5.2 Análise dos tampões

Observe a seguir as colônias crescidas a partir do material coletado dos algodões retirados dos corpos de prova na figura 30:

Figura 30 - Placas com as colônias crescidas a partir dos algodões



Fonte: Autoria própria (2025).

Observe no quadro 10 abaixo a contagem de colônias:

Quadro 10 - Contagem das colônias

| Amostras | Relação (a/c) | Contagem |
|----------|---------------|----------|
| 1 A | 0,4 | + |
| 2 A | 0,4 | + |
| 3 A | 0,4 | +++ |
| 1 B | 0,7 | ++ |
| 2 B | 0,7 | ++ |
| 3 B | 0,7 | + |

Fonte: Autoria própria (2025).

O que pode ser visto no quadro 10 é que a amostra onde se teve maior crescimento foi a 3A. Entretanto, onde a contaminação foi mais observada foi nos corpos de prova de relação a/c 0,7. Isso pode estar relacionado com a porosidade e maior quantidade de água presente nessa relação, o que favorece o crescimento da bactéria, facilitando a formação do biofilme.

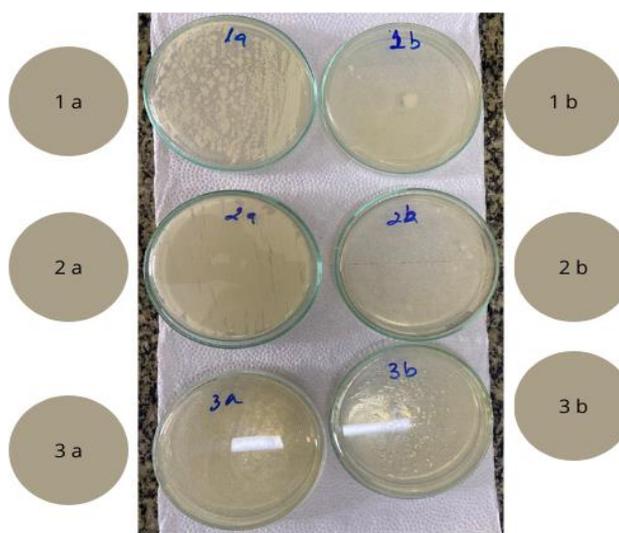
Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Observe, que mesmo estando inoculado e vedado com pingo de vela, nos corpos de prova, o *Bacillus subtilis* foi capaz de se manter viva e crescer, contaminando o meio e o metal sobressalente dos corpos de prova.

4.2.5.3 Análise do Metal

Observe na figura 31 a seguir o crescimento das colônias retiradas dos pedaços de metais:

Figura 31 - Crescimento das bactérias a partir dos metais



Fonte: Autoria própria (2025).

Observe a seguir a análise quantitativa no quadro 11:

Quadro 11 - Análise quantitativa do crescimento da bactéria

| Amostras | Relação (a/c) | Contagem | Obs. |
|----------|---------------|----------|------------|
| 1 a | 0,4 | +++ | |
| 2 a | 0,4 | ++++ | |
| 3 a | 0,4 | ++ | |
| 1 b | 0,7 | + | |
| 2 b | 0,7 | + | |
| 3 b | 0,7 | + - | 3 Colônias |

Autoria própria (2025).

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

O que se pode ver é que nas amostras de relação 0,4 a/c a contaminação foi maior do que nas amostras de relação 0,7 a/c; estando a amostra 2a com um número incontável de colônias.

Isso significa dizer que a bactéria foi capaz de contaminar as barras de aço em todas as relações. Entretanto, precisa-se identificar se a CIM ocorreu, ou se a bactéria foi capaz de diminuir o nível de corrosão.

Ao analisar as barras de aço dos corpos de prova sem a bactéria, pôde-se perceber que elas também estavam contaminadas por *Bacillus subtilis*. Observe a seguir, no quadro 12 a contagem de colônias e a análise quantitativa da contaminação nos blocos de controle:

Quadro 12 - Crescimento da bactéria a partir do metal retirado

| Amostras | Relação (a/c) | Contagem | Obs. |
|----------|---------------|----------|------------|
| 1 g | 0,4 | ++++ | Incontável |
| 2 g | 0,4 | ++++ | Incontável |
| 3 g | 0,4 | ++ | |
| 1 h | 0,7 | - | |
| 2 h | 0,7 | +++ | |
| 3 h | 0,7 | ++ | |

Autoria própria (2025).

Como se pode ver no quadro 12 Os blocos de relação 0,4 a/c foram os que as barras de aço apresentaram maior contaminação, seguindo a mesma linha dos blocos contaminados.

3.7 Avaliação visual

Culminando com o que foi observado nos parâmetros de pH, Salinidade e Condutividade. O ambiente sem a bactéria se mostrou mais agressivo. E isso pode ser observado nas análises fotográficas. Observe a seguir os registros fotográficos feitos em cada medição dos ensaios:

3.7.1 Medição 1

Veja na figura 32 as fotos registradas na primeira medição:

Figura 32 - A esquerda os corpos contaminados a direita o controle



Fonte: Autoria própria (2025).

O que se pode ver é que o processo de corrosão está bem mais avançado nos corpos de prova sem a presença da bactéria do que com a presença dela.

O que é observado é uma corrosão mais uniforme e apenas uma fina camada de óxidos formada nas barras, nos corpos de prova com a presença da bactéria e uma corrosão formando crostas nos blocos sem a contaminação.

3.7.2 Medição 2

Na segunda medição, algo interessante ocorreu. Foi observado que os corpos de prova de relação 0,7 a/c apresentavam corrosão mais avançada do que os corpos de prova de 0,4 a/c; isso nos corpos contaminados com a bactéria.

Observe na figura 33, que nitidamente o processo de corrosão é mais avançado nos blocos de relação 0,7 a/c, que estão à esquerda da imagem, do que nos blocos de 0,4 a/c, à esquerda da imagem.

Figura 33 - Corpos de prova contaminados



Fonte: Autoria própria (2025).

Justamente na segunda medição foi que o PH do meio contaminado teve uma queda e a condutividade aumentou. O que demonstra que naquele momento o ambiente estava mais agressivo.

Os blocos de controle também apresentaram avanço na corrosão e a precipitação de sal em alguns dos corpos de prova. Observe na figura 34:

Figura 34 - Blocos do controle na segunda medição



Fonte: Autoria própria (2025).

O que interessante de se observar, é que na avaliação de contaminação, os blocos de relação 0,4 a/c, que não estavam previamente contaminados com o *Bacillus subtilis*, apresentavam grande contaminação por *Bacillus subtilis*.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

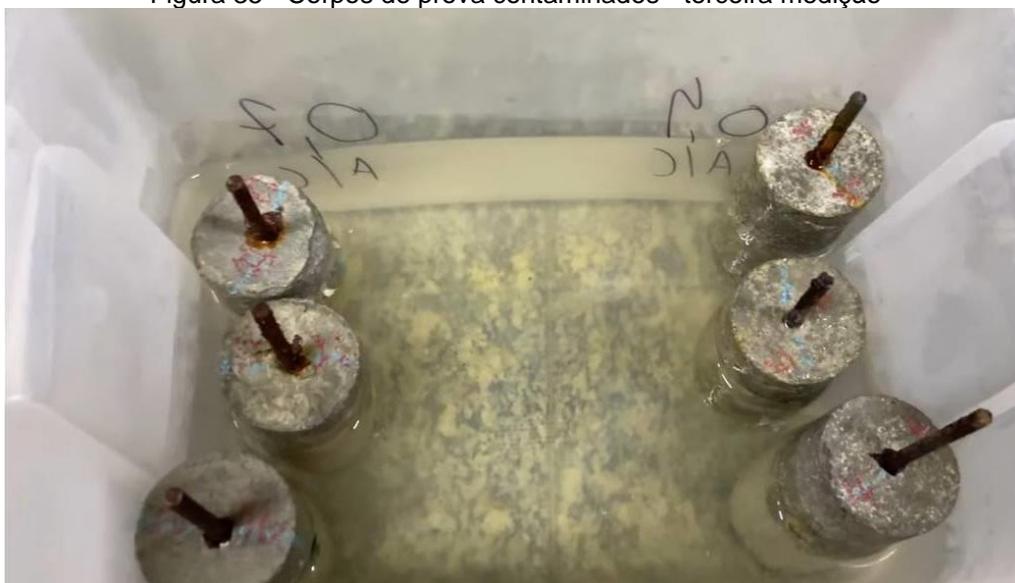
O que pode ser observado disso, comparando com os registros fotográficos e uma análise qualitativa, é que a corrosão nos blocos 0,4 a/c foram mais atenuadas do que nos outros blocos.

3.7.3 Medição 3

Na avaliação visual a corrosão nos blocos de relação 0,7 a/c foi mais agressiva do que nos blocos de relação 0,4 a/c; seguindo o que foi observado na medição 2.

O dito acima pode ser observado na figura 35, onde os blocos de 0,7 a/c estão à esquerda e os de relação 0,4 a/c estão à direita. O que se pode ver é que a corrosão, nos blocos de 0,4 a/c estão localizados na parte superior, enquanto nos blocos de 0,7 a/c estão ao longo de toda a barra.

Figura 35 - Corpos de prova contaminados - terceira medição



Fonte: Autoria própria (2025).

É interessante dizer que os blocos onde se observa menos corrosão, são os blocos onde a contaminação por *Bacillus subtilis* é maior.

Nos corpos controle a corrosão foi bastante acentuada, principalmente nos blocos de relação 0,7 a/c. Como se pode ver na figura 36, onde os blocos de 0,7 a/c estão à esquerda:

Figura 36 - Corpos de prova - controle



Fonte: Autoria própria (2025).

Seguindo o mesmo ritmo da segunda medição, os blocos onde a contaminação no aço foi maior foram os que apresentaram, visualmente, uma corrosão atenuada; isso levando em consideração a comparação entre as amostras.

Ao comparar as duas imagens pode se perceber que os blocos que previamente não estavam contaminados de relação 0,4 a/c, e que nas análises biológicas apresentavam bastante contaminação, a saber 1g, 2g e 3g, possui menos corrosão do que os blocos que foram previamente contaminados com a bactéria. como se pode ver no recorte na figura 37:

Figura 37 - Blocos de relação 0,4 a/c demonstrando pouca corrosão



Fonte: Autoria própria (2025).

4 CONCLUSÕES

De acordo com a NBR 12655/2015 o ambiente criado nas caixas pode se enquadrar em uma zona de agressividade forte e com risco de deterioração grande. Por sua vez, nessas zonas a relação a/c determinada pela norma é no máximo a de 0,45.

A relação 0,4 a/c apresenta menor porosidade e por sua vez maior resistência e proteção contra agentes agressivos; como íons cloretos. E isso pôde ser visto no ensaio realizado acima, os concretos com relação 0,7 a/c apresentaram, nas caixas, maior índice de corrosão.

É interessante observar que a corrosão inicial nos blocos corpos contaminados com o *Bacillus subtilis*, se comparados com os blocos sem a contaminação inicial foi bem mais demorada, como visto nos registros fotográficos, na primeira medição pouco pode ser visto.

A água presente no controle também se mostrou contaminada, o que foi uma surpresa para os pesquisadores, no entanto a contaminação foi bastante pequena. Ao se observar os parâmetros de maneira global, pode se ver que o ambiente contaminado com a bactéria se mostrou menos agressivo do que o controle.

Vale ressaltar que ao analisar os tampões onde foi inoculado a bactéria pôde-se perceber que nas relações 0,7 a/c houve maior crescimento. Isso se dá pela maior quantidade de espaços vazios (poros) bem como também maior quantidade de água, o que favorece o crescimento bacteriano e o desenvolvimento do biofilme.

No entanto, ao analisar os metais sobressalentes constatou-se que os blocos de relação 0,4 a/c estavam bem mais contaminados e isso resultou num menor índice de corrosão nessas relações; isso unido também a menor porosidade que dificulta a passagem dos íons cloretos por difusão.

Em geral a bactéria aumentou o tempo para início da corrosão, nos blocos contaminados e foi capaz de atenuar a corrosão nos blocos de relação 0,4 a/c tendo uma ação benéfica, tanto gerando um ambiente menos hostil, como protegendo as barras contra o ataque dos íons cloretos.

5 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. C.; ANDRADE, C.; NEVES, B. **Biocorrosão: da integridade do biofilme à integridade do material**. 2014.

ALOTAIBI, Ghazay F.; BUKHARI, Mamdouh A. **Factors influencing bacterial biofilm formation and development**. Am. J. Biomed. Sci. Res, v. 12, n. 6, p. 617-626, 2021.

ASMA, Syeda Tasmia et al. **An overview of biofilm formation–combating strategies and mechanisms of action of antibiofilm agents**. Life, v. 12, n. 8, p. 1110, 2022.

BARBOSA, Alane Carvalho et al. **Caracterização físico-química e microbiológica da água do mar de praias do litoral de Pernambuco**. Research, Society and Development, v. 11, n. 15, p. 20111536240-20111536240, 2022.

BERTUCI, Isabela; DUARTE, Eduarda Bertoletti; REZENDE, Luciana Cristina Soto Herek. **UM ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DO AMBIENTE MARINHO EM EDIFICAÇÕES COSTEIRAS DE CONCRETO ARMADO**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 22, n. 2, p. 56-66, 2023.

BONIFÁCIO, Diego Rodrigues et al. **BACILLUS SUBTILIS UMA ADIÇÃO INCOMUM COM BENEFÍCIOS INESPERADOS AO CONCRETO**. REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA, v. 14, n. 2, 2022.

CALDAS, Iza Karla Rodrigues de Souza; NOGUEIRA, Núbia Alves de Souza. **PATOLOGIA EM ESTRUTURAS: CORROSÃO NO CONCRETO ARMADO-ESTUDO DE CASO**. 2023.

DERGHAM, Yasmine et al. **Comparação das características genéticas envolvidas na formação de biofilme de *Bacillus subtilis* usando abordagens de multicultura**. Microorganisms , v. 9, n. 3, p. 633, 2021.

DINIZ, L.; SOUZA, Orientador Bruna. **Conceito e manutenção de patologias da construção civil**. In: PGSSCOGNA Forum Engenharia Civil. 2023.

DOS SANTOS, Ellen et al. **Biocorrosão e o Biofouling–uma revisão de literatura**.

HU, Yuting et al. **Microbiologically influenced corrosion of stainless steels by *Bacillus subtilis* via bidirectional extracellular electron transfer**. Corrosion Science, v. 207, p. 110608, 2022.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

IQBAL, Sajid et al. **Classification and multifaceted potential of secondary metabolites produced by *Bacillus subtilis* group: A comprehensive review.** *Molecules*, v. 28, n. 3, p. 927, 2023.

JENA, Shradha et al. **Impact of *Bacillus subtilis* bacterium on the properties of concrete.** *Materials Today: Proceedings*, v. 32, p. 651-656, 2020.

MARTINS, Debora Kelly Garcia. **Corrosão de armaduras em concreto armado.** *CONSTRUINDO*, v. 14, n. 2, 2022.

MORAES, Maryah Costa de et al. **Realcalinização do concreto sujeito à carbonatação: Revisão sistemática da literatura sobre os métodos de tratamento, eficácia e mecanismos da reação.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 29, n. 3, p. e20240240, 2024.

NEVES, Moises Balenga Jose; VAZQUEZ, Elaine Garrido. **Patologias das estruturas. Boletim do Gerenciamento**, v. 22, n. 22, p. 11-19, 2021.

NUNES, Priscila. **Patologias das construções - Conheça os principais tipos** - Blog. 2 jun. 2021. Disponível em: <https://www.orcafascio.com/papodeengenheiro/patologias-das-construcoes>. Acesso em: 28 fev. 2025.

PONGSAKSAWAD, Wanida et al. **Chloride distribution model and corrosion map of structural steels for tropical climate in Thailand.** *Science of the Total Environment*, v. 787, p. 147465, 2021.

QIN, Yuxuan; ANGELINI, Letícia Lima; CHAI, Yunrong. **Diferenciação celular de *Bacillus subtilis*, formação de biofilme e prevalência ambiental.** *Microorganisms*, v. 10, n. 6, p. 1108, 2022.

RAMOS, Gabriela Cristina Fonseca et al. **Condicionantes da utilização de estrutura de aço na concepção arquitetônica.** 2022.

REYAD, Amany M.; MOKHTAR, Gehad. **Impact of the immobilized *Bacillus cereus* MG708176 on the characteristics of the bio-based self-healing concrete.** *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 500, 2023.

SANTOS, Ellen dos Santos et al. **BIOCORROSÃO E O BIOFOULING—UMA REVISÃO DE LITERATURA.** In: OPEN SCIENCE RESEARCH VII. Editora Científica Digital, 2022. p. 193-205.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

SCHMOELLER, Francieli; LIMA, Maryangela Geimba de. **Inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado: uma revisão**. CONCRETO & Construções, v. XLIX, n. 103, p. 34-38, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/1809-7197.2021.103.0002>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SILVA FILHO, Edmilson Dantas et al.. **Avaliação dos parâmetros físico-químicos de águas minerais comercializadas no município de Campina Grande-PB**. Revista Principia, n. 30, p. 9-17, 2016.

VIDELA, Héctor A. **Biocorrosão, Biofouling e Biodeterioração de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

WANG, Y. S. et al. **Effect of *Bacillus subtilis* on corrosion behavior of 10MnNiCrCu steel in marine environment**. Scientific reports, v. 10, n. 1, p. 5744, 2020.

CAPÍTULO III

**INVESTIGAÇÃO DE CORROSÃO MICROBIANA
EM CONCRETO ARMADO NA PRESENÇA DE
SALINIDADE POR *BACILLUS CEREUS***

RESUMO

O concreto é formado por cimento, água, agregado graúdo e miúdo. Quando reforçado com barras de aço recebe o nome de concreto armado, é um dos principais elementos construtivos do mundo. Agentes agressivos, como íons cloretos, podem penetrar no concreto e corroer o aço, gerando assim sérios problemas à estrutura. A corrosão é um processo eletroquímico, porém existem estudos que mostram que as bactérias podem influenciar positiva ou negativamente no processo; iniciando, intensificando ou inibindo. Bactérias redutoras de sulfato estão sendo associadas à corrosão, tendo estudos que demonstram esse potencial. Dentre as bactérias estudadas a ***Bacillus cereus*** é comumente associada à corrosão de diversas ligas. É utilizada também em concreto autocicatrizante, porém não existem estudos que demonstram seu potencial corrosivo em concreto armado. Para verificar essa hipótese, foram confeccionados 12 corpos de prova, sendo 6 com relação a/c de 0,4 e 6 com relação a/c de 0,7. Foram colocados 6 blocos em cada caixa (3 de relação 0,4 a/c e 3 de relação 0,7 a/c), na caixa 1 os blocos estavam inoculados nos furos com ***Bacillus cereus*** e na caixa 2 os blocos estavam sem a presença da bactéria. foram analisados os parâmetros de condutividade, pH e salinidade. Foi observado ao fim do experimento, que a bactéria foi capaz de criar um ambiente mais agressivo na caixa 1 e também de acelerar o processo inicial de corrosão, causando descamação da camada de óxidos. A relação água cimento mais suscetível a contaminação, e onde foi observada maior presença da bactéria foi a 0,7 a/c. Constatou-se que ***Bacillus cereus*** em ambiente salino é capaz de iniciar a corrosão em concreto armado e acelerar o processo inicial.

Palavras-chave: Biocorrosão. Biofilme. Patologia de construção.

ABSTRACT

Concrete is made up of cement, water, coarse and fine aggregate. When reinforced with steel bars, it is called reinforced concrete. It is one of the main construction elements in the world. Aggressive agents, such as chloride ions, can penetrate the concrete and corrode the steel, thus causing serious problems to the structure. Corrosion is an electrochemical process, but there are studies that show that bacteria can positively or negatively influence the process; initiating, intensifying or inhibiting it. Sulfate-reducing bacteria have been associated with corrosion, and studies have demonstrated this potential. Among the bacteria studied, *Bacillus cereus* is commonly associated with the corrosion of various alloys. It is also used in self-healing concrete, but there are no studies that demonstrate its corrosive potential in reinforced concrete. To verify this hypothesis, 12 test specimens were prepared, 6 with a w/c ratio of 0.4 and 6 with a w/c ratio of 0.7. Six blocks were placed in each box (3 with a 0.4 w/c ratio and 3 with a 0.7 w/c ratio). In box 1, the blocks were inoculated in the holes with *Bacillus cereus*, and in box 2, the blocks were free of the bacteria. The parameters of conductivity, pH, and salinity were analyzed. At the end of the experiment, it was observed that the bacteria were able to create a more aggressive environment in box 1 and also accelerate the initial corrosion process, causing flaking of the oxide layer. The water-cement ratio most susceptible to contamination, and where the greatest presence of the bacteria was observed, was 0.7 w/c. It was found that *Bacillus cereus* in a saline environment is capable of initiating corrosion in reinforced concrete and accelerating the initial process.

Keywords: Biocorrosion. Biofilm. Building pathology.

1 INTRODUÇÃO

Com o tempo, os métodos de construção sofreram várias modificações. Inicialmente, acreditava-se que o concreto fosse indestrutível, mas com o decorrer dos anos, percebeu-se que fatores externos comprometiam sua durabilidade e causavam sérios problemas (Schmoeller e Lima, 2021).

Nesse contexto, emerge o estudo das patologias na construção, assim como a análise dos problemas que elas podem ocasionar (Neves e Vázquez, 2021). Segundo Shamoeller e Lima (2021), a corrosão das armaduras é uma das principais patologias da construção e uma das mais preocupantes, sendo capaz de causar sérios danos, como a ruptura total ou parcial da estrutura.

A corrosão de estruturas é um processo eletroquímico que consiste na degradação do metal e das propriedades químicas do concreto (Martins, 2022). É influenciado por fatores como concreto de cobrimento, agressividade ambiental e a relação água cimento (Caldas e Nogueira, 2023).

Processos corrosivos podem ser inibidos, acelerados ou até mesmo intensificados pela presença de microrganismo; esse é um processo conhecido como corrosão induzida por microrganismos (CIM) (Videla, 2003). A CIM possui mecanismos parecidos com a corrosão eletroquímica, no entanto a presença de microrganismos e a excreção de substâncias, como ácidos orgânicos, agravam o processo de corrosão (Santos et al., 2024).

Destacam-se nos estudos referentes a corrosão induzida por microrganismos as bactérias redutoras de sulfato, oxidantes de ferro e oxidantes de enxofre (Santos et al., 2024). Entretanto, pesquisas vêm destacando que as bactérias redutoras de nitrato possuem características parecidas com as redutoras de sulfato e possuem alto potencial de corrosão Liu et al. (2021).

Dentre os grupos de bactérias redutoras de nitrato o principal é o grupo *Bacillus* (Liu et al., 2021). No grupo *Bacillus cereus* se encontra a bactéria objeto deste estudo; *Bacillus cereus*. É uma bactéria gram-positiva, aeróbia ou anaeróbia facultativa (Vilasbôas; Peruca; Arantes, 2007). Pode ser encontrado nos mais diversos ambientes e possui a capacidade de gerar biofilmes complexos e que podem se aderir às mais diversas superfícies (Parthipan, 2017). Outro fator é que o *Bacillus cereus* é patogênico e está associado a doenças no trato digestivo (Jovanovic et al., 2023).

Parthipan (2017) destaca em seu estudo que *Bacillus cereus* é capaz de formar uma camada sobre a superfície do metal e induzir a corrosão por pites em aço carbono. Wan (2018) descreveu o potencial corrosivo de *Bacillus cereus* em ligas de aço x80; comumente utilizado em gasoduto. Liu et al. (2021) descreveram o potencial corrosivo

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

de *Bacillus cereus* em tubulações subterrâneas, evidenciando a capacidade de induzir e se transformar em um catodo biológico da bactéria.

Existem pesquisas que utilizam o *Bacillus cereus* como aditivo no concreto; para produção de concreto autocatrizante; tendo em vista que possui a capacidade de precipitar carbonato de cálcio Sohail et al. (2022). Entretanto não existem trabalhos que demonstrem o potencial corrosivo do *Bacillus cereus* em concreto armado. Isso abre margem para uma investigação mais aprofundada, tendo em vista o grande potencial corrosivo dessa bactéria.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concreto, Construção e Patologia

O concreto é um material composto por agregado graúdo, agregado miúdo, água e plastificante (cimento). Assim, seja armado ou não, ele se configura como um elemento integrante de um sistema construtivo (Damme, 2018).

Por muito tempo, acreditou-se que o concreto possui vida útil infinda, entretanto o surgimento de patologias de construção, mostrou a realidade dos fatos; o concreto sofre com a ação e agentes agressivos, tanto quanto outros materiais.

O termo "patologia" é amplamente empregado na medicina para descrever qualquer alteração fisiológica ou anatômica que caracterize uma doença, isso de acordo com o dicionário Oxford. Da mesma forma, embora menos conhecido, esse conceito também se aplica à construção civil.

Apesar das áreas distintas, o significado permanece semelhante, com a diferença de que, nesse contexto, a construção assume o papel de "paciente", enquanto o engenheiro atua como o "médico".

Assim, de acordo com Schmoeller e Lima (2021), as patologias na construção referem-se a defeitos que surgem ao longo do tempo, comprometendo a durabilidade, estabilidade, eficiência ou funcionalidade da estrutura.

De acordo com Diniz e Souza (2023), patologias podem ser causadas por diversos fatores, como falhas na execução da obra ou o uso de materiais de qualidade inferior, o que impacta diretamente no aumento dos custos de manutenção.

2.2 Corrosão de Armaduras

Dentro desse contexto, a corrosão se destaca como uma das patologias mais comuns e preocupantes em construções. A corrosão das armaduras, por exemplo, pode levar ao colapso parcial ou total da estrutura, o que torna esse problema ainda mais grave (Schmoeller e Lima (2021).

Além disso, as dificuldades em lidar com a corrosão exigem mão de obra especializada e o uso de técnicas de recuperação complexas, o que resulta em custos elevados para a manutenção das obras.

Existem fatores que contribuem e afetam diretamente a corrosão de armaduras. Esses fatores estão citados na NBR 61178/14. Dentre eles é válido citar:

a) Agressividade ambiental:

Dentre os fatores que aceleram a corrosão estão a composição da atmosfera e microclima em que a construção está inserida. a presença da névoa salina (maresia)

bem como a presença de gás carbônico contribui significativamente para aumentar a agressividade ambiental e acelerar o processo de corrosão (Caldas e Nogueira, 2023).

A NBR 61178 define a agressividade ambiental em 4 classes, sendo elas fraca, moderada, muito forte. O risco de deterioração da estrutura começa em insignificante e vai até elevado. Os ambientes de maior risco de deterioração são zonas marinhas, industriais e de respingo de maré.

b) Concreto de Cobrimento:

O concreto envolve a armadura e, além de proteger fisicamente contra agentes externos, protege quimicamente. Essa proteção química é proveniente da espessura de cobertura. Já a proteção química é proveniente da composição do cimento e da hidratação (Caldas e Nogueira, 2023).

c) Relação água/cimento

A relação água/cimento diz respeito à proporção de água relacionada à quantidade de cimento, de maneira que quanto maior a relação a/c maior será a quantidade de água presente na mistura. Por sua vez, quanto maior a presença de água, maior será a presença de espaços vazios (poros) (Caldas e Nogueira, 2023).

Quanto maior a presença de espaços vazios maior será a susceptibilidade de penetração de agentes agressivos (Caldas e Nogueira, 2023). Dessa forma, a NBR 61178/14 determina que quanto maior for a classe de agressividade ambiental, menor deve ser a relação água cimento.

2.2.1 Processo de corrosão

A corrosão é um processo eletroquímico caracterizado pela formação de correntes iônicas e elétricas. Esse processo resulta na criação de duas zonas na superfície do metal: uma zona catódica, onde ocorre a perda de elétrons, e uma zona anódica, onde ocorre o ganho de elétrons (Schmoeller e Lima, 2021).

2.2.1.1 Camada passivadora e a despassivação: Carbonatação

No concreto, é formado um ambiente alcalino que promove a criação de uma camada fina de óxidos e hidróxidos, conhecida como camada passivadora. Essa camada desempenha um papel crucial ao proteger o material contra a corrosão (Helena, 1986; Lima 1996 apud Schmoeller e Lima, 2021).

Em ambientes sujeitos à névoa salina, a presença de íons cloreto é intensificada devido à maior deposição desses agentes agressivos. A penetração desses íons no concreto ocorre com maior facilidade devido a diversos fatores, sendo a carbonatação um dos principais (Pongsaksawad et al., 2021).

O processo de carbonatação ocorre quando o CO₂ atmosférico penetra nos poros do concreto e reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), levando à formação de

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

carbonato de cálcio (CaCO_3). Com o tempo, essa reação avança em direção à armadura do concreto (Moraes et al, 2023).

À medida que a carbonatação progride, o pH do concreto, que normalmente se mantém entre 12,5 e 13,5, sofre uma redução para valores próximos a 9. Essa alteração química compromete a estabilidade do material, resultando na destruição da camada passivadora que protege a armadura de aço embutida no concreto (Ramos et al., 2022).

Esse enfraquecimento estrutural facilita ainda mais a entrada de agentes agressivos, como os íons cloreto, desencadeando o processo de oxidação e, conseqüentemente, a corrosão da armadura. É importante ressaltar que oxidação e corrosão são fenômenos distintos, embora interligados dentro desse contexto de degradação do concreto armado (Ramos et al., 2022).

2.2.1.2 Íons cloreto

Após a perda da camada passivadora da armadura, a próxima fase do processo de deterioração é a redução da seção do aço. Isso ocorre porque agentes agressivos, como íons cloreto, conseguem penetrar pelos poros do concreto e, sem a proteção adequada, iniciam a corrosão do material (Pongsaksawad et al., 2021).

De acordo com Meite (2017) (apud Bertuci; Duarte; Rezende, 2023) a corrosão do aço no concreto é um fenômeno eletroquímico. Esse processo se intensifica quando os íons de ferro presentes na armadura reagem com os íons cloreto, formando cloreto de ferro (FeCl_2). Com o tempo, esse composto se torna instável e passa por hidrólise em contato com a água, resultando na formação de hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$).

Com essa alteração química, a estrutura da célula eletroquímica se modifica: o concreto atua como eletrólito, o oxigênio e a umidade intensificam o processo, enquanto a barra de aço funciona como meio de transporte dos elétrons entre o ânodo e o cátodo, favorecendo a corrosão progressiva da armadura (Bertuci; Duarte; Rezende, 2023).

2.3 Corrosão induzida ou acelerada por microrganismos

Santos et al. (2024) afirma que a corrosão induzida por microrganismos ocorre de forma semelhante à corrosão eletroquímica, diferenciando-se principalmente na etapa inicial. Isso significa que os microrganismos podem tanto desencadear quanto acelerar o processo corrosivo.

Ainda segundo Santos et al. (2024), um fator essencial para o início desse fenômeno é a formação de um biofilme. Nesse biofilme, as bactérias, por meio de seu metabolismo, alteram a concentração de oxigênio no ambiente, influenciando diretamente a progressão da corrosão.

De acordo com Videla (2003) o processo biológico da corrosão segue uma sequência específica. Inicialmente, os microrganismos aderem à superfície do material

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

e formam um biofilme, resultado da liberação de exopolissacarídeos (EPS). Em seguida, as bactérias aeróbias presentes no biofilme consomem oxigênio durante seu processo respiratório, criando uma região com baixa concentração desse gás na superfície.

Como o biofilme não recobre toda a área do material de maneira uniforme, algumas regiões apresentam maior disponibilidade de oxigênio do que outras. Isso leva à ocorrência de reações anódicas (oxidação) nas áreas cobertas pela colônia microbiana, enquanto nas regiões expostas, onde não há microrganismos, predominam reações catódicas (redução) (Santos et al., 2024).

Além disso, a corrosão pode ser intensificada tanto pela liberação de substâncias produzidas pelos microrganismos quanto pela manutenção da diferença na concentração de oxigênio ao longo da superfície. A presença do biofilme modifica a interação entre o metal e os microrganismos (Santos et al., 2024).

2.4 Biofilme

Como visto anteriormente, a formação do biofilme faz parte e é fator fundamental na corrosão induzida por microrganismos (Alotaibi e Bukhari, 2021). É válido dizer que o biofilme é fator importante também para possibilitar a fixação da bactéria nas mais diversas superfícies (Asma *et al.*, 2022).

Sabe-se que o biofilme é formado por um consórcio microbiano envolvidos em uma matriz de substâncias poliméricas extracelulares, denominada de EPS e aglutinações de células (Asma *et al.*, 2022). Entretanto, estima-se que 97% do biofilme é composto por água (Alotaibi e Bukhari, 2021).

Vasudevan (2014) (apud Alotaibi e Makkah, 2021) indica que o papel da água é formar canais para a facilitação e distribuição de nutrientes, oxigênio e de outros microrganismos dentro do biofilme, tendo assim um papel fundamental.

O processo de formação do biofilme se dá por 5 etapas primordiais, como demonstra o quadro 13:

Quadro 13 - Etapas de formação do biofilme

| Etapas de Formação | | |
|--------------------|-----------------------------------|---|
| Etapa 1 | Fixação reversível inicial | Na etapa inicial do biofilme, microrganismos aderem à superfície, formando uma camada que facilita a fixação de outros. Fatores como carga, rugosidade e apêndices externos influenciam esse processo. A adesão pode ser alterada por forças eletrostáticas, hidrofóbicas e tensões do fluido. Esse estágio ocorre rapidamente e é essencial para a formação do biofilme. |

| | | |
|----------------|---|---|
| Etapa 2 | Anexo irreversível | Nessa fase, os microrganismos fixados não podem ser removidos pelas tensões do fluido ou superfície, pois começam a produzir EPS, estabelecendo uma forte ligação com a superfície. Além disso, os organismos podem se agrupar entre si ou com outros microrganismos do biofilme, reforçando ainda mais sua fixação. |
| Etapa 3 | Desenvolvimento de Arquitetura de Biofilme | Após a fixação irreversível, os microrganismos inibem apêndices de locomoção e começam a crescer exponencialmente, dividindo-se e utilizando os nutrientes disponíveis. Eles produzem mais EPS para fortalecer a adesão à superfície. A produção de polímeros de adesão intercelular e a presença de cátions divalentes ajudam a estabilizar as ligações. Nessa fase, os processos biológicos dominam a formação do biofilme. |
| Etapa 4 | Maturação | Na fase de maturação, as comunidades microbianas se desenvolvem em um biofilme maduro, onde a comunicação entre os microrganismos é crucial para regular o consumo de nutrientes, o crescimento e o reconhecimento entre eles. Esse processo é mediado pelo mecanismo de Quorum Sensing (QS), que utiliza autoindutores para criar uma cadeia de respostas. Após a maturação, o biofilme possui três camadas: uma película de união, uma camada densa de bactérias e uma camada flutuante com bactérias livres. |
| Etapa 5 | Dispersão | Na última etapa do biofilme, ocorre a dispersão dos microrganismos, o que pode facilitar a propagação de patógenos, permitindo que as bactérias se fixem em novas superfícies e reiniciem a formação do biofilme. Essa dispersão pode ser causada pela limitação de nutrientes, características do fluido e forças de cisalhamento, além da eliminação de células filhas. |

Fonte: (Alotaibi e Makkah, 2021).

2.5 *Bacillus cereus*: Características e áreas de interesse

O grupo *Bacillus cereus* é composto por aproximadamente oito espécies. Essas espécies têm muita relação no sentido filogenético, entretanto são ecologicamente diversas (Kulkova et al., 2023). De acordo com Kulkova et al. (2023), as espécies relacionadas são:

- *B. anthracis*;
- *B. cereus*;
- *B. thuringiensis*;
- *B. mycoides*;
- *B. pseudomycoides*;
- *B. weihenstephanensis*;
- *B. cytotoxicus*;
- *B. toyonensis*.

Em termos específicos, a espécie *Bacillus cereus* é aeróbica ou anaeróbica facultativa. É classificada como uma bactéria gram-positiva, são móveis e possuem a capacidade, na presença do oxigênio, de formar esporos (Kulkova et al., 2023).

De acordo com Kulkova et al. (2023), a bactéria *Bacillus cereus* pode ser encontrada no ar, na água, no solo, poeira e matéria em decomposição, raízes de plantas e até em produtos alimentícios; sendo definida como uma bactéria onipresente.

É considerada patogênica, pois algumas de suas cepas são capazes de produzir diversas enterotoxinas. Essas substâncias podem causar dois tipos de intoxicação alimentar, afetando tanto seres humanos quanto animais (Kulkova et al., 2023).

O *Bacillus cereus* é amplamente reconhecido como um dos principais microrganismos capazes de produzir enzimas amilases, conforme destacado por Pandey (2003) (apud Júnior et al., 2021). Essas enzimas desempenham um papel fundamental na indústria de alimentos, sendo essenciais para a produção de glicose e frutose (Carvalho, 2008).

2.5.1 *Bacillus cereus*, CIM e mecanismos estudados

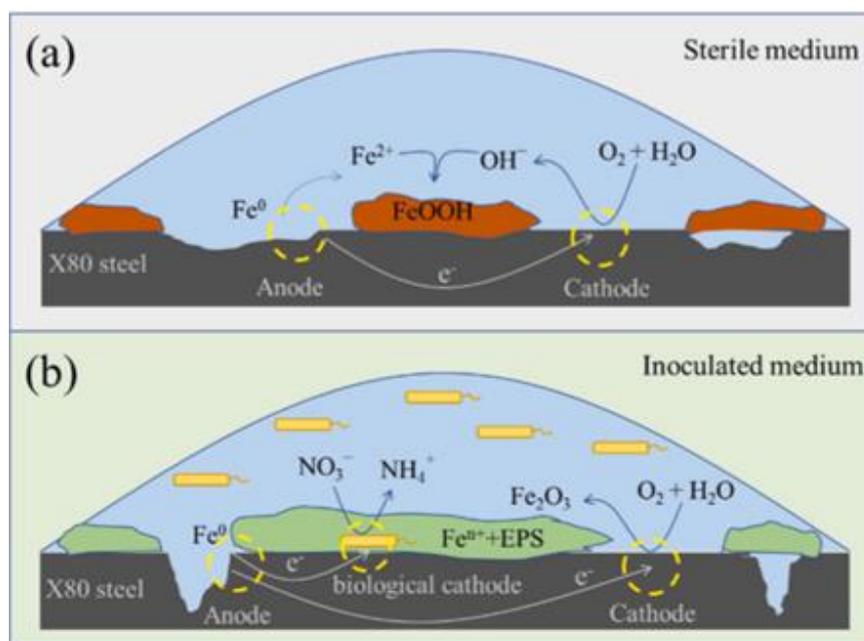
As pesquisas voltadas para a corrosão induzida por microrganismos possuem maior foco nas bactérias redutoras de sulfato, oxidantes de ferro e oxidantes de enxofre. Entretanto, ainda podem, mesmo em pouca quantidade, ser encontradas pesquisas demonstrando o potencial corrosivo de bactérias redutoras de nitrato (Liu et al., 2021).

Wam (2018) destacou a corrosão de tubulações de aço x80 por *Bacillus cereus*. Liu et al. (2021) também demonstraram os mecanismos da corrosão do aço x80 por *Bacillus cereus*. No entanto, a investigação foi feita utilizando um solo artificial, recriando um ambiente de duto subterrâneo.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Li et al. (2021) pontuaram que a redução do nitrato presente no solo, aliado a formação do biofilme a atividade metabólica foi capaz de induzir a corrosão nos dutos subterrâneos. Dessa forma, a bactéria atuou como um catodo natural, como descrito na figura 38 levando a formação de pites.

Figura 38 - Mecanismo de corrosão por *Bacillus cereus*



Fonte: Liu et al., 2021.

O fator que torna os pites produzidos pelas bactérias redutoras de nitrato mais agressivos é a força motriz termodinâmica da CIM; sendo maior até do que a das bactérias redutoras de sulfato. Isso infere na maior facilidade desses microrganismos em ganhar elétrons de ferro (Li et al., 2020).

2.5.2 *Bacillus cereus* e a corrosão no concreto armado

Na pesquisa de referências não foram encontrados trabalhos que evidenciam a CIM no concreto armado por *Bacillus cereus*; nem a sua prospecção. O que pode ser encontrado na literatura, são estudos que utilizam essa bactéria na produção de cimento autocicatrizante.

Sohail et al (2022) pesquisaram a possibilidade de utilização de algumas cepas de *Bacillus cereus* no cimento para preenchimento de fissuras. Constataram que a bactéria é capaz de precipitar carbonato de cálcio, através de reações do biofilme e as propriedades químicas do concreto.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Priyon et al. (2023), mostraram que a adição de *Bacillus cereus* no concreto melhora, mesmo que eventualmente, as propriedades físicas. Esse processo é possível por causa da formação de cristais de calcita.

No entanto, conforme discutido anteriormente, o estudo de Liu et al. (2021) demonstrou que, na presença de nitrato, as bactérias redutoras de nitrato têm maior facilidade para atuar como um cátodo natural, permitindo-lhes captar elétrons do ferro com mais eficiência.

Além disso, alguns aditivos utilizados no concreto contêm nitrato em sua composição, como o nitrato de cálcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), que atua como um acelerador de resistência e também como inibidor de corrosão (Costa et al., 2018). Outra questão relevante é a escassez de estudos sobre o potencial de biocorrosão causada por *Bacillus cereus* em concreto armado exposto a ambientes salinos, o que evidencia a necessidade de investigações mais detalhadas sobre o tema.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução dos experimentos, foram adotadas diversas metodologias, abrangendo desde a moldagem dos corpos de prova até sua preparação. No entanto, conforme mencionado, não foram identificados na literatura métodos específicos para ensaios de biocorrosão acelerada em concreto armado. Diante disso, os autores desenvolveram uma abordagem própria para investigar esse fenômeno.

3.1 Moldagem dos Corpos De Prova

A moldagem dos corpos de prova seguiu algumas diretrizes da NBR 7215:96. No entanto, o objetivo deste estudo não era produzir um concreto de alta resistência, conforme proposto pela norma, mas sim um material que simulasse condições reais de obra, permitindo a observação do processo de biocorrosão. Os materiais empregados na confecção estão descritos no quadro 14):

Quadro 14 - Matérias da moldagem

| | | |
|-----------------|---------|---------|
| Areia | Cimento | Treliça |
| Lavada (normal) | CP II Z | Aço |

Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme informado pelo fabricante, o cimento do tipo CP II Z contém a adição de 6% a 14% de componente pozolânico.

3.1.1 Moldagem e cura dos corpos

Os corpos de prova foram confeccionados em formato cilíndrico, contendo uma barra de aço de 5 mm posicionada no centro. Foram adotadas duas relações água/cimento, 0,4 e 0,7. O processo de moldagem ocorreu da seguinte maneira:

3.1.1.1 Etapa 1: Pesagem e triagem

Os cálculos de materiais foram feitos com a finalidade de se fazer a mistura correta para as duas relações água/cimento escolhidas. Dessa forma, quantidade de material para as duas relações foram as apresentadas no quadro 15):

Quadro 15 - Traços e quantidade de material

| Relação A/C | Cimento | Areia | Água |
|-------------|---------|-------|--------|
| 0,4 | 1 Kg | 2 Kg | 400 mL |
| 0,7 | 1 Kg | 3 kg | 700 mL |

Fonte: Autoria própria (2025).

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Com a finalidade de padronizar a granulometria da área, ela foi peneirada em uma peneira com o diâmetro de 1,18 mm. Logo em seguida ao peneiramento, todos os materiais seguiram para a pesagem e por fim para o misturador de bancada para preparar os traços. Observe a mistura na figura 39:

Figura 39 - Misturador de bancada



Fonte: Autoria própria (2025).

Com os traços prontos, segue-se para a próxima etapa.

3.1.1.2 Etapa 2: Preparação dos moldes e montagem

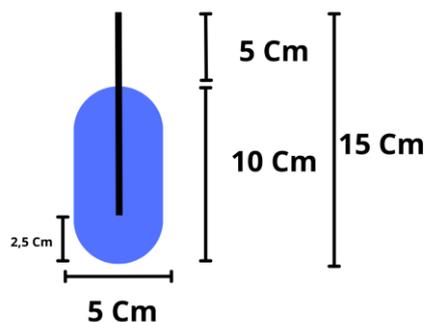
Nessa etapa foi feita a selagem interna utilizando o desmoldante, óleo de caminhão queimado, com a finalidade de retirar os corpos de prova já secos com mais facilidade.

O preenchimento dos moldes se deu da seguinte forma:

- Foram moldados em 4 camadas;
- A cada camada foram dados 30 golpes utilizando um varão de 0,5 mm, com a finalidade de compactar;
- Logo após o preenchimento, os corpos de prova receberam o varão de aço de 5 mm que foi introduzido no centro

Observe na figura 40 as especificações e características dos corpos de prova:

Figura 40 - Especificação dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2025).

É importante dizer que os moldes possuem volume variável, com a finalidade de facilitar a desmoldagem. Dessa forma, as medidas acabam sendo aproximadas tendo em vista que alguns corpos possuíam o diâmetro um pouco diferente. Depois de moldados os corpos de prova ficaram da seguinte forma; figura 41:

Figura 41 - Corpos dentro do molde



Fonte: Autoria própria (2025).

3.1.1.3 Etapa 3: desmoldagem e cura

Decorridas as 48 horas, os corpos de prova seguiram para a desmoldagem e cura em água. A desmoldagem foi feita de forma mecânica, com golpes no fundo do molde e abrindo-o pelas laterais.

A cura em água durou aproximadamente 7 dias e foi feita para que a argamassa chegasse a 70% de sua resistência. Veja como se deu a cura na figura 42:

Figura 42 - Corpos de prova durante a cura em água



Fonte: Autoria própria (2025).

Foram produzidos, ao todo, 12 corpos de prova, sendo 6 com relação água/cimento de 0,4 e os outros 6 com relação de 0,7.

3.1.1.4 Etapa 4: perfuração dos corpos de prova

Para a introdução das bactérias, foram realizados dois furos em cada corpo de prova com o uso de uma broca de 10 mm. Esses furos tinham, em média, 2 cm de profundidade e estavam posicionados a uma distância de 0,5 cm da barra inserida no corpo de prova. A figura 43 abaixo ilustra a perfuração de um dos corpos:

Figura 43 - Preparação dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2 Ensaios de Biocorrosão Acelerada

Não foram encontradas, nas bibliografias, metodologias que abrangessem os ensaios realizados neste estudo. Dessa forma, foi preciso elaborar uma metodologia

única com a finalidade de evidenciar a CIM no concreto armado. A seguir será demonstrado como se sucedeu o ensaio bem como a esquematização de cada etapa.

3.2.1 Ensaio úmidos

O primeiro passo na preparação dos ensaios úmidos foi a coleta da água do mar, pois a bactéria utilizada no estudo é halófila, o que significa que necessita de um ambiente salino; levando também o objetivo do estudo, sendo necessário um ambiente agressivo.

A coleta de água ocorreu na praia de Boa Viagem, situada na região metropolitana do Recife, a cerca de 5 M da costa. Um total de 60 L foi recolhido e transportado ao laboratório para passar pelos processos de filtração e autoclavagem. Veja a figura 44 a seguir:

Figura 44 - Coleta da água do mar



Fonte: Autoria própria (2025).

A filtração teve como objetivo eliminar as impurezas e as partículas de areia contidas na água do mar. Para isso, foram utilizados filtros de papel simples, funis e erlenmeyers de 4 litros, conforme ilustrado na figura 45 abaixo.

Figura 45 - Processo de filtração da água do mar



Fonte: Autoria própria (2025).

O material contido no erlenmeyer foi então vedado com tampões e papel alumínio, seguindo para o processo de autoclavagem. Esse procedimento teve como objetivo eliminar possíveis microrganismos presentes na água do mar.

Foram medidos alguns parâmetros, incluindo condutividade, salinidade, densidade e pH, visando a caracterização e parametrização da água. Após a obtenção da água do mar autoclavada, deu-se início à preparação dos ensaios.

3.2.3.1 Preparação dos ensaios

A preparação dos banhos ocorreu da seguinte maneira: foram utilizados dois organizadores com tampa, cada um com capacidade aproximada de 10 L, devidamente numerados.

Na caixa 2, foram colocados seis corpos de prova, sendo três com relação 0,4 a/c e três com relação 0,7 a/c, todos inoculados com *Bacillus cereus*. Já a caixa 4 recebeu a mesma quantidade e distribuição de corpos de prova, porém sem a presença da bactéria, sendo denominado controle para fins de comparação dos dados.

Após a inserção dos corpos de prova, cada caixa foi preenchida com 4 L de água e, em seguida, mantida fechada e levado à estufa a uma temperatura aproximada de 35°C.

3.2.3.2 Parâmetros analisados

Os ensaios foram conduzidos da seguinte maneira: a cada intervalo de 10 a 15 dias, os organizadores eram retirados da estufa e coletavam-se 40 mL de água para a análise dos parâmetros de pH, salinidade, condutividade e avaliação visual.

Os valores foram comparados com os da água do mar armazenada, que foi a mesma utilizada no estudo. Também foi medida a altura do fluido, e em cada etapa foram realizados registros fotográficos. Após cada medição, as caixas eram

cuidadosamente fechadas e colocadas na estufa a uma temperatura aproximada de 35°C.

3.2.3.3 Contagem de Colônias

Para verificar a presença do microrganismo nas barras de aço e na água do mar contida nos organizadores, foi aplicada a seguinte metodologia:

Cada corpo de prova presente no organizador recebeu uma identificação por letra. Em seguida, o algodão que selava o inóculo das bactérias foi removido e colocado no meio de cultura, com o objetivo de verificar se as bactérias ainda estavam vivas após esse período no concreto. Observe a figura 46:

Figura 46 - Remoção dos inóculos



Fonte: Autoria própria (2025).

Sendo assim, as amostras ficaram da seguinte forma. Observe o quadro 16:

Quadro 16 - Disposição das amostras

| ORG | Amostras | Bactéria | Relação (a/c) |
|---------|----------|------------------------|---------------|
| caixa 2 | 1 C | <i>Bacillus cereus</i> | 0,4 |
| | 2 C | <i>Bacillus cereus</i> | 0,4 |
| | 3 D | <i>Bacillus cereus</i> | 0,4 |
| | 1 D | <i>Bacillus cereus</i> | 0,7 |
| | 2 D | <i>Bacillus cereus</i> | 0,7 |
| | 3 D | <i>Bacillus cereus</i> | 0,7 |

Fonte: Autoria própria (2025).

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

A barra de aço excedente dos corpos de prova foi cortada com um alicate, identificada com uma letra e transportada ao centro para análise da presença de bactérias no produto da corrosão. Veja a figura 47:

Figura 47 - Metais no meio de cultura



Fonte: Autoria própria (2025).

As identificações atribuídas aos metais extraídos correspondem às letras apresentadas no quadro 17:

Quadro 17 - Disposição das amostras da coleta de ferro

| ORG | Amostras | Bactéria | Relação (a/c) |
|---------|----------|------------------------|---------------|
| CAIXA 2 | 1 c | <i>Bacillus Cereus</i> | 0,4 |
| | 2 c | <i>Bacillus Cereus</i> | 0,4 |
| | 3 c | <i>Bacillus Cereus</i> | 0,4 |
| | 1 d | <i>Bacillus Cereus</i> | 0,7 |
| | 2 d | <i>Bacillus Cereus</i> | 0,7 |
| | 3 d | <i>Bacillus Cereus</i> | 0,7 |
| CAIXA 4 | 1 g | - | 0,4 |
| | 2 g | - | 0,4 |
| | 3 g | - | 0,4 |
| | 1 h | - | 0,7 |
| | 2 h | - | 0,7 |
| | 3 h | - | 0,7 |

Fonte: Autoria própria (2025).

Também foi realizada a coleta das águas de cada organizador, que foram posteriormente levadas ao meio de cultura para verificar a possível contaminação por *Bacillus cereus*.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaio Úmidos

Após a preparação dos ensaios úmidos, as caixas contendo os corpos de prova foram colocadas na estufa a 35°C, onde permaneceram por 13 dias até a primeira coleta para avaliação dos parâmetros. A segunda medição ocorreu 14 dias após a primeira, e a terceira medição foi realizada 24 dias depois da segunda.

O experimento foi finalizado 3 dias após a terceira coleta, com a remoção dos corpos de prova e a transferência dos inóculos retirados dos blocos para os meios de cultura. O experimento teve uma duração total de 54 dias.

4.1.1 Parâmetros analisados

Veja na tabela 3 os resultados dos parâmetros avaliados tanto na caixa 2, que contém o inóculo da bactéria, quanto na caixa 4, chamada de controle. Esses valores também são comparados com as medições da água do mar.

Tabela 3 - Resultado dos parâmetros analisados

| Parâmetros | Medição 1 | | | Medição 2 | | | Medição 3 | | |
|---------------|-----------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|
| | Bacillus cereus | Controle | Água do mar | Bacillus cereus | Controle | Água do mar | Bacillus cereus | Controle | Água do mar |
| Condutividade | 54,30 mS/cm | 55,51 mS/cm | 55,18 mS/cm | 59,3 mS/cm | 54,51 mS/cm | 54,51 mS/cm | 183,4 mS/cm | 132,4 mS/cm | 67,29 mS/cm |
| Salinidade | 39 ‰ | 40 ‰ | 40 ‰ | 40,1 ‰ | 45 ‰ | 39 ‰ | 76 ‰ | 70,1 ‰ | 40 ‰ |
| PH | 8,7 | 8,48 | 7,98 | 8,03 | 7,7 | 7,58 | 7,74 | 7,6 | 7,76 |

Fonte: Autoria própria (2025).

Na tabela 3 é possível notar que, na primeira medição, a condutividade se manteve bastante próxima aos valores de referência. Em um estudo realizado por Barbosa et al. (2022), a água do mar coletada na praia do Paiva, localizada na região metropolitana do Recife-PE, apresentou uma condutividade de 64,67 mS/cm. O estudo atribuiu essa alta condutividade à presença de esgotos na área.

Na segunda medição a condutividade da água presente na caixa 2, contaminada com a bactéria, se apresentou maior do que as demais e isso se repetiu na terceira medição. Significa dizer que o processo de corrosão estava mais favorecido na caixa 2, tendo em vista que a condutividade está intrinsecamente ligada à disponibilidade de íons no meio.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

A salinidade esteve próxima dos valores de referência, tendo um leve aumento na segunda medição do controle. Entretanto, passado os dias, foi possível observar um grande aumento da salinidade tanto na caixa contaminada quanto no controle.

Na terceira medição, houve um salto na salinidade tanto na caixa 2 quanto na caixa 4. Entretanto a caixa 2 apresentou maior nível de salinidade, sendo 183,4 mS/cm, deixando o ambiente mais agressivo; estando este aumento relacionado com a atividade metabólica da bactéria.

O pH se manteve levemente alcalino em todas as medições, começando a cair na 2 medição, após 27 dias de experimento. Mesmo no nível mais baixo, próximo da neutralidade, as medições se mantiveram bem parelhas.

O que se pode observar, utilizando uma visão geral sobre os parâmetros, é que o ambiente com a presença da bactéria se mostrou mais agressivo do que no controle. Isso está ligado à capacidade de produzir ácido (Watanuki e Gallo, 2008) e a produção de sideróforos (Da costa et al., 2022).

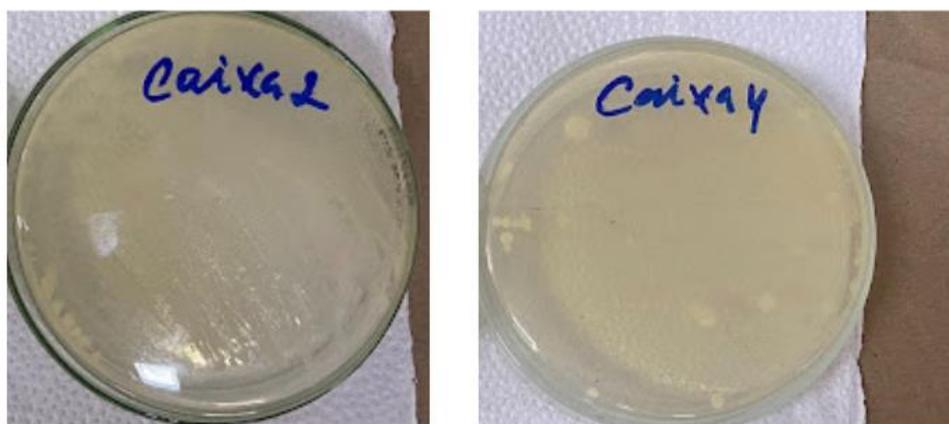
4.1.2 Contagem de colônias

Observe o resultado da contagem das colônias:

4.1.2.1 água dos ensaios úmidos

As amostras de água foram coletadas e, em seguida, transferidas para o meio de cultura. Abaixo, pode-se observar a figura 48, que mostra o crescimento das colônias.

Figura 48 - Placas com o crescimento da bactéria presente na água dos ensaios



Fonte: Autoria própria (2025).

Pode-se observar que ambas as caixas estavam contaminadas, entretanto a caixa 2 com *Bacillus cereus* e o controle com *Bacillus subtilis*. No entanto, o controle, localizado à direita na foto, apresenta um número reduzido de colônias, o que sugere uma contaminação mínima.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

Por outro lado, a caixa 1 estava fortemente infectada, ao ponto de não ser possível contar o número de colônias. Mesmo estando inoculada no corpo de prova e vedada com gotas de vela, a bactéria conseguiu contaminar a água do meio. Observe a avaliação qualitativa da presença da bactéria no quadro 18.

Quadro 18 - Análise qualitativa do crescimento e presença do microrganismo

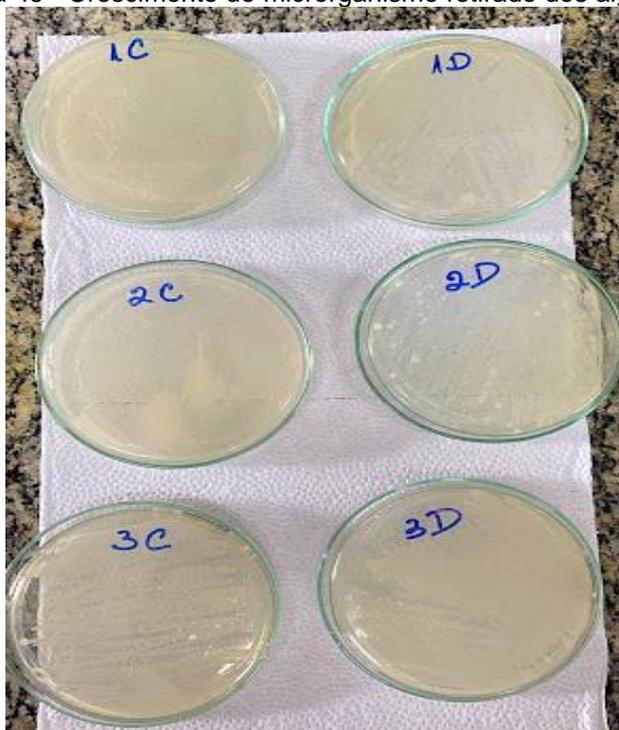
| Recipiente | Crescimento | Obs. |
|------------|-------------|-------------------|
| Caixa 2 | ++++ | |
| Caixa 4 | + | Pouco Crescimento |

Fonte: Autoria própria (2025).

4.1.2.2 Algodões

Veja abaixo as colônias que se formaram a partir do material coletado dos algodões retirados dos corpos de prova na figura 49:

Figura 49 - Crescimento do microrganismo retirado dos algodões



Fonte: Autoria própria (2025).

Veja na tabela a seguir a contagem das colônias no quadro 19:

Quadro 19 - Análise qualitativa das amostras dos algodões

| Amostras | Relação (a/c) | Contagem |
|----------|---------------|----------|
| 1 C | 0,4 | - |
| 2 C | 0,4 | + |
| 3 C | 0,4 | +++ |

| | | |
|-----|-----|------|
| 1 D | 0,7 | ++ |
| 2 D | 0,7 | ++ |
| 3 D | 0,7 | ++++ |

Fonte: Autoria própria (2025).

Como pode-se ver na figura (47) e no quadro 19) os corpos de prova da relação água cimento 0,7 a/c foram os que apresentaram maior crescimento e consequentemente maior contaminação, isso está ligado à maior porosidade e maior presença de água; o que favorece o crescimento microbiano.

4.1.2.3 Metal

Observe na figura 50 a seguir o desenvolvimento das colônias formadas nos fragmentos metálicos.

Figura 50 - Crescimento da bactéria no metal



Fonte: Autoria própria (2025).

O que se pode ver, tanto na figura 50 como também no quadro 20 é que a bactéria foi capaz de contaminar as hastes da ferragem sobressalentes, mesmo que em pouca quantidade na relação 0,4 a/c. Isso pode ser atribuído a pouca porosidade dessa relação, o que dificulta a penetração da bactéria e de agentes agressivos.

Quadro 20 - Análise qualitativa da presença do microrganismo nas hastes

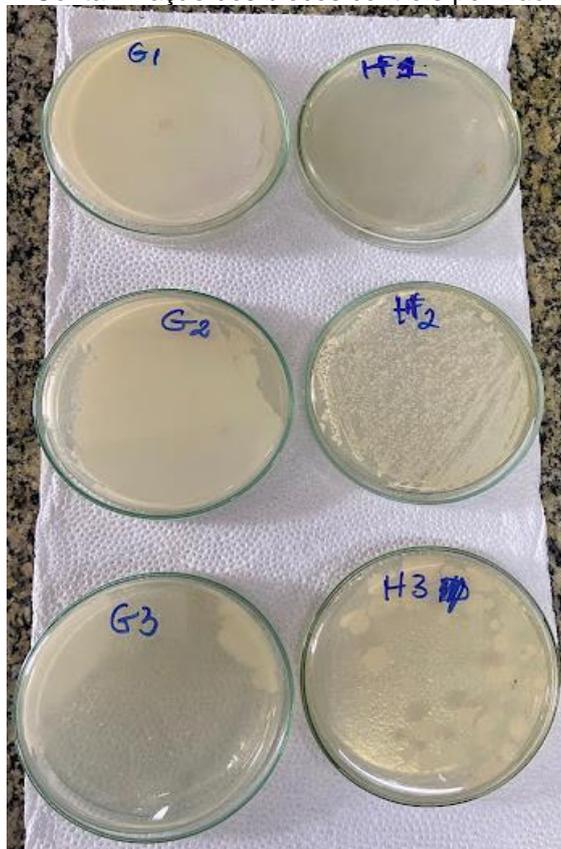
| Amostras | Relação (a/c) | Contagem | Obs. |
|----------|---------------|----------|-------------|
| 1 c | 0,4 | + - | 1 Colônia |
| 2 c | 0,4 | + | 40 colônias |
| 3 c | 0,4 | - | |

Fonte: Autoria própria (2025).

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

É interessante dizer que ao analisar o aço sobressalente nos corpos de prova controle foi possível registrar a presença da bactéria *Bacillus subtilis*. Observe na figura 51 o crescimento das colônias nas placas:

Figura 51 - Contaminação dos blocos controle por *Bacillus subtilis*



Fonte: Autoria própria (2025).

Como se pode ver a contaminação dos blocos foi severa, estando as amostras 1G e 2G com um número incontável de colônias. Estando as amostras de relação 0,4 a/c com maior contaminação, como se pode ver no quadro 21.

Quadro 21 - Análise quantitativa da presença de contaminação do metal nos blocos controle

| Amostras | Relação (a/c) | Contagem | Obs. |
|----------|---------------|----------|------------|
| 1 G | 0,4 | ++++ | Incontável |
| 2 G | 0,4 | ++++ | Incontável |
| 3 G | 0,4 | ++ | |
| 1 H | 0,7 | - | |
| 2 H | 0,7 | +++ | |
| 3 H | 0,7 | ++ | |

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2 Avaliação visual

Observe a seguir o resultado do acompanhamento visual de corrosão em cada medição:

4.2.1 Primeira medição

Como visto anteriormente, após 13 dias na estufa os parâmetros analisados estavam equivalentes, tanto na caixa com as amostras contaminadas, como na caixa com o controle. observe as figuras 52 e 54.

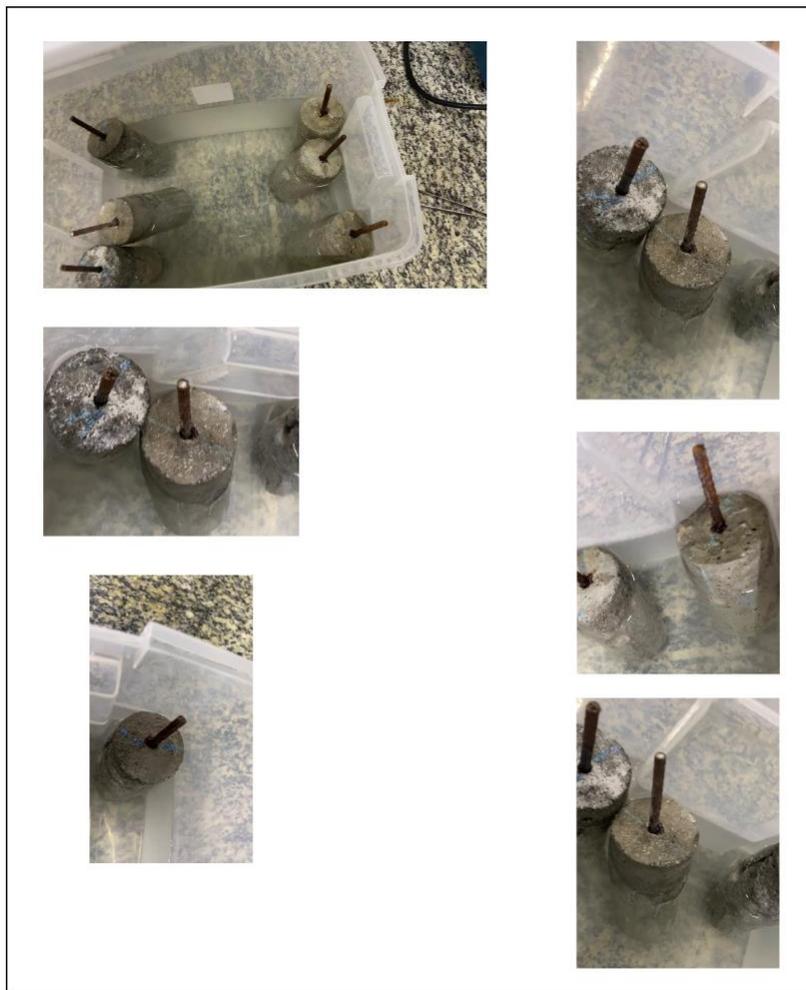
Figura 52 - Primeira medição - *Bacillus cereus*



Fonte: Autoria própria (2025).

Dessa maneira, como se pode ver nas figuras 52 e 53, o processo de corrosão já havia iniciado em ambas as caixas. Entretanto, ao comparar as duas pôde-se perceber que os blocos contaminados com a bactéria apresentavam um estado um pouco mais avançado de corrosão.

Figura 53 - Blocos controle na primeira medição



Fonte: Autoria própria (2025).

Pode ser observado descamação maior nas barras de aço dos corpos contaminados, demonstrando assim a ruptura da camada de óxidos que protege o aço (Aoki; Cotting; Tiano, 2021).

4.2.2 Segunda medição

14 dias após a primeira medição, durante a segunda, foi percebido que os blocos não contaminados começaram a apresentar uma descamação maior; observada na primeira medição nos blocos contaminados. observe as figuras 54 e 55:

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

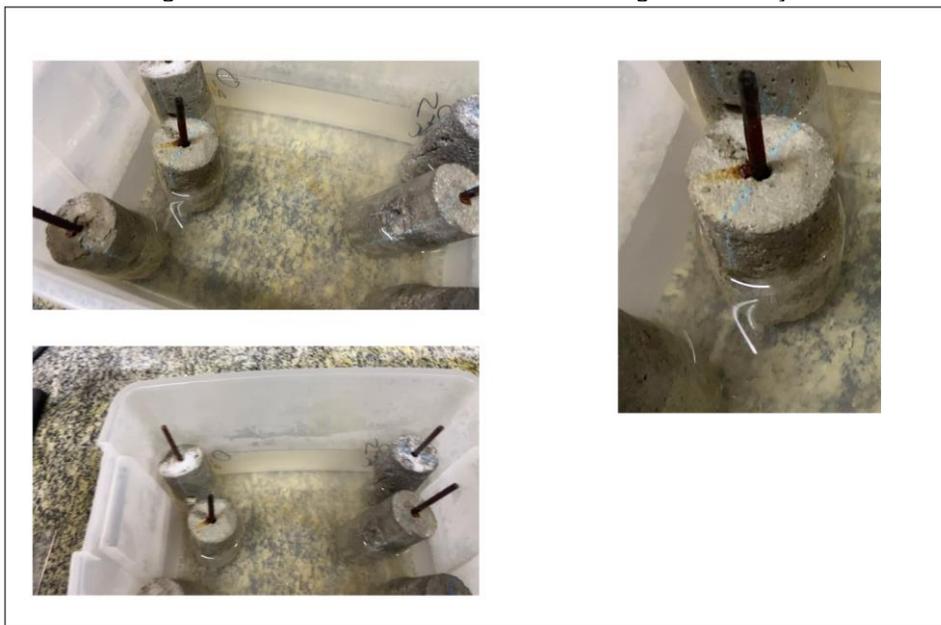
Figura 54 – Blocos contaminados por *Bacillus cereus* – segunda medição



Fonte: Autoria própria (2025).

Como observado na figura 55, na base das barras de aço existe, em alguns blocos, uma mancha de coloração amarronzada, demonstrando que, pela atmosfera criada a umidade lavou a camada de óxidos antes descamada na primeira medição.

Figura 55 - Blocos não contaminados - segunda medição



Fonte: Autoria própria (2025).

Outro fator observado nos blocos não contaminados, e não foi visto em mais nenhum outro, foi a formação de sal em cima dos blocos. Foi observado bastante descamação, demonstrando que a camada de óxidos, formada nas barras de aço nos blocos não contaminados, estava se desfazendo e o processo de corrosão estava avançando (Aoki; Cotting; Tiano, 2021).

4.3.3 Terceira medição

Como visto na análise dos parâmetros, após 24 dias, durante a terceira medição, o ambiente criado pela bactéria estava mais agressivo do que o ambiente do controle. Observe as condições dos blocos ao fim do experimento nas figuras 56 e 57.

Figura 56 - Blocos contaminados na terceira retirada



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 57 - Corpos de prova controle na terceira medição



Fonte: Autoria própria (2025).

O processo corrosivo continuou se intensificando tanto nos blocos contaminados, como também nos blocos controle. Porém, como visto anteriormente, nos ensaios biológicos o controle estava contaminado com *Bacillus subtilis*, principalmente os blocos de relação 0,4 a/c. Isso culminou numa atenuação da corrosão, se comparados com os blocos contaminados por *Bacillus cereus*.

5 CONCLUSÃO

Conforme a NBR 12655/2015, o ambiente formado dentro das caixas pode ser classificado como uma zona de alta agressividade, com grande risco de deterioração. Nessas condições, a norma estabelece que a relação água/cimento (a/c) não deve ultrapassar 0,45.

Os objetivos propostos pelo trabalho foram alcançados. Foi possível observar o comportamento da bactéria inserida no concreto e o processo de corrosão. Das observações provenientes das análises biológicas, fica claro que a bactéria consegue se desenvolver com mais facilidade nos blocos de relação 0,7 a/c e isso está ligada a maior quantidade de poros e maior presença de água; tendo assim mais susceptibilidade à contaminação.

Um fator importante é que a bactéria foi capaz de sobreviver e se desenvolver na faixa de pH do concreto, que fica entre 12 e 14. Pode-se dizer que esse crescimento também foi favorecido pelo pH do meio e pela alta presença de sais no ambiente.

Outro ponto importante que pôde ser observado foi que a bactéria tornou o ambiente mais agressivo. Esse fator contribuiu para que a corrosão se iniciasse de maneira mais rápida na caixa onde os blocos contaminados estavam. A agressividade ambiental acentuada na caixa contaminada por *Bacillus cereus* ficou ainda mais evidente ao final do experimento, onde a condutividade apresentou o valor de 183,4 mS/cm e a salinidade de 76 ‰ ficando acima do controle e da água do mar coletada.

Dessa forma, foi possível constatar que a corrosão se inicia primeiro nos blocos contaminados por *Bacillus cereus*, evidenciando assim o potencial corrosivo dessa bactéria. É válido destacar que no controle, só foi possível evidenciar a perda da camada de óxidos na segunda medição. No fim do experimento os blocos contaminados apresentaram maior grau de corrosão, se comparado com o controle.

Como visto no estudo, a caixa controle estava levemente contaminada por *Bacillus subtilis*, e nas amostras dos metais constatou-se que a contaminação estava maior nos blocos de relação 0,4 a/c. Isso culminou num tempo maior para se iniciar o processo corrosivo e num menor índice de corrosão ao final do experimento nos blocos dessa relação; que já possuem uma resistência maior à corrosão.

De fato, o potencial corrosivo apresentado por *Bacillus cereus* é alto. Isso pôde ser demonstrado tanto ao analisar os parâmetros como também ao comparar as imagens de cada medição. Por outro lado, pôde-se ver também a possibilidade de proteção das barras utilizando *Bacillus subtilis*, que por sua vez atenuou a corrosão.

7 REFERÊNCIAS

ALOTAIBI, Ghazay F.; BUKHARI, Mamdouh A. **Factors influencing bacterial biofilm formation and development.** Am. J. Biomed. Sci. Res, v. 12, n. 6, p. 617-626, 2021.

AOKI, Idalina Vieira; COTTING, Fernando; TIANO, Paulo Cezar Maziero. **Proteção anticorrosiva para estruturas de aço em atmosferas industriais e marinhas com sistema de tinta base aquosa acrílica.**

ASMA, Syeda Tasmia et al. **An overview of biofilm formation—combating strategies and mechanisms of action of antibiofilm agents.** Life, v. 12, n. 8, p. 1110, 2022.

BARBOSA, Juliana. **Biofilmes nas indústrias de alimentos: o que são e como se formam?** - Food Safety Brazil. 17 ago. 2020. Imagem. Disponível em: <https://foodsafetybrazil.org/biofilmes-o-que-sao-e-como-se-formam/>. Acesso em: 4 mar. 2025

CASCUDO, O. **Controle da Corrosão de Armaduras de Concreto**, 1ª. Ed., Editora PINI Ltda., S. Paulo, 1997.

COSTA, Felipe Lima et al. **Influência do uso de aditivo acelerador de resistência baseado em nitrato de cálcio no desempenho de argamassas de cimento Portland com adição de cinza volante.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, p. e12204, 2018.

COSTA, G. V. et al. **Caracterização do cluster gênico biossintético para produção do sideróforo petrobactina por *Bacillus cereus* SOL 105 isolado de sedimentos do Rio Solimões.** 2022.

DE SOUZA, Vicente Custodio Moreira; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** Pini, 1998.

DINH, Hang T. et al. **Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms.** Nature, v. 427, n. 6977, p. 829-832, 2004.

DONADIO, M.; CAPACHO, J.; SANTANDER, L. **Gestão Total da Corrosão. Análise documental.** Revista ALCONPAT, v. 13, n. 2, p. 235-253, 2023.

DOS SANTOS, Ellen et al. **Biocorrosão e o Biofouling—uma revisão de literatura.**

DOS SANTOS, Henrique Resende; LEITE, Darlan Ulhoa. **Análise da corrosão das estruturas de concreto armado através da resistividade elétrica: revisão de literatura.**

DROBNIEWSKI, Francis A. ***Bacillus cereus* and related species.** Clinical microbiology reviews, v. 6, n. 4, p. 324-338, 1993.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

ENGENHARIA, ASOPE. **Corrosão de armadura: o que causa e como amenizar esse dano?** 9 out. 2018. Imagem. Disponível em: <https://www.asope.com.br/single-post/2018/10/09/corrosao-de-armadura>. Acesso em: 28 fev. 2025.

FEBRAPDP - FEDERAÇÃO BRASILEIRA DO SISTEMA PLANTIO DIRETO. **Combinação de nano e biotecnologia traz avanços para o controle biológico na agricultura.** 3 abr. 2024. Imagem. Disponível em: <https://plantiodireto.org.br/combinacao-de-nano-e-biotecnologia-traz-avancos-para-o-controle-biologico-na-agricultura>. Acesso em: 6 mar. 2025.

HELENE, Paulo R. L. e FIGUEIREDO, A. **Corrosão de armaduras para concreto armado.** Revista Engenharia Mackenzie, v. 71, n. 180, p. 7-10, 1986Tradução . . Acesso em: 03 mar. 2025.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto de cimento Portland.** Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais, v. 2, p. 945-984, 2007.

HOLZMANN, Henrique Ajuz; DALLAMUTA, João (Org.). **Engenharia de materiais e metalúrgica: tudo à sua volta 2.** Ponta Grossa, PR: Atena, 2021., 2021.

HU, Yuting et al. **Microbiologically influenced corrosion of stainless steels by *Bacillus subtilis* via bidirectional extracellular electron transfer.** Corrosion Science, v. 207, p. 110608, 2022.

JOVANOVIC, Jelena et al. ***Bacillus cereus* food intoxication and toxicoinfection.** Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, v. 20, n. 4, p. 3719-3761, 2021.

JÚNIOR, Jefferson Alves da Costa et al. **Biotechnology: identification and evaluation of the *Bacillus cereus* amylolytic activity.** Research, Society and Development, v. 10, n. 13, p. e437101321301-e437101321301, 2021.

KALKOWSKI, Ingbert; CONRAD, Ralf. **Metabolism of nitric oxide in denitrifying *Pseudomonas aeruginosa* and nitrate-respiring *Bacillus cereus*.** FEMS microbiology letters, v. 82, n. 1, p. 107-111, 1991.

KRUG, Lucas Fernando et al. **PROCESSO DE CARBONATAÇÃO NO CONCRETO E MODELOS PARA SUA PREVISÃO: UMA REVISÃO.** Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão (ISSN: 2525-4782), v. 8, n. 2, 2023.

KULKOVA, Iryna et al. **Promoção do crescimento de plantas usando *Bacillus cereus*.** International Journal of Molecular Sciences , v. 24, n. 11, p. 9759, 2023.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

KUMAR, Murugan et al. **Thiobacillus**. In: **Beneficial microbes in agro-ecology**. Academic Press, 2020. p. 545-557.

LI, Jun et al. **Evidencing the uptake of electrons from X80 steel by Bacillus licheniformis with redox probe**, 5-cyano-2, 3-ditolyl tetrazolium chloride. *Corrosion Science*, v. 168, p. 108569, 2020.

LINCOLINS, Thiago. **Edifício Palace II: a tragédia na Barra da Tijuca**. 15 out. 2019. Disponível em: <https://aventurasnahistoria.com.br/noticias/reportagem/historia-palace-ii.phtml>. Acesso em: 1 mar. 2025

LIU, Bo et al. **Study of biofilm-influenced corrosion on X80 pipeline steel by a nitrate-reducing bacterium, *Bacillus cereus*, in artificial Beijing soil**. *Colloids and Surfaces B: biointerfaces*, v. 197, p. 111356, 2021.

LU, Cai-feng et al. **Effects of micro-environmental climate on the carbonation depth and the pH value in fly ash concrete**. *Journal of Cleaner Production*, v. 181, p. 309-317, 2018.

MARTINS, Debora Kelly Garcia. **Corrosão de armaduras em concreto armado**. *CONSTRUINDO*, v. 14, n. 2, 2022.

MASSARU WATANABE, Roberto. **Trincas causadas por infiltração e corrosão da armadura**. 26 jan. 2023. Disponível em: <https://robertowatanabe.com.br/trincas-causadas-por-infiltracao-e-corrosao-da-armadura/#:~:text=Pastilha-Z-,Quais%20os%20riscos%20da%20corrosão%20das%20armaduras?,especializado%20em%20estruturas%20de%20concreto>. Acesso em: 28 fev. 2025.

NEVES, Moises Balenga Jose; VAZQUEZ, Elaine Garrido. **Patologias das estruturas**. *Boletim do Gerenciamento*, v. 22, n. 22, p. 11-19, 2021.

NUNES, Priscila. **Patologias das construções: conheça os principais tipos** - Blog da Disponível em: <https://www.orcafascio.com/papodeengenheiro/patologias-das-construcoes>. Acesso em: 28 fev. 2025.

OLIVEIRA, Vinícius Freitas; DE SAENZ, Charlotte Cesty Borda. Fatores inibitórios do Quorum sensing e sua relação com o biofilme. *Atas de Ciências da Saúde (ISSN 2448-3753)*, v. 11, n. 4, 2023.

PARTHIPAN, Punniyakotti et al. **Biocorrosion and its impact on carbon steel API 5LX by *Bacillus subtilis* A1 and *Bacillus cereus* A4 isolated from Indian crude oil reservoir**. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, v. 3, p. 1-12, 2017.

Costa, I.V de L. Prospecção de corrosão microbiana em concreto...

PRIYOM, Sudipto Nath et al. **Efficacy of *Bacillus cereus* Bacteria in Improving Concrete Properties through Bio-precipitation.** Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, v. 47, n. 6, p. 3309-3320, 2023.

REYAD, Amany M.; MOKHTAR, Gehad. **Impact of the immobilized *Bacillus cereus* MG708176 on the characteristics of the bio-based self-healing concrete.** Scientific Reports, v. 13, n. 1, p. 500, 2023.

SOHAIL, Muazzam Ghous et al. **Bio self-healing concrete using MICP by an indigenous *Bacillus cereus* strain isolated from Qatari soil.** Construction and Building Materials, v. 328, p. 126943, 2022.

SOUSA, Emanuel Messias Silva de et al. **UTILIZAÇÃO DO CONCRETO PROTENDIDO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.** Revista Mangaio Acadêmico, v. 6, n. 1, p. 136-152, 2021.

SOUZA CALDAS, Iza Karla Rodrigues; DE SOUZA NOGUEIRA, Núbia Alves. **PATOLOGIA EM ESTRUTURAS: CORROSÃO NO CONCRETO ARMADO-ESTUDO DE CASO.**

VILAS-BÔAS, GT; PERUCA, APS; ARANTES, **OMN Biologia e taxonomia de *Bacillus cereus*, *Bacillus anthracis* e *Bacillus thuringiensis*.** Revista canadense de microbiologia , v. 53, n. 6, p. 673-687, 2007.

WAN, Hongxia et al. **Corrosion effect of *Bacillus cereus* on X80 pipeline steel in a Beijing soil environment.** Bioelectrochemistry, v. 121, p. 18-26, 2018.

WATANUKI, Milena Martinelli; GALLO, Cláudio Rosa. **Detecção de *Bacillus cereus* em leite e avaliação da germinação dos esporos após tratamento térmico.** Revista do Instituto Adolfo Lutz, v. 67, n. 3, p. 202-207, 2008.