



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DA BIORRECEPTIVIDADE DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO AO ATAQUE MICROBIOLÓGICO (ALGAS)**

ALICE MEDEIROS ROTA RIZZARDO

São Leopoldo, novembro de 2016.

ALICE MEDEIROS ROTA RIZZARDO

**ANÁLISE DA BIORRECEPTIVIDADE DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO AO ATAQUE MICROBIOLÓGICO (ALGAS)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Co-Orientador: Prof. Dr. Luís Fernando da Costa
Medina

Banca examinadora: Prof^a. Dra. Luciane Oliveira
Crossetti

Prof. Dr. Victor Hugo Valiati
Prof.^a Dr.^a Andrea Parisi Kern

São Leopoldo, novembro de 2016.

R627a Rizzardo, Alice Medeiros Rota
Análise da biorreceptividade de estruturas de concreto ao
ataque microbiológico (algas) / Alice Medeiros Rota Rizzardo.
– 2016.
98 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio
dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
São Leopoldo, RS, 2016.

“Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian”

1. Engenharia civil. 2. Biodeterioração. 3. Durabilidade.
4. Estrutura de concreto. 5. Biorreceptividade. Título.

CDU 624

A dissertação de mestrado

**"ANÁLISE DA BIORECEPTIVIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO AO ATAQUE
MICROBIOLÓGICO (ALGAS)"**

apresentada por **Alice Medeiros Rota Rizzardo**

foi julgada e aprovada como atendimento parcial aos requisitos para a obtenção do grau de

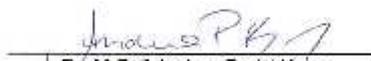
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL pe a seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian
Orientador e Presidente da Banca Examinadora
Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS



Prof. Dr. Luis Fernando da Costa Mecina
Coorientador
Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS



Prof.ª Dr.ª Andrea Parisi Kehr
Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS



Prof.ª Dr.ª Luciane Oliveira Crossetti
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS



Prof. Dr. Victor Hugo Valiati
Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

São Leopoldo, 1^o de novembro de 2016.

Dedico este trabalho a meu bebê Antônio

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Tecnológico de Desempenho e Construção Civil (itt Performance) da UNISINOS, pelo financiamento da pesquisa. À equipe do itt Performance pelo auxílio na elaboração do programa experimental, em especial à colega Fernanda e aos estagiários Betina e Alexandre.

Aos laboratoristas Júlio e Ingrid do Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da UNISINOS. Ao laboratorista Lauro do Laboratório de Laminação da Geologia da UNISINOS. Às laboratoristas do Laboratório de Biologia Molecular da UNISINOS e a estudante de graduação Noara.

Ao prof. Bernardo Tutikian e ao prof. Luis Medina, pela orientação e auxílio para a realização do trabalho.

Às colegas de mestrado Angélica, Fernanda, Giseli, Ilana, Jaqueline, Joana, Luísa e Suélen pela parceria e amizade durante todo o curso. Amizades para uma vida inteira.

A minha família. Aos meus irmãos, pelo carinho em todos os momentos. Ao meu marido, pela parceria e dedicação. Ao meu bebê Antônio, meu companheiro inseparável. E especialmente aos meus pais, que sempre colocaram a educação em primeiro lugar e me proporcionaram tantas oportunidades, sempre presentes e atentos a todas as minhas decisões.

Aos mestres de toda a minha formação, responsáveis por todo o meu conhecimento, atitude profissional e respeito pelo intelecto, em especial ao meu querido professor Sérgio Lund, que me apresentou ao mundo do tratamento e medidas profiláticas das enfermidades das edificações.

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

itt Performance – Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	24
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	<i>24</i>
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	<i>24</i>
1.2	ESTRUTURA DA PESQUISA	24
1.3	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	SUSTENTABILIDADE DO CONCRETO	27
2.2	BIODETERIORAÇÃO	31
2.2.1	<i>Microrganismos envolvidos na biodeterioração</i>	<i>32</i>
2.2.2	<i>Mecanismos de ação da biodeterioração</i>	<i>35</i>
2.2.3	<i>Classificação da biodeterioração</i>	<i>36</i>
2.2.4	<i>Biorreceptividade</i>	<i>38</i>
2.2.5	<i>Fatores que influenciam a ação dos microrganismos</i>	<i>40</i>
2.3	MÉTODOS DE ENSAIOS DE BIODETERIORAÇÃO	41
2.3.1	<i>Ensaio preconizado por Guillitte e Dreesen (1995)</i>	<i>44</i>
2.3.2	<i>Ensaio preconizado por Dubosc et al. (2001)</i>	<i>45</i>
2.3.3	<i>Ensaio preconizado por Shirakawa et al. (2003)</i>	<i>45</i>
2.3.4	<i>Ensaio preconizado por Barberousse et al. (2007)</i>	<i>46</i>
2.3.5	<i>Ensaio preconizado por Escadeillas et al. (2007)</i>	<i>47</i>
2.3.6	<i>Ensaio preconizado por Muynck et al. (2008)</i>	<i>49</i>
2.3.7	<i>Ensaio preconizado por Giannantonio et al. (2009)</i>	<i>50</i>
2.3.8	<i>Ensaio preconizado por Jayakumar e Saravanane (2009)</i>	<i>52</i>
2.3.9	<i>Ensaio preconizado por Wiktor et al. (2009)</i>	<i>52</i>
2.3.10	<i>Ensaio preconizado por Wiktor et al. (2011)</i>	<i>53</i>
2.3.11	<i>Ensaio preconizado por Tram et al. (2012)</i>	<i>54</i>
2.3.12	<i>Análise comparativa entre os ensaios</i>	<i>55</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	59
3.1.1	<i>Cimento</i>	<i>59</i>
3.1.2	<i>Agregado miúdo</i>	<i>60</i>
3.1.3	<i>Agregado graúdo</i>	<i>61</i>
3.2	AMOSTRA DE CONCRETO	62
3.2.1	<i>Concretagem</i>	<i>62</i>
3.2.2	<i>Moldagem</i>	<i>62</i>
3.2.3	<i>Tratamentos superficiais</i>	<i>63</i>
3.2.4	<i>Cura e carbonatação</i>	<i>64</i>
3.2.5	<i>Corte</i>	<i>65</i>
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	66
3.4	COLETA E CONDIÇÕES DE CULTIVO DOS MICRORGANISMOS	67
3.4.1	<i>Coleta de microrganismos</i>	<i>67</i>
3.4.2	<i>Tratamento e cultura dos microrganismos</i>	<i>68</i>
3.5	CÂMARAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO	69
3.6	ENSAIO ACELERADO DE BIODETERIORAÇÃO	71
3.6.1	<i>Esterilização dos materiais</i>	<i>71</i>
3.6.2	<i>Inoculação da amostra</i>	<i>72</i>
3.6.3	<i>Ensaio acelerado de biodeterioração</i>	<i>74</i>
3.6.4	<i>Análises da biodeterioração</i>	<i>76</i>
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	77
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	77
4.1.1	<i>Resistência à compressão</i>	<i>77</i>
4.1.2	<i>Frente de carbonatação</i>	<i>78</i>
4.1.3	<i>Resistência ao desgaste por abrasão</i>	<i>79</i>

4.2	BIODETERIORAÇÃO DO CONCRETO	81
4.2.1	<i>Projeto piloto</i>	81
4.2.2	<i>Decrescimento das algas por análise colorimétrica visual</i>	81
4.2.3	<i>Microrganismos viáveis detectados</i>	85
5	CONCLUSÃO	89
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio de biodeterioração.	44
Tabela 2 – Características do cimento.	60
Tabela 3 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.	61
Tabela 4 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.	61
Tabela 5 – Caracterização do concreto.	66
Tabela 6 – Localização dos corpos de prova dentro da câmara de ensaio.	75
Tabela 7 – Resistência à compressão.	77
Tabela 8 – Frente de carbonatação do traço A.	78
Tabela 9 – Frente de carbonatação do traço B.	78
Tabela 10 – Frente de carbonatação do traço C.	78
Tabela 11 – Resistência ao desgaste por abrasão.	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático do teste laboratorial realizado por Shirakawa et al. (2003).	46
Figura 2 – Vista frontal da configuração do ensaio laboratorial realizado por Barberousse et al. (2007).	47
Figura 3 – Dispositivo de trabalho realizado por Barberousse et al. (2007).	47
Figura 4 – Diagrama esquemático do sistema de umidificação realizado por Escadeillas et al. (2007).	48
Figura 5 – Diagrama esquemático do teste de escoamento realizado por Escadeillas et al. (2007).	49
Figura 6 – Representação esquemática de uma unidade da instalação modular projetada por Muynck et al. (2008).	50
Figura 7 – Instalação modular utilizada por Muynck et al. (2008).	50
Figura 8 – Diagrama esquemático da câmara de ensaio utilizada por Giannantonio et al. (2009).	52
Figura 9 – Instalação experimental para teste de biodeterioração dos trabalhos de Wiktor et al. (2009) e Wiktor et al. (2011).	54
Figura 10 – Granulometria do cimento.	60
Figura 11 – Curva granulométrica dos agregados.	61
Figura 12 – Fluxograma das variáveis.	62
Figura 13 – Formas dos corpos de prova.	63
Figura 14 – Tratamento superficial realizado com esponja.	63
Figura 15 – Tratamento superficial realizado com escova de aço.	64
Figura 16 – Tratamentos superficiais.	64
Figura 17 – Câmara de carbonatação.	65
Figura 18 – Corte dos corpos de prova.	66
Figura 19 – Câmara de crescimento.	68
Figura 20 – Planta baixa e corte da câmara de biodeterioração. Valores em metros.	70
Figura 21 – Ensaio de biodeterioração	71
Figura 22 – Autoclave da vermiculita.	71
Figura 23 – Esterilização dos corpos de prova.	72
Figura 24 – Secagem das amostras.	72
Figura 25 – Raspagem das algas.	73
Figura 26 – Dissolução das algas.	73
Figura 27 – Diluição e homogeneização das algas.	73
Figura 28 – Procedimento de contagem de células.	74
Figura 29 – Nível d'água.	75
Figura 30 – Resistência à compressão aos 7 dias.	77
Figura 31 – Frente de carbonatação.	79
Figura 32 – Medição da frente de carbonatação.	79
Figura 33 – Índice de desgaste por abrasão.	80
Figura 34 – Ensaio piloto.	81
Figura 35 – Presença de microrganismos.	82
Figura 36 – Traço C na semana 1.	82
Figura 37 – Traço C na semana 26.	83
Figura 38 – Presença de microrganismos.	84
Figura 39 – Semana 21.	85

Figura 40 – Imagem microscópica da amostra C1.	86
Figura 41 – Imagem microscópica da amostra C3.	86
Figura 42 – Microrganismos encontrados.	87

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

DNA – Ácido desoxirribonucleico, em inglês deoxyribonucleic acid.

NBR - denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

pH - escala para medida do potencial hidrogeniônico.

RbcL – gene exclusivo das plantas, presente no DNA de seus cloroplastos.

RESUMO

ROTA RIZZARDO, A.M. **Análise da biorreceptividade de estruturas de concreto ao ataque microbiológico (algas)**. São Leopoldo, ano. N. de folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2015.

A durabilidade de estruturas de concreto é assunto de interesse no contexto de sustentabilidade, pois a sustentabilidade das obras concluídas pode ser verificada por meio da análise da durabilidade dos seus materiais constituintes. A previsão de vida útil de um material poderá ser verificada estudando os seus mecanismos de degradação. Dentre os fatores de degradação do concreto, encontra-se a biodeterioração. Contudo, o ataque microbiológico ainda é um assunto pouco estudado na área de construção civil. A proposta deste trabalho foi verificar a biorreceptividade de concretos com diferentes relações água/cimento e diferentes acabamentos de superfícies ao desenvolvimento de algas a partir do desenvolvimento de um método de análise da biorreceptividade do concreto específico para este trabalho. O método consistiu em ensaio acelerado de biodeterioração em câmaras de ensaio com temperatura e iluminação controladas, alto teor de umidade e inoculação de alga coletada *in loco*. A análise permitiu verificar um decréscimo da mancha biológica nos corpos de prova de todas as variáveis. A diferença da velocidade do decréscimo da mancha biológica nas diferentes variáveis evidenciou a biorreceptividade dos materiais. Foi possível identificar uma tendência em que quanto maior a relação água/cimento, maior a biorreceptividade e quanto menor a rugosidade, menor a biorreceptividade. Assim, estes parâmetros poderão auxiliar na obtenção de concretos mais duráveis frente ao crescimento de algas.

Palavras-chave: biodeterioração; durabilidade; estrutura de concreto; biorreceptividade.

ABSTRACT

ROTA RIZZARDO, A.M. **Evaluation of the bioreceptivity of concrete structures facing biological attack (algae)**. São Leopoldo, ano. N.de folhas. Dissertação (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo. 2015.

The durability of concrete structures is subject of interest in the context of sustainability, since the sustainability of the edifications can be verified by analyzing the durability of their constituent materials. Among the factors degrading the concrete there is the biodeterioration. Nevertheless the microbiological attack is still a subject little studied in the construction area. The purpose of this was verify the bioreceptivity of concrete with different water / cement ratio and different surface finishing facing the development of algae from the development of a method of analysis of the concrete bioreceptivity specific to this work. The method consisted of accelerated test of biodeterioration in test chambers with temperature and lighting controlled, high humidity and inoculation of *Heterochlorellas luteoviridis*, algae collected *in loco* and identified in the laboratory. The analysis has shown a decrease of biological stains in the specimens of all variables. The difference of decrease rate of biological stain on different variables showed the materials bioreceptivity. It was possible the verification that the higher the water / cement ratio, the greater the biorreceptividade and in the same way the lower the roughness, the lower the biorreceptividade. Thus, these parameters could help in getting more durable concrete facing the growth of algae.

Key-words: biodeterioration; durability; concrete structure; bioreceptivity.

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade das edificações depende da vida útil da construção, ou seja, do período que ela irá durar. A durabilidade dos materiais construtivos tem, portanto, dimensão ambiental muito importante. De acordo com Mora (2007), construir obras com o intuito de durar mais tempo é quase uma obrigatoriedade dentro de um projeto. A ampliação da vida útil dos edifícios e componentes é uma forma efetiva de redução do impacto ambiental. É essencial que os materiais construtivos sejam capazes de suportar as condições para as quais foram projetados durante a vida dos elementos nos quais eles foram empregados.

Nenhum material é intrinsecamente durável uma vez que suas propriedades variam em decorrência da interação da sua estrutura, mais especificamente da sua microestrutura, com o meio ambiente. As variações decorrem ao longo do tempo e a vida útil de um determinado material é finalizada quando suas propriedades tornam seu uso inseguro ou antieconômico. Portanto, a discussão sobre o tema durabilidade e vida útil dos materiais necessita abordar requisitos e critérios de desempenho assim como fatores e mecanismos de degradação (ROQUE e MORENO JUNIOR, 2001). Dentre os mecanismos de degradação, encontra-se a biodeterioração. O desenvolvimento de manchas biológicas apresenta grande influência sobre a durabilidade dos materiais construtivos.

Atualmente, as exigências relativas à durabilidade das estruturas de concreto são cada vez mais rígidas. Estruturas de concreto devem ser projetadas cuidando-se da sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante toda a sua vida útil, nas condições ambientais em que é prevista. Nesse período, desde que sejam atendidos requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e construtor, a estrutura deve manter suas características físicas, químicas e estéticas.

As características do concreto utilizado são importantes para a durabilidade das estruturas. Para Neville e Brooks (2013), um bom concreto pode ser definido pelo desempenho satisfatório tanto em seu estado fresco, enquanto é transportado da betoneira até o lançamento nas fôrmas, quanto pelo seu desempenho no estado endurecido, durante toda a vida útil da estrutura. O desempenho do concreto no estado endurecido dependerá da durabilidade dos materiais constituintes.

Segundo Neville e Brooks (2013), nos materiais cimentícios a falta de durabilidade pode ser causada por agentes externos advindos do meio ou por agentes internos do material. Dentre os mecanismos de degradação do concreto, e consequente perda de

durabilidade, encontram-se fatores como resistência a ataques por íons cloretos, ataques por sulfatos, entre outros.

A durabilidade da estrutura de concreto é uma de suas propriedades mais importantes, pois é essencial que o concreto seja capaz de suportar as condições para as quais foi projetado durante a vida útil da estrutura (NEVILLE E BROOKS, 2013). Inclusive, a partir da publicação da NBR 15575:2013, o paradigma de durabilidade e vida útil do concreto no Brasil sofreu uma grande modificação, surgindo daí uma maior preocupação com a capacidade do concreto de resistir às intempéries e aos demais processos de degradação.

Considerando que o concreto aparente muitas vezes é utilizado como acabamento final, requisitos de durabilidade estética são acrescentados aos já considerados requisitos de durabilidade do concreto (ESCADEILLAS et al., 2007). Assim, o desenvolvimento de manchas biológicas apresenta grande influência sobre a durabilidade dos materiais de construção. De acordo com Escadeillas et al. (2007), o desenvolvimento de manchas biológicas sobre as superfícies externas das edificações, e particularmente sobre os elementos de concreto, pode levar rapidamente a considerável deterioração estética e também, a longo prazo, à degradação química e física da superfície do material.

A degradação mais danosa é devido a microrganismos tais como bactérias e fungos, que excretam ácidos orgânicos (SHIRAKAWA et al. apud ESCADEILLAS et al., 2007). Porém, a maior diminuição da durabilidade em superfícies de paredes externas, em particular em paredes de concreto, diz respeito à degradação estética. O desenvolvimento de microrganismos forma um biofilme em superfícies de materiais como o concreto e a pedra, que pode ter efeitos deletérios sobre a integridade estrutural e a aparência estética (DUBOSC et al., 2001). Biofilmes que provocam biodeterioração, desenvolvendo-se sobre essas superfícies podem acelerar a destruição de estruturas históricas, resultando na perda de símbolos nacionais da herança cultural (WARSCHEID e BRAAMS, 2000).

A corrosão da infraestrutura, incluindo edifícios, autoestradas e rede de esgotos, causada por microrganismos, representa uma perda econômica significativa sob forma de custos de manutenção e reparos (GU et al., 1998). Conforme Allsopp et al. (2004), a evidência dos custos reais envolvidos na biodeterioração encontra-se oculta, podendo estar incluída nos custos para prevenção, por meio do uso de medidas físicas ou químicas, tais como adição de biocidas; custos de substituição do material deteriorado, principalmente no caso de uso de materiais de baixa qualidade; custos de restauração, como no caso de materiais históricos onde não há possibilidade de substituição; e até mesmos custos devido a litígios

legais. Além de todos os problemas envolvidos em perdas econômicas, a exposição aos biofilmes que colonizam edificações é também preocupante para a saúde pública (SHIRAKAWA et al., 2003).

Os biofilmes encontrados sobre fachadas de edificações são principalmente manchas verdes, pretas ou vermelhas, dependendo da espécie biológica. Um dos principais organismos identificados são as algas verdes e cianobactérias, que são colonizadores primários e permitem o desenvolvimento de líquens, seguidos pelas briófitas, pteridófitas e espermatófitas (BARBEROUSSE, 2006; ORTEGA-CALVO et al., 1995; TOMASELLI et al., 2000). A ideia de que algas possam degradar a estrutura de construções é discutível, contudo, manchas devido à colonização por algas afetam a estética da fachada. A formação de biofilme representa uma importante perda econômica, devido aos custos de manutenção e reparo. Se fachadas colonizadas por algas não são tratadas, partículas do meio ambiente, como poeira, pólen, esporos, entre outras, podem ficar presas dentro da massa microbiana, originando complexas crostas e pátinas difíceis de ser eliminadas (SAIZ-JIMENEZ apud TRAM et al., 2012).

Uma vez que arquitetos atualmente utilizam cada vez mais o concreto para acabamento de superfícies de paredes externas, é necessário que os profissionais e clientes da indústria pensem seriamente no impacto da formulação e cálculo do material sobre a proliferação de microrganismos.

Diferentes tratamentos estão disponíveis no mercado para a prevenção da biodeterioração dos materiais cimentícios. Levando-se em conta que a biorreceptividade pode ser considerada como a capacidade de um material permitir a fixação e o desenvolvimento de microrganismos em sua superfície (FILLA et al., 2010), foram desenvolvidas estratégias objetivando a prevenção do surgimento de colônias de seres vivos pela diminuição da biorreceptividade do material. Dentre os diferentes tratamentos utilizados estão o uso de repelentes de água, o uso de biocidas ou ainda a aplicação desses dois tipos de produto combinados (URZÍ e DE LEO, 2007; MOREAU et al., apud DE MUYNCK et al., 2008). Ainda, já na própria preparação do material, a biorreceptividade pode ser influenciada pela relação água/cimento utilizada (DUBOSC et al., 2001), assim como pelo acabamento final da superfície. Todos os tratamentos apresentam efetividade quando aplicados levando-se em conta as particularidades do sistema no qual serão empregados.

A velocidade do processo de degradação dos materiais por ação de seres vivos é relacionada às variações de temperatura, umidade, nutrientes e iluminação, sendo muitas vezes um processo lento em condições naturais de exposição. A fim de verificar a efetividade

dos tratamentos utilizados para a diminuição da biorreceptividade, se faz necessário a utilização de testes acelerados de envelhecimento dos materiais por meio da colonização por seres vivos. Para esta verificação têm sido desenvolvidos métodos de ensaio acelerado de biodeterioração, com materiais cimentícios servindo como um dos objetos de estudo.

Em vista disso, é importante a verificação da durabilidade do concreto frente ao ataque microbiológico. A literatura mostra que as primeiras manchas visíveis correspondem a um crescimento de algas, organismos autotróficos, sendo ainda elas as principais responsáveis pela deterioração estética. Dessa forma, o ponto de partida para o estudo da durabilidade das estruturas de concreto frente ao ataque microbiológico é a verificação da biorreceptividade do material à proliferação de algas por meio de um ensaio acelerado para o envelhecimento do concreto pela da colonização de seres vivos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a biorreceptividade das estruturas de concreto com diferentes relações água/aglomerante e diferentes acabamentos superficiais ao desenvolvimento de algas.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- avaliar a proliferação de algas na superfície do concreto;
- desenvolver um método de ensaio acelerado de biodeterioração com inoculação de algas;
- verificar a proliferação de algas na superfície do concreto, comparando a intensidade de proliferação por mancha biológica em concretos com relação água/cimento (a/c) distintas;
- verificar a proliferação de algas na superfície do concreto, comparando a intensidade de proliferação por mancha biológica em concretos submetidos a diferentes tratamentos superficiais.

1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo, na introdução foi descrito o panorama atual da biodeterioração dos materiais de construção civil, a

justificativa para a realização do trabalho e os objetivos. Também foi apresentada a estrutura da pesquisa e as delimitações do trabalho.

O segundo capítulo consistiu na revisão bibliográfica e abordou a biodeterioração dos materiais cimentícios, sendo apresentados os principais métodos de ensaio de biodeterioração em materiais cimentícios. No terceiro capítulo foi apresentado o método de pesquisa utilizado e demonstrado o delineamento da pesquisa, assim como descrita a realização das etapas de pesquisa. O quarto capítulo apresentou, analisou e discutiu os resultados obtidos na realização do estudo.

O quinto capítulo apresentou a conclusão da pesquisa e observações quanto a estudos futuros necessários na área para aprimorar a avaliação da durabilidade do concreto frente ao ataque de microrganismos.

1.3 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O trabalho utilizou como objeto de investigação para a biodeterioração de materiais cimentícios o concreto convencional e uma espécie de microrganismo.

A escolha baseou-se no fato de que o concreto é o material menos estudado em ensaios de biodeterioração. Como as amostras de concreto são maiores que as amostras das maiorias dos ensaios de biodeterioração de materiais cimentícios, como argamassas e pasta de cimento, o ensaio exigiu maior espaço físico. Esta exigência de espaço foi um fator limitante para a escolha de variações do concreto, tendo sido estudados concretos com três relações água/cimento e três tratamentos superficiais.

Ainda, um dos motivos pela escolha da algas é o tempo de resposta dos ensaios com estes microrganismos. Estes são os primeiros microrganismos envolvidos em um processo de biodeterioração e, sendo assim, os resultados puderam ser analisados em um espaço de tempo reduzido, coerente com o prazo determinado para o trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considerando as atuais demandas com relação ao desempenho e durabilidade dos materiais de construção, tem se procurado estudar os fatores que causam a diminuição da vida útil dos materiais de construção. A biodeterioração, manifestada principalmente por meio de manchas causadas pela formação de biofilmes, é um fenômeno cujo aparecimento depende, entre outros fatores, da biorreceptividade do material. O estudo das propriedades dos materiais a base de cimento que influenciam a biorreceptividade, bem como o desenvolvimento de métodos de ensaio adequados, é essencial para a obtenção de materiais de maior durabilidade e alto desempenho. Diversos pesquisadores têm se dedicado ao tema biodeterioração de materiais cimentícios, porém ainda existem muitas questões a serem respondidas e o aprimoramento dos ensaios para a maior compreensão desse fenômeno é de fundamental importância.

A revisão bibliográfica realizada para este estudo objetivou auxiliar o entendimento dos fatores que influenciam na sustentabilidade do concreto e da biodeterioração. Ainda, foram apresentados métodos de ensaio de biodeterioração de materiais cimentícios preconizados por outros autores que apresentam relevância científica para a definição de um método de análise da biorreceptividade de concreto frente à proliferação de algas.

Como o tema desta pesquisa é relativamente novo, sendo que os primeiros trabalhos que abordam o assunto de biodeterioração do concreto datam da década de 1940 (PARKER apud SHIRAKAWA 1994) e os primeiros estudos descrevendo métodos de ensaio datam da década de 1990 (GUILLITTE e DREESEN, 1995), optou-se por utilizar referenciais teóricos originais, buscando citar as fontes originais, de conteúdo atual, quando não encontrada referência recente, visando não desqualificar e nem comprometer o tema abordado na presente pesquisa.

2.1 SUSTENTABILIDADE DO CONCRETO

A palavra sustentabilidade tem várias definições, mas a maioria concorda que ser sustentável implica em produzir bens com a menor carga ambiental, de forma a preservar o ambiente de degenerações futuras. Embora a expressão "construção sustentável" esteja sendo cada vez mais utilizada, é necessário distinguir entre a sustentabilidade da atividade de construção e a sustentabilidade das obras construídas. A sustentabilidade das obras concluídas pode ser obtida com a construção de obras com o intuito de durar mais tempo.

A durabilidade, expressa pela distribuição de vida útil de um conjunto de componentes, desempenha uma função importante para a obtenção de uma construção sustentável, finalidade importante de qualquer projeto bem engendrado (JOHN apud ROQUE e MORENO JUNIOR, 2005). A durabilidade e a previsão de vida útil têm dimensões ambientais muito importantes, sendo, inclusive, em alguns idiomas, como alemão, finlandês, romeno e francês, construção sustentável traduzida como construção durável.

Os erros de projeto, juntamente com a utilização de materiais inadequados, representam uma parcela relativamente grande das causas de manifestações patológicas e consequente diminuição da durabilidade. Para que possam ser elaboradas especificações adequadas, torna-se imprescindível conhecer o comportamento dos materiais que compõem a estrutura quando submetidas às várias condições de exposição. É importante, por exemplo, a avaliação do nível de agressividade do meio ambiente, aspecto de extrema relevância para a escolha dos materiais (ROQUE e MORENO JUNIOR, 2005).

Inicialmente, os estudos de durabilidade foram motivados pela necessidade de avaliação do desempenho econômico de diferentes produtos bem como de planejamento da manutenção. Com o paradigma do desenvolvimento sustentável, a durabilidade ganhou uma nova dimensão, pois a ampliação da vida útil dos edifícios e componentes é uma forma efetiva de redução do impacto ambiental e desse modo as pesquisas na área ganharam novo impulso. A durabilidade depende muito mais de conhecimento do que de recursos. Muitas vezes na fase de produção do componente é que se causa a maior carga ambiental e a vida útil pode ser aumentada ou diminuída sem afetar proporcionalmente as cargas ambientais (JOHN apud ROQUE e MORENO JUNIOR, 2005).

O desempenho dos materiais de construção quanto à durabilidade é de grande importância, sendo o concreto com frequência considerado como inerentemente durável devido à sua resistência física e mecânica a diversos tipos de ambientes e à sua estabilidade dimensional. Estruturas de concreto são presumidas como sendo livres de manutenção e providas de longa vida útil. Porém essa presunção não é válida em todos os ambientes e deve ser dada atenção especial às condições de uso para que se assegure um alto nível de desempenho ao longo do tempo (MACKECHNIE e ALEXANDER, 2009).

De acordo com Bai (2009), a durabilidade do concreto é definida como sua capacidade de resistir aos processos de deterioração que podem ocorrer como resultado da ação do intemperismo (interação com o meio ambiente externo), ou reações que podem ocorrer entre os materiais constituintes ou com os contaminantes internos presentes. A

deterioração é principalmente o resultado de fenômenos físicos, como trincas, congelamento, atrito ou fogo, ou químicos, como penetração de fluidos, gases e íons agressivos, como, por exemplo, sulfato, ácido e água do mar, ocorrentes na parte interna ou na superfície do concreto.

A construção civil é o setor que mais consome material em todas as sociedades, além de uma quantidade significativa de energia, ocasionando elevadas cargas ambientais. Adicionalmente, recursos de manutenção, desmobilização e demolição são consumidos após a etapa de construção do ambiente. Em função disso, o setor é também responsável pelo consumo de parte significativa de água e pela geração de poluentes. Deve-se igualmente lembrar que a construção e a demolição são uma grande fonte de resíduos.

A engenharia estrutural sustentável segue o princípio básico de que o consumo de energia e de recursos decorrentes da construção e operação de uma estrutura deve ser minimizado. Com relação às estruturas de concreto esse princípio pode ser seguido por meio do uso do material na forma mais eficiente considerando sua resistência e durabilidade dentro da vida útil da estrutura (MÜLLER et al., 2014a).

Infelizmente, os efeitos da baixa durabilidade não se manifestam de imediato, como é o caso da falta de resistência mecânica. Isto interpõe uma maior necessidade de adequação dos projetistas às exigências dos dispositivos relativos à durabilidade e vida útil das estruturas, pois é possível aumentar a vida útil sem aumentar o impacto ambiental durante a fase de produção (ROQUE e MORENO JUNIOR, 2005).

A compreensão da microestrutura do concreto e dos potenciais mecanismos de deterioração possibilita desenvolver praticamente qualquer nível de desempenho quanto à durabilidade. O aumento da vida útil das edificações através do aumento da durabilidade possui claras vantagens em termos de otimização de recursos e redução de dejetos, aumentando, dessa forma, a eficiência. Outras vantagens associadas à elevação da durabilidade incluem a melhoria do desempenho estrutural e redução da mão-de-obra (MACKECHNIE e ALEXANDER, 2009).

Mais do que qualquer outra indústria, a da construção é afetada pelo atual debate sobre sustentabilidade. Isso se deve, principalmente, ao impacto ambiental significativo associado à produção de materiais construtivos, construção de edificações e estruturas e o uso subsequente dessas estruturas. Esse fato é especialmente verdadeiro para estruturas feitas de concreto, uma vez que a produção desse material - nesse caso especialmente a produção de

cimento - exige muita energia e causa grandes emissões de dióxido de carbono (CO₂). A redução do impacto ambiental durante a produção de concreto sem considerar, contudo, o impacto sobre o desempenho e durabilidade do material, não bastaria, uma vez que o ciclo de vida exigido para estruturas varia entre de 50 a 100 anos, estendendo o impacto ambiental por longo período. O aumento da sustentabilidade exige, portanto, uma redução do impacto ambiental associado aos processos de construção, manutenção e operação (MÜLLER et al, 2014b).

Há três abordagens clássicas para que se faça um uso sustentável do concreto: (1) a otimização da composição do concreto, tendo em vista seu impacto ambiental, mantendo, ao mesmo tempo, um ciclo de vida e um desempenho igual ou melhor; (2) a melhoria do desempenho do concreto, com ciclo de vida e impacto ambiental iguais; (3) a otimização do ciclo de vida do material construtivo e das estruturas da edificação, com impacto ambiental e desempenho iguais (MÜLLER et al., 2014b).

Há muitas formas de reduzir a pegada de carbono do concreto incluindo a redução no conteúdo de cimento Portland, por meio de: (a) otimização das graduações de agregados; (b) uso de produtos na mistura que reduzam o consumo de água; (c) clinker com adição calcária, e; (d) uso de materiais cimentícios suplementares. Contudo, a maneira mais efetiva de aumentar a sustentabilidade de estruturas de concreto é fazê-las durar mais por meio de um projeto voltado para durabilidade, e pela minimização dos defeitos construtivos. Em quase todos os casos, concretos duráveis irão apresentar todos os aspectos listados acima, mas, a partir de uma abordagem de projeto, a ênfase deve ser na durabilidade. Projetar para durabilidade inclui mais do que a seleção dos materiais do concreto e das proporções da mistura. Exige o detalhamento da construção, controle de temperatura, adequada compactação, proteção do concreto fresco, e cura, detalhados na especificação e que sejam conduzidas inspeções e testes para assegurar que as especificações estejam sendo seguidas (HOOTON e BICKLEY, 2014).

Além da modificação nos materiais da mistura para reduzir o componente cimento Portland no concreto, a construção de estruturas duráveis apresenta um maior impacto na melhoria da sustentabilidade uma vez que o tempo para reabilitação e substituição pode ser estendido (HOOTON e BICKLEY, 2014).

A durabilidade não é uma qualidade intrínseca de um material. Mudanças nos detalhes de projeto que proporcionem maior proteção ao componente contra os fatores de

degradação podem aumentar a sua vida útil sem alterar significativamente a carga ambiental total (JOHN apud ROQUE e MORENO JÚNIOR, 2005).

2.2 BIODETERIORAÇÃO

Por definição, a biodeterioração é a mudança indesejável nas propriedades de um material, devido à ação de microrganismos. Os fenômenos de biodeterioração podem ocorrer em qualquer obra, dependendo de uma interação das diversas variáveis: existência de água, nutrientes, temperatura adequada e tempo de exposição (SANTOS, 2003). No concreto, os microrganismos podem atuar sobre o material em ações deletérias na pasta de cimento e nos agregados, interferindo na estética, reduzindo a durabilidade e comprometendo a integridade (LAPA, 2008; HALLIDAY, 2008).

É importante a distinção entre dois conceitos: biodegradação e biodeterioração. De acordo com Allsopp et al. (2004), o termo biodeterioração está em uso há mais de 40 anos, possui um sentido negativo e refere-se a interações indesejadas e destrutivas entre microrganismos, ou mesmo macrorganismos, e diversos materiais, como metais, vidro, madeira, plástico, concreto, argamassas, óleos e combustíveis, entre outros. Já o termo biodegradação refere-se a uma ação positiva de microrganismos sobre diversos materiais potencialmente poluidores lançados no meio ambiente, os quais são degradados e o meio ambiente regenerado. No presente trabalho será utilizado o termo biodeterioração. Entretanto, alguns autores, como Cwalina (2008), preferem utilizar o termo biodegradação referindo-se aos aspectos negativos das ações dos microrganismos sobre o material.

Os microrganismos que causam deterioração formam comunidades específicas que interagem de muitas maneiras diferentes com os materiais minerais e o ambiente externo. Este fenômeno complexo ocorre em conjunção com muitos processos físicos e químicos destrutivos, sendo difícil distinguir a extensão dos danos causados por fatores bióticos daqueles resultantes de fatores abióticos (CWALINA, 2008).

Além dos microrganismos, outra forma comum de ataque biológico é o crescimento de raízes de plantas, algas e líquens em fendas ou zonas porosas do concreto, originando forças expansivas que o degradam mecanicamente, facilitando o transporte de outros agentes agressivos para seu interior. Contudo, a ação dos organismos vivos pode, em algumas situações, ser benéfica como, por exemplo, no caso de estruturas marinhas subaquáticas em que as plantas e cracas que se desenvolvem nas superfícies do concreto

consomem o oxigênio antes que ele possa penetrar no elemento, inibindo o processo de oxidação das armaduras (LAPA, 2008).

2.2.1 Microrganismos envolvidos na biodeterioração

Os principais microrganismos envolvidos nos mecanismos da biodeterioração do concreto são as bactérias, algas, fungos, líquens e musgos. A deterioração provocada pelos microrganismos está relacionada com seu crescimento e reprodução, fixação e processo metabólico.

As bactérias são um dos microrganismos pioneiros na colonização de todos os materiais, formando biofilmes invisíveis, os quais não são responsáveis pela descoloração observada, porém podem degradar a mistura. As algas, por sua vez, são microrganismos que não necessitam de um suprimento orgânico para sua síntese, são organismos autotróficos e podem desenvolver-se sobre materiais exclusivamente minerais, como o concreto, desde que a umidade seja suficiente. Dessa forma, também poderão ser pioneiras em um processo de biodeterioração, sendo normalmente os primeiros microrganismos visíveis (ESCADEILLAS et al., 2007). Manchas de coloração preta, verde ou vermelha, dependendo da espécie, formam-se nos locais de escoamento de água (*run-off*). Já os fungos são microrganismos que precisam de um constante suprimento orgânico, geralmente fornecido pelo substrato (organismos heterotróficos), e, teoricamente, não podem ser organismos pioneiros. Os fungos são encontrados tanto sobre substratos orgânicos, como a tinta, degradados por seus ácidos orgânicos metabólicos; como sobre organismos vivos ou mortos. São necessários altos teores de umidade para seu desenvolvimento. Por fim, os líquens e musgos, sendo os líquens resultantes da simbiose entre um fungo e uma alga, com o fungo fornecendo a umidade para a alga que, por sua vez, fornece materiais orgânicos ao fungo. Os musgos, classificados como vegetais inferiores, formam-se sobre uma camada biológica de algas de vários anos de idade.

2.2.1.1 Biodeterioração causada por algas

Na literatura existem vários relatos de biodeterioração em concreto causada por algas. Whitely apud Escadeillas et al. (2007) observou na Inglaterra manchas avermelhadas compostas por algas microscópicas (clorofilácea *Trentepohlia*) e as relacionou com alta umidade. Tanto Wee et al., na Ásia, como Robic na França, apud Escadeillas (2007), identificaram sobre concreto algas microscópicas clorofiláceas, formando manchas avermelhadas; e cianobactérias, formando manchas pretas. Os mesmos gêneros são encontrados em todos os continentes e sobre outros tipos de substratos minerais, como pedra

ou tijolo, porém sempre em condições de alta umidade. Os gêneros encontrados são, principalmente, *Phormidium*, *Gloeocapsa*, *Chroococcus*, *Lyngbya* e *Anabaena* para cianobactérias; e *Chlorhormidium*, *Trentepohlia* e *Chlorella* para clorofiláceas. Existem duas similaridades entre esses gêneros: ambas contêm clorofila, permitindo que ocorra a fotossíntese para fornecimento de energia, e ambas apresentam altos teores de umidade.

As cianobactérias, também chamadas de algas verde-azuladas, são responsáveis pelas manchas pretas e possuem características que as tornam capazes de colonizar as superfícies de paredes de concreto. Elas possuem pigmentos azuis e vermelhos, que possibilitam que explorem intensidades luminosas muito baixas e as protejam da radiação solar intensa, além de apresentarem uma membrana mucilaginosa higroscópica, que retém água da chuva ou umidade do ambiente, graças aos minerais que contém. Essa membrana é uma proteção contra a dessecação em períodos de seca. Já as clorofiláceas, de coloração verde, não apresentam pigmentos acessórios ou a mucilagem protetora e podem viver apenas em ambientes com umidade constante e luminosidade adequada, mas não intensa demais. Sob tais condições favoráveis, podem se desenvolver rapidamente fazendo com que uma parede fique verde em poucos dias (ESCADEILLAS et al., 2007).

As algas podem ser transportadas pelo vento, o que resulta em sua disseminação para diferentes superfícies, podendo ser depositadas em fachadas ou sobre superfícies planas da estrutura das edificações. Como frequentemente se observa faixas coloridas nas fachadas, pode-se deduzir que durante as chuvas a água carrega algas ao longo das fachadas. Diferentes esquemas são propostos para explicar esse fenômeno nas fachadas: as algas podem ficar na água, podem ser retidas nas cavidades criadas pela rugosidade do material ou podem ser absorvidas pelo material à medida que ocorre a absorção da água. O seu crescimento resulta em manchas coloridas seguindo o percurso da corrente de água. Os testes de escoamento de água (*run-off*) reproduzem as condições de colonização nos materiais da fachada produzindo um fluxo contínuo de microrganismos em cultura sobre a superfície desses materiais. Esse método tem passado por estudos das características dos materiais que favorecem o crescimento de algas (BARBEROUSSE et al., 2007).

2.2.1.2 **Biodeterioração causada por fungos**

Os fungos estão entre os organismos mais prejudiciais associados à biodeterioração de materiais orgânicos e inorgânicos. De acordo com Urzı et al. (2007), sua ocorrência sobre as pedras provoca não somente danos estéticos nos monumentos, devido a

mudanças de coloração e surgimento de manchas pretas, como também existe forte evidência de que esses organismos possam colonizar rachaduras mais profundas, causando lesões em forma de crateras, além de poderem lascas e esfoliar a superfície da pedra, causando perda de material.

Enquanto diversos grupos de bactérias e fungos são capazes de formar biofilme sobre superfícies de concreto, considera-se que a descoloração de estruturas é em sua maior parte devida aos fungos (GAYLARDE e MORTON apud GIANNANTONIO et al., 2009). Durante seu desenvolvimento, alguns fungos produzem pigmentos, como a melanina, responsáveis pelo aparecimento de manchas escuras características de biofilme em concreto (WARSCHEID e BRAAMS, 2000; STERFLINGER, 2000). Numerosos fungos têm sido implicados na formação de biofilme, incluindo *Cladosporium* spp., nas argamassas interiores de edificações (SHIRAKAWA et al., 2003), e os gêneros *Alternaria*, *Aspergillus*, *Epicoccum*, *Mucor*, *Penicillium* e *Trichoderma* sobre outras superfícies de concreto e de pedra (GAYLARDE e MORTON apud GIANNANTONIO et al., 2009; MITCHELL e GU, 2000). Os fungos são frequentemente considerados colonizadores secundários, sucedendo comunidades autotróficas primárias (GAYLARDE e MORTON apud GIANNANTONIO et al., 2009; WARSCHEID e BRAAMS, 2000). Contudo, fungos heterotróficos podem também ser capazes de colonização primária se fontes adequadas exógenas de carbono estiverem disponíveis na poeira, no escoamento de águas da chuva ou na poluição atmosférica causada pelos veículos (WARSCHEID et al., 1991; WARSCHEID e BRAAMS, 2000). Alguns fungos podem ser capazes de utilizar o carbono derivado das coberturas da superfície, incluindo tinta (SHIRAKAWA et al., 2003). Além da descoloração visível, fungos também podem apresentar outros efeitos deletérios sobre as superfícies de concreto e pedra (GU et al., 1998; GAYLARDE e MORTON apud GIANNANTONIO et al., 2009). Vários gêneros, incluindo *Alternaria*, *Fusarium*, *Penicillium* e *Trichoderma*, produzem ácidos orgânicos, tais como os ácidos acético, glicurônico e oxálico como produtos secundários do seu metabolismo (STERFLINGER, 2000). A excreção desses ácidos biogênicos pode danificar o concreto por meio da formação de complexos insolúveis de cálcio, que precipitam da estrutura, resultando na perda de massa e aumento da permeabilidade e porosidade (GU et al., 1998). Há relatos dos fungos *Fusarium* sp. e *Penicillium* terem causado deterioração em concreto e pedra, respectivamente, por meio desse processo. Além da produção de ácidos orgânicos, fungos tais como *Fusarium* sp. podem danificar concreto e pedra por meios físicos, particularmente pela penetração de hifas na superfície do material (GAYLARDE e MORTON et al. apud GIANNANTONIO et al., 2009).

2.2.1.3 **Biodeterioração causada por bactérias**

Conforme Shirakawa (1994), entre as bactérias envolvidas no processo de biodeterioração, encontram-se as bactérias redutoras de sulfato (BRS), anaeróbias, e as sulfoxidantes. Entre as bactérias aeróbias sulfoxidantes, encontram-se aquelas pertencentes ao gênero *Thiobacillus*, cuja energia para o seu metabolismo é obtida a partir da oxidação de um ou mais compostos reduzidos de enxofre, incluindo sulfetos, enxofre elementar, tiosulfato e tiocianato. O sulfato geralmente é o produto final, mas podem formar, transitoriamente, enxofre, sulfitos e politionatos. As espécies do gênero *Thiobacillus* são capazes de realizar o crescimento autotrófico; algumas são quimiolitotróficas obrigatórias, enquanto outras são capazes de crescer também quimiorganotroficamente. O gênero inclui espécies aeróbias obrigatórias e anaeróbias facultativas denitrificantes.

De acordo com Shirakawa (1994), apesar de várias espécies de microrganismos aeróbios e anaeróbios poderem estar envolvidos no processo de biodeterioração do concreto, as bactérias do gênero *Thiobacillus* apresentam-se como as mais agressivas, por produzirem ácido sulfúrico como produto final resultante da oxidação de um ou mais compostos reduzidos de enxofre inorgânico. O ácido sulfúrico produzido pelo *Thiobacillus* sp. reage com o hidróxido de cálcio presente no concreto para formar gipsita e etringita.

2.2.2 **Mecanismos de ação da biodeterioração**

Cwalina (2008) considera que a biodegradabilidade de diversos materiais minerais de construção, incluindo o concreto, ocorra principalmente devido ao aumento da concentração dos carbonatos e compostos inorgânicos sulfurados, bem como de outros reagentes quimicamente agressivos de natureza abiótica ou biótica. Suas interações com componentes dos materiais minerais desempenham um papel essencial na indução e continuação do processo de corrosão microbiológica.

A atividade metabólica, e conseqüente crescimento intensivo dos microrganismos, causam liberação no meio ambiente de substâncias biogênicas e ácidos, bem como de sulfeto de hidrogênio e outros reagentes corrosivos, que agem sobre diferentes materiais de construção, incluindo os materiais a base de cimento. Os microrganismos podem estar presentes sobre a superfície, em clivagens e fissuras, dentro do material ou nos espaços intersticiais, sendo que sua interação com o material e o meio ambiente pode ocasionar a biodeterioração. Os efeitos do metabolismo microbiano são primariamente de natureza química, porém, podem influenciar processos físicos. Muitos tipos de microrganismos podem

estar envolvidos nos casos de biodeterioração, agindo separadamente ou conjuntamente, em interações complexas (CWALINA, 2008).

Alguns ácidos orgânicos biogênicos, como os ácidos acético, láctico, butírico e similares, bem como o dióxido de carbono, produzidos por vários microrganismos, são extremamente corrosivos para o concreto. Muito corrosivos são também os ácidos minerais biogênicos, especialmente o ácido nítrico, produzido por bactérias nitrificadoras, bem como o ácido sulfúrico, produzido pelas bactérias sulfuroxidativas. Todas essas substâncias químicas de origem biológica reagem facilmente com componentes dos concretos e argamassas e podem causar sua deterioração. A desintegração da matriz do concreto através da ação de reagentes corrosivos biogênicos é mais intensa em comparação à aplicação de substâncias corrosivas na superfície da estrutura. Além disso, a velocidade do ataque é difícil de ser prevista, uma vez que vários microrganismos indicam diferentes atividades metabólicas. A produção contínua de metabólitos microbianos no local do ataque causa maior intensificação e, dessa forma, os microrganismos agem como pontos de fontes primárias para um suprimento de agentes corrosivos (CWALINA, 2008). Geralmente são observados como efeitos primários da biodeterioração do concreto, devido ao ataque ácido, uma maior umidade e acidez do concreto, bem como uma diminuição simultânea nas resistências do material à compressão e à flexão (CWALINA, 2008).

Conforme Wei et al. (2010), a deterioração do concreto induzida por microrganismos nos sistemas de esgotos é o exemplo mais estudado de deterioração biogênica. O pH do concreto não deteriorado é de, aproximadamente, 12 e pouca atividade microbiana ocorre em pH tão alto. Contudo, o pH alcalino da superfície do material é gradualmente reduzido, através da carbonatação e neutralização do ácido sulfídrico, que é potencializado nos sistemas de esgoto. Quando o pH se aproxima da neutralidade, diferentes *Thiobacillus* sp. aeróbicos e autotróficos colonizam a superfície do material e contribuem para reações que levam à formação de ácido sulfúrico, que causa a corrosão dos materiais cimentícios.

2.2.3 Classificação da biodeterioração

De acordo com Lapa (2008) e Halliday (2008), a biodeterioração pode ser classificada em quatro categorias: física ou mecânica, estética, química assimilatória e química não assimilatória. Os mecanismos podem ocorrer de forma separada ou simultaneamente. A biodeterioração física ou mecânica é o rompimento do material devido à pressão exercida na superfície pelo microrganismo durante seu crescimento ou locomoção. A

biodeterioração estética é causada pela presença de microrganismos que interferem na aparência do concreto, mudando sua cor e/ou manchando-o, muitas vezes de forma inaceitável. A biodeterioração química assimilatória ocorre quando o material, constituído de nutrientes para os microrganismos, tem sua microestrutura alterada, apresentando déficit de compostos essenciais para sua integridade. A biodeterioração química não assimilatória é a resultante da ação dos produtos metabólicos sobre os constituintes do material, formando compostos prejudiciais à sua integridade.

Outra forma de classificação da biodeterioração é a elaborada por Sand e Bock apud Shirakawa (1994), que classificaram os mecanismos de ação da biodeterioração de acordo as seguintes características principais: formação de biofilme e acúmulo de água; tensão provocada pela cristalização de sais; complexação; e ataque ácido.

Os biofilmes são ecossistemas microbianos de consistência gelatinosa, apresentando-se em forma de película na presença de água ou umidade. Depois de estabelecido, o biofilme pode proporcionar a fixação de outros microrganismos e adesão de outras partículas, bem como se destacar da superfície, criando microambientes com concentrações de pH e oxigênio diferenciados, levando à formação de manchas e pátinas biológicas características da biodeterioração estética, que desvaloriza o material (LAPA, 2008; SANTOS, 2003; PINHEIRO e SILVA, 2004). O biofilme pode funcionar como camada impermeabilizante que, se por um lado impede a penetração de água no seu interior, por outro, impede o fluxo inverso, fazendo com que os sais, cristalizados no seu interior, acelerem a deterioração do material por expansão (LAPA, 2008). Podem também ser formadas microcolônias nos poros dos materiais que, retendo água em sua estrutura, em condições de ciclagem térmica, podem aumentar o volume dos poros causando biodeterioração (SAND e BOCK apud SHIRAKAWA, 1994).

Na biodeterioração por tensão de sais, os ácidos são convertidos a sais por reações químicas com a matriz mineral suscetível. Sob condições de baixa umidade, a água evapora, resultando em aumento da concentração de sais. Estes sais acumulam-se sob a superfície dos materiais, causando um estado de tensão que resulta em esfoliação da camada superficial. Este tipo de ataque é fracamente agressivo ao mineral (SAND e BOCK apud SHIRAKAWA, 1994).

Ferro, potássio, manganês, magnésio, cálcio e outros metais são em geral fatores limitantes do crescimento microbiano, pois se apresentam na forma insolúvel em materiais de natureza mineral, porém os microrganismos podem superar esta limitação e provocar

biodeterioração por complexação. Fazem isso através da excreção de ácidos orgânicos, que se complexam com os metais, permitindo que estes estejam biologicamente disponíveis através da consequente solubilização. Este tipo de ataque é também fracamente agressivo aos minerais (SAND e BOCK apud SHIRAKAWA, 1994).

Por outro lado, a biodeterioração por ataque ácido acontece quando ácidos minerais e orgânicos produzidos pelo metabolismo dos microrganismos agem agressivamente promovendo a dissolução dos materiais de natureza mineral, alterando sua microestrutura e reduzindo sua durabilidade. Entre as bactérias quimiolitotróficas, que excretam ácidos inorgânicos, estão os *Thiobacillus* produtores de ácido sulfúrico, e as bactérias nitrificantes, que produzem ácido nítrico. A produção de ácido sulfúrico por bactérias do gênero *Thiobacillus* é considerada a mais agressiva na biodeterioração do concreto (SAND e BOCK apud SHIRAKAWA, 1994).

2.2.4 Biorreceptividade

Um conceito relevante em se tratando de biodeterioração é o de biorreceptividade, que qualifica um material quanto à capacidade de permitir a fixação e o desenvolvimento de microrganismos em sua superfície (FILLA et al., 2010). Materiais que têm por base o cimento são porosos e podem conter substâncias orgânicas, possuindo uma significativa biorreceptividade primária (WIKTOR et al., 2009). Considera-se o material a base de cimento um material biorreceptivo ao ataque microbiológico devido às condições de rugosidade, porosidade, umidade e composição química, que combinadas com as condições ambientais, como umidade, temperatura e luminosidade, podem promover sua biodeterioração (LAPA, 2008).

Dessa forma, a colonização biológica de superfícies de edificações é dependente do meio ambiente e substrato (BARBEROUSSE, 2006; TOMASELLI et al., 2000). Crispim et al. (2003) mostraram que a composição e a espécie fototrófica predominante (cianobactéria ou alga) dependem do clima local, se temperado ou tropical. Contudo, o fator ambiental mais significativo no controle do desenvolvimento de algas em fachadas de edificações relaciona-se ao microclima, como a umidade e a luz (ARIÑO et al., 1997), e pode variar dependendo da inclinação, aspecto, distância do solo, espessura das paredes e temperatura interna da edificação (JOHN apud TRAM et al., 2012). Se a umidade é suficientemente alta e se as condições de iluminação e temperatura são adequadas, a colonização na superfície de edificações pode ocorrer muito rapidamente.

Além de depender das condições ambientais, a velocidade de crescimento de manchas biológicas depende muito da biorreceptividade do material. A biorreceptividade, considerada como a aptidão de um material ser colonizado por organismos vivos, está relacionada às propriedades do material que contribuem para o estabelecimento, fixação e desenvolvimento de diferentes tipos de organismos. Para materiais de construção, como pedra, concreto e argamassa, a biorreceptividade está relacionada à rugosidade da superfície, teor de umidade, composição química e estrutura-textura do material. Materiais como concreto aerado, por exemplo, que podem apresentar alta rugosidade e elevada macroporosidade, mostram uma alta biorreceptividade (GUILLITTE e DREESSEN, 1995; BARBEROUSSE et al., 2006).

As características do substrato que contribuem para a colonização biológica são físicas, como rugosidade e porosidade; e químicas, como composição mineral e pH da superfície (TOMASELLI et al., 2000; ORTEGA-CALVO et al., 1995; DERUELLE, 1991). Esses parâmetros estão incluídos no termo “biorreceptividade”. Entre eles, a rugosidade parece ser o fator mais importante, uma vez que favorece a adesão de microrganismos e de material orgânico dispersado pelo vento ou trazido pelo fluxo de água para o substrato. Além disso, a rugosidade afeta o fluxo de água na superfície e na absorção de radiação solar. As fachadas mais rugosas das edificações são mais suscetíveis à formação de biofilme do que as lisas (TOMASELLI et al., 2000); e um aumento na rugosidade leva a um aumento da absorção de radiação solar e, dessa forma, a um aumento na temperatura da superfície. A porosidade total e a distribuição de tamanho de poros são fatores a serem levados em conta, pois influenciam a absorção e retenção de água pelo material e o aumento da capilaridade em parte das paredes em contato com o solo (MILLER et al., 2009; PRIETO e SILVA, 2005). Dessa forma, a estrutura porosa determina parcialmente a disponibilidade de água para o desenvolvimento de algas. Sendo as demais condições iguais, sabe-se que a colonização é muito mais lenta em superfícies de construção recente, de concreto e de materiais que possuem o cimento como base, com o pH superior a 11 na superfície (GRANT apud TRAM et al., 2012). Com o tempo, a ação combinada da água e da carbonatação atmosférica leva a uma diminuição progressiva no pH da superfície da edificação, que se torna suficientemente baixo, cerca de 9, de forma a para permitir o desenvolvimento de algas (JOHN apud TRAM et al., 2012).

As características do concreto, incluindo a resistência à compressão, permeabilidade, teor de umidade, porosidade e rugosidade superficial, bem como a

composição do cimento, adição de materiais cimentícios suplementares e a relação água/cimento, estão relacionadas entre si e influenciam a suscetibilidade da superfície à formação de biofilme por microrganismos (SHIRAKAWA et al., 2003; PINHEIRO e SILVA, 2004). Como exemplo tem-se que concreto com uma relação água/cimento mais baixa é menos suscetível à formação de biofilme por algas (DUBOSC et al., 2001).

2.2.5 Fatores que influenciam a ação dos microrganismos

Considerando que a biodeterioração resulta da ação de organismos vivos, os fatores ligados à manutenção da vida dos agentes envolvidos constituem uma condicionante para que esse processo ocorra. A água é um elemento vital, resultando que ambientes úmidos possuam uma maior propensão à colonização por microrganismos. A disponibilidade de nutrientes é outro requisito. Esses nutrientes podem ser desde o aditivo orgânico utilizado na preparação do concreto ou argamassa, como é o caso dos lignosulfonatos, compostos inorgânicos, até mesmo matéria orgânica resultante da morte de outros microrganismos. O tipo de nutriente disponível definirá, ou selecionará, o microrganismo capaz de iniciar o processo. Fatores ambientais como a temperatura e o pH também são agentes limitantes, havendo valores ótimos para cada agente. Normalmente bactérias se desenvolvem melhor em ambientes com pH mais ácido e fungos em pH mais básico. Temperaturas entre 20 e 30 °C são consideradas ideais para a maioria dos organismos, enquanto a existência de certo número de organismos viáveis e capazes de se reproduzir pode também constituir-se em fator determinante (FILLA et al., 2010).

Microrganismos fototróficos, tais como algas e cianobactérias, colonizam os materiais construtivos sempre que uma combinação adequada de umidade, calor e luminosidade ocorrem (TIANO, 2002). Os fatores que influenciam o desenvolvimento de algas em concreto podem ser classificados em três categorias: fatores biológicos, ambientais e do substrato. Os fatores biológicos são relacionados à acessibilidade dos materiais às várias espécies e com a competição entre estas, sendo que a competição entre espécies está ligada às condições ambientais.

Quanto aos fatores do meio ambiente, são considerados essencialmente umidade, temperatura, luminosidade e suprimento de nutrientes. A umidade sobre uma superfície externa de parede deve alcançar certo nível para que as algas se desenvolvam, sendo que as fontes de umidade são a umidade relativa, que favorece o desenvolvimento das clorofiláceas (WEE e LEE apud ESCADEILLAS et al, 2007); o fluxo de água, frequentemente ligado a falhas no projeto e que favorece a propagação das cianobactérias sobre o substrato (LE

BORNE e LANOS apud ESCADEILLAS et al, 2007); e chuva e vento, que levam à formação de manchas nos lados da edificação que estão voltados para os ventos prevalecentes (ROBINSON e BAKER apud ESCADEILLAS et al, 2007). O substrato também influencia através da sua porosidade – retenção de água nos poros depois de mau tempo ou ascensão capilar nas partes da parede que estão próximas ao solo. A temperatura influencia a velocidade de crescimento, sendo que a temperatura ótima para crescimento é ao redor de 23 °C, de acordo com Gayral apud Escadeillas et al, (2007), porém não é um fator tão importante quanto a umidade. A luz é necessária para a reação de fotossíntese, sendo que uma total falta de luz age como inibidor. Além disso, as espécies presentes podem variar de acordo com a exposição da superfície da parede. Contudo, luz solar por muito tempo ou demasiado forte tende a ser um inibidor, ainda levando a uma rápida secagem da parede. O suprimento nutritivo necessário para algas consiste em nitrogênio, fósforo, enxofre, etc., fornecidos em sua forma mineral, oriundos do substrato de base, de águas de escoamento (*run-off*) ou de cinzas provenientes da poluição (SAIZ-JIMENEZ et al. apud ESCADEILLAS et al., 2007).

Por fim, há os fatores do substrato, que são aqueles que capacitam os microrganismos a se estabelecer e sobreviverem sobre qualquer que seja a porosidade, rugosidade e composição mineral (GUILLITTE e DREESEN, 1995). A rugosidade influencia a adesão das células trazidas pelo vento ou por meio de um fluxo de água sobre a superfície da parede, sendo que as algas tendem a se desenvolver melhor sobre substratos de base rugosa (WEE e LEE apud ESCADEILLAS et al., 2007). A porosidade do substrato influencia a quantidade de água absorvida e retida após mau tempo ou qualquer outra condição de alta umidade, sendo o desenvolvimento de algas sobre pedras de construção proporcional à porosidade destas. A utilização de argamassas mais densas, de alto desempenho, diminui a velocidade de desenvolvimento de microrganismos, ou mesmo inibe seu crescimento (DUBOSC et al., 2001).

A composição mineral da superfície pode ser utilizada como fonte de nutrientes pelas algas ou, contrariamente, prevenir seu desenvolvimento. O pH de concreto antes de sua carbonatação inibe o crescimento das algas, do mesmo modo que o fazem alguns produtos com efeito biocida ou com ação catalítica como o dióxido de titânio (TiO₂) (DUBOSC et al., 2001; SHIRAKAWA et al. apud ESCADEILLAS et al., 2007).

2.3 MÉTODOS DE ENSAIOS DE BIODETERIORAÇÃO

Segundo Giannantonio et al. (2009), ensaios de incrustação biológica controlada em laboratório podem ser realizados para avaliar a colonização da superfície de concreto,

degradação química ou biológica e a biorreceptividade de material. Existe um grande número de variações para a simulação *in vitro* da formação de biofilme nas superfícies de concreto, como, por exemplo, os testes de fluxo de água que simulam as condições reais de materiais de construção, com o fornecimento de um fluxo contínuo de microrganismos sobre estes. Os trabalhos de Guillitte e Dreesen (1995), de Dubosc et al. (2001) e de Shirakawa et al. (2003) são pioneiros na área de ensaios de biodeterioração.

Conforme Allsopp et al. (2004), pedras artificiais, tais como concreto, alvenaria e argamassa podem apresentar colonização microbiana, uma vez que seu pH inicial altamente alcalino (maior que 12) cai após um período de intemperismo (menor que 10). Atualmente, existem testes para estudar a biodeterioração de materiais de construção. Alguns deles foram desenvolvidos sem intemperismo acelerado da matriz e tiveram a duração de 7 a 15 meses (OSHIMA et al. apud WIKTOR et al., 2010; URZÌ e DE LEO, 2007). Porém, o intemperismo acelerado da matriz pode reduzir a duração do experimento, uma vez que aumenta a biorreceptividade da amostra (WIKTOR et al., 2010). Isso ocorre devido às modificações de pH.

Testes de laboratório com o objetivo de estudar o crescimento de algas na superfície de concreto precisam simular as condições reais com a maior fidelidade possível, mas, ao mesmo tempo, precisam ser acelerados, reprodutíveis, de baixo custo e de montagem e condução fáceis em laboratórios de material de construção. Esses testes também têm de considerar os parâmetros de apoio para o crescimento biológico (ESCADEILLAS et al., 2007).

Não existem normas técnicas nacionais ou internacionais para a análise da biorreceptividade de concretos. Contudo, existem algumas pesquisas na área de biodeterioração dos materiais construtivos que desenvolvem métodos de ensaio acelerado específico para a análise da biorreceptividade de materiais cimentícios. Cada estudo trabalhou com uma metodologia específica para atender ao conjunto de variáveis exigido em cada pesquisa, como o tipo de microrganismo, o material da amostra e a localização do material na estrutura da construção. Dessa forma, apesar de existirem similaridades e adaptações entre um estudo e outro, os métodos são distintos.

Considerando a relativa atualidade e complexidade do assunto, não existem ensaios que abranjam todas as variáveis necessárias para a análise da biorreceptividade de materiais cimentícios. Dessa forma, cada trabalho na área apresenta um método novo com definições já existentes e adaptações necessárias. É necessário conhecer os métodos de ensaio

já publicados por pesquisadores e instituições em periódicos de notável reconhecimento para que seja possível definir um método específico de ensaio acelerado de biorreceptividade de um material cimentício.

No presente trabalho, foram identificados e estudados os métodos de pesquisa de ensaio acelerado de biodeterioração de materiais cimentícios preconizados por outros autores que apresentam relevância científica. Ainda, foram identificadas as variáveis estudadas nas pesquisas para auxiliar na definição de um método de análise da biorreceptividade de concreto frente à proliferação de algas.

Os ensaios variam o material de estudo e o tipo de microrganismo pesquisado, sendo que algas e fungos se constituem nos microrganismos mais utilizados. Já a amostra pode ser argamassa, concretos especiais ou pastas de cimento, diferenciando o tipo de ensaio para diferentes localidades de aplicação na estrutura da construção, como por exemplo, ensaios estáticos para a simulação de superfícies horizontais, como pisos, e ensaios dinâmicos com escoamento de água para superfícies verticais ou inclinadas, como paredes. As variáveis independentes avaliadas nos ensaios podem ser o tipo de material, a relação água/cimento (a/c), o traço do material, o tratamento superficial, o ambiente de exposição, o pH ou o grau de carbonatação, o grau de lixiviação e a rugosidade da superfície.

Para proporcionar uma visão geral e melhor entendimento dos principais estudos realizados foi elaborada uma tabela apresentando o título do trabalho, ano de publicação, nome do autor, microrganismo utilizado, tipo de ensaio realizado, material da amostra e variáveis independentes utilizadas. A Tabela 1 apresenta o resumo dos ensaios.

Tabela 1 – Ensaios de biodeterioração.

Ano	Autor	Microrganismo	Ensaio	Amostra	Variáveis
1995	Guillitte e Dreesen	Plantas	Dinâmico	Rocha Tijolo Argamassa Concreto aerado	Material da amostra
2001	Dubosc et al.	Algas	Dinâmico	Argamassa	Relação a/c
2003	Shirakawa et al.	Fungos	Estático	Argamassa	Traço (<i>in loco</i> x industrializada)
2007	Barberousse et al.	Algas e cianobactérias	Dinâmico	Argamassa	Traço (<i>in loco</i> x industrializada)
2007	Escadeillas et al.	Algas e cianobactérias	Estático	Argamassa	Traço
2007	Escadeillas et al.	Algas e cianobactérias	Dinâmico	Argamassa	Traço
2009	De Muynck et al.	Algas	Dinâmico	Concreto celular	Tratamento de superfície (biocida e repelente)
2009	Giannantonio et al.	Fungos	Dinâmico	Argamassa	Cimento Relação a/c Adições Tratamento de superfície
2009	Jayakumar e Saravanane	Macro algas filamentosas	Estático	Concreto	Ambiente (<i>in loco</i> x laboratório)
2009	Wiktor et al.	Fungos	Estático	Pasta de cimento	Grau de Carbonatação Grau de lixiviação
2010	Wiktor et al.	Fungos	Estático	Pasta de cimento	Grau de Carbonatação Grau de lixiviação
2012	Tram et al.	Algas	Dinâmico	Argamassa	Rugosidade Porosidade pH da superfície

2.3.1 Ensaio preconizado por Guillitte e Dreesen (1995)

Guillitte e Dreesen (1995) realizaram experimento de laboratório em câmara para a avaliação da biorreceptividade de diversos materiais construtivos (rocha natural, tijolo, argamassa e concreto aerado), submetendo-os por um período de nove meses a molhagem intermitente em escorrimento (*run-off*) sobre superfícies inclinadas. O líquido aplicado consistia de água de torneira enriquecida com nutrientes contendo uma mistura de diásporos das plantas colonizadoras pioneiras. Em estágios sucessivos do experimento era realizada uma avaliação das superfícies colonizadas, sendo identificadas e quantificadas cianobactérias, algas verdes, diatomáceas e musgos. Após o experimento da exposição em laboratório, foi realizada análise petrográfica para revelar a natureza mineralógica desses materiais de construção, enquanto a análise de imagens permitiu a quantificação de alguns parâmetros físicos, como a porosidade. Uma importante descoberta com as análises petrográficas constituiu-se na observação de estratificação das associações das plantas colonizadoras e a penetração em diferentes profundidades dos rizóides e algas. O estudo demonstrou que a biorreceptividade dos materiais de construção é muito variável sendo controlada principalmente pela sua rugosidade superficial, porosidade inicial e natureza mineralógica.

2.3.2 Ensaio preconizado por Dubosc et al. (2001)

Dubosc et al. (2001) conduziram estudos em paredes de concreto com manchas causadas por crescimento de microrganismos, utilizando microscopia ótica e dois tipos de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que as manchas biológicas observadas eram devidas a dois tipos de algas microscópicas, clorofiláceas e cianobactérias, sendo sua presença dependente da quantidade de umidade existente na parede de concreto. Testes de laboratório de crescimento biológico acelerado sobre as amostras de argamassa mostraram que o desenvolvimento de algas aumentou com o crescimento da porosidade do material. No estudo, foram utilizadas argamassas com diferentes relações água/cimento, expostas a um intermitente escoamento (*run-off*) de água deionizada, enriquecida com uma mistura de diásporos de algas colonizadoras primárias, por um período de dois meses, em superfícies inclinadas a 45°. Foi observado que a colonização por algas aumentou com a relação água/cimento e com a porosidade. Argamassas com alta porosidade foram colonizadas mais intensamente, sendo essas as amostras que retiveram mais água durante o escoamento, ficando sua superfície úmida por mais tempo.

2.3.3 Ensaio preconizado por Shirakawa et al. (2003)

Shirakawa et al. (2003) realizaram trabalho com o objetivo de desenvolver e uniformizar um ensaio acelerado em laboratório para detectar a biorreceptividade de argamassa utilizada em ambiente interno frente a proliferação de fungos. Para determinar quais espécies de fungos foram predominantes em condições de campo, o isolamento foi realizado com amostras de argamassa coletadas de edifícios em duas cidades de São Paulo, Brasil. *Cladosporium* foi encontrado como sendo o gênero mais recorrente e *C. sphaerospermum* foi escolhido como um microrganismo de teste. Quatro tipos de argamassas foram testados para verificação da biorreceptividade frente à colonização por *C. sphaerospermum*, duas desenvolvidas em laboratório, compostas por cimento Portland comum, cal hidratada com elevado teor de cálcio e areia padronizada, e duas industrializadas. Vários parâmetros foram testados para determinar os fatores que influenciam a biorreceptividade fúngica, como o tipo de substrato para argamassas de revestimento, o tamanho das amostras de teste, a frente de carbonatação da argamassa e a umidade relativa a que foram expostas. Além disso, a espessura das amostras de argamassa também proporcionou diferenças na colonização fúngica.

No estudo de Shirakawa et al. (2003), com exceção de uma, todas as amostras de argamassa mostraram um crescimento fúngico significativo, no entanto, o crescimento

ocorreu apenas com 100% de umidade relativa. A interação de *C. sphaerospermum* com as amostras de argamassa foi estudada a partir de técnicas de microscopia eletrônica de varredura ambiental, combinadas com análise de energia dispersiva de raios-X. Foi demonstrado que o teste de biorreceptividade desenvolvido pode ser utilizado para avaliar argamassas de revestimento produzidas *in loco*, em instalações industriais ou para examinar as argamassas industrializadas. O estudo também enfatizou que o substrato utilizado na produção de amostras de argamassa para o ensaio acelerado em laboratório e em prédios influenciou nas propriedades da argamassa endurecida. O processo de ensaio em geral é aplicável a qualquer região geográfica, desde que se utilize organismos representantes da região. A Figura 1 apresenta o diagrama esquemático do teste laboratorial padronizado concebido para avaliar a biorreceptividade fúngica de argamassas.

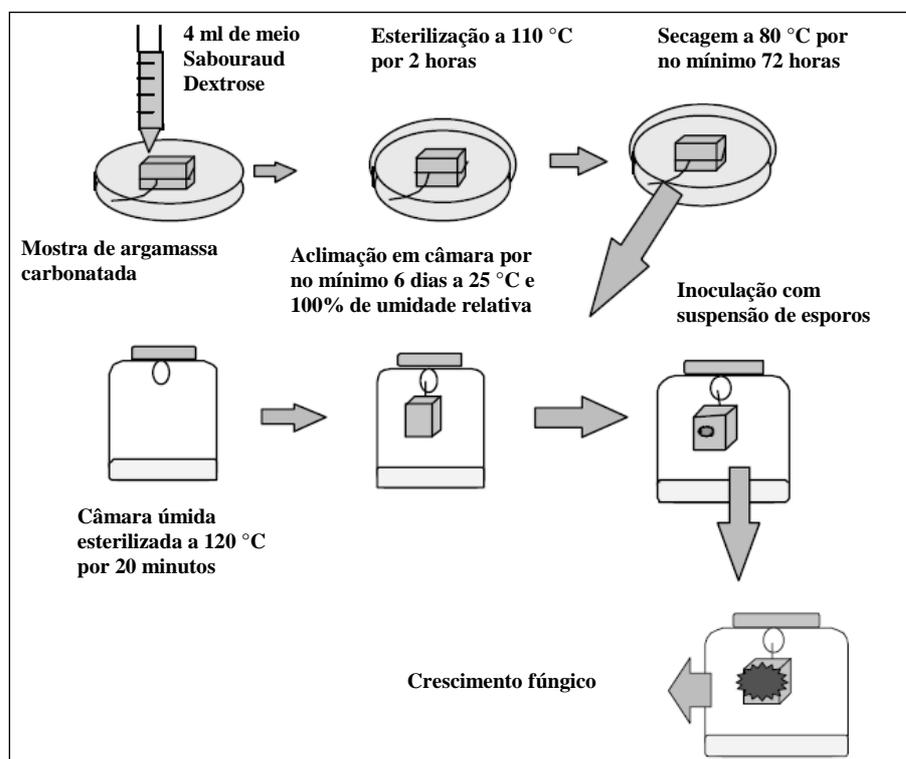


Figura 1 – Diagrama esquemático do teste laboratorial realizado por Shirakawa et al. (2003).

Fonte: Shirakawa et al. (2003)

2.3.4 Ensaio preconizado por Barberousse et al. (2007)

Barberousse et al. (2007), tentando reproduzir o fenômeno natural de biodeterioração, utilizaram o método do teste acelerado de escorrimento de água para avaliar diversos tipos de revestimento de fachadas em relação ao seu comportamento quanto à colonização de algas e cianobactérias. Os autores testaram uma argamassa produzida em laboratório e outras quatro industrializadas após a cura e carbonatação parcial. Para a

realização do teste de escoamento de água foram desenvolvidas câmaras de vidro para a inoculação do material com as culturas de algas e cianobactérias. A suspensão de microrganismos foi aplicada sobre o topo das amostras escoando pela sua superfície, permitindo que as células das algas e cianobactérias aderissem à superfície, dependendo das características das superfícies, como ocorre na natureza. A cinética de colonização dos materiais foi avaliada por meio de análise de imagens. Os autores concluíram que a porosidade e a rugosidade dos materiais são os principais fatores que influenciaram o estabelecimento desses microrganismos, sendo, portanto, parâmetros a serem considerados na formulação e aplicação de revestimentos nas fachadas, de forma a retardar o aparecimento de biofilmes que provocam deterioração. A Figura 2 e a Figura 3 representam a configuração do ensaio de laboratório usado para avaliar a colonização de materiais de fachada por algas e cianobactérias.

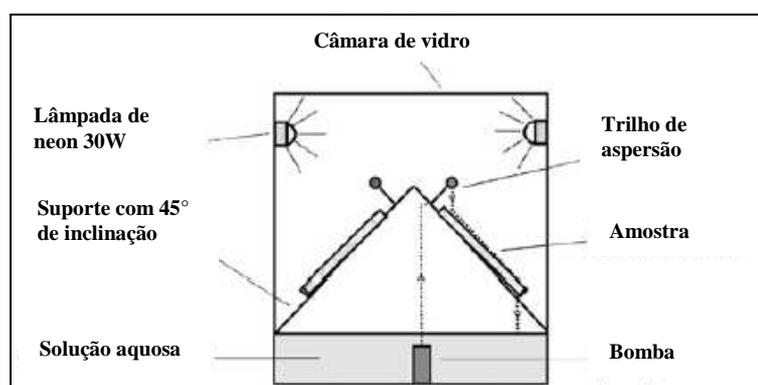


Figura 2 – Vista frontal da configuração do ensaio laboratorial realizado por Barberousse et al. (2007).

Fonte: Barberousse et al. (2007)



Figura 3 – Dispositivo de trabalho realizado por Barberousse et al. (2007).

Fonte: Barberousse et al. (2007)

2.3.5 Ensaio preconizados por Escadeillas et al. (2007)

O trabalho realizado por Escadeillas et al. (2007) teve como objetivo relacionar as várias manchas biológicas que afetam o concreto e apresentar dois ensaios acelerados para o

crescimento de algas, organismos responsáveis pelas primeiras manchas visíveis. O primeiro ensaio consistiu em um teste estático simulando condições de crescimento na base de uma construção. A umidade foi fornecida pela ascensão capilar de água e a acessibilidade da espécie não foi um fator limitante. O segundo ensaio consistiu em um teste dinâmico simulando escoamento de água (*run-off*) em algumas partes de construções. Este teste correspondeu a superfícies das paredes externas expostas a condições climáticas adversas, ou partes com vazamento de um edifício ou com defeitos de projeto. A acessibilidade para a espécie pode ser um fator limitante, pois as algas precisam aderir ao suporte antes de se desenvolverem.

Os pontos importantes nestes dois testes foram: a seleção de três espécies escolhidas pela sua facilidade de cultura, sendo elas a *Chroococcidiopsis cyanophyceae*, *Chlorhormidium* e *Chlorella chlorophyceae*; o método de preparação e escolha de algas, argamassas (carbonatação acelerada, saturação) e as técnicas de inoculação (depósito por inoculação e *run-off*); e a escolha das condições de ensaio (temperatura de 23 °C, iluminação de 1600 lux, suprimentos BG11 minerais). Ainda, estes ensaios podem permitir que superfícies de uma edificação possam ser qualificadas quanto às manchas biológicas com resultados obtidos em menos de três meses. A Figura 4 e a Figura 5 apresentam os diagramas esquemáticos dos sistemas de ensaio de umidificação da argamassa e teste de escoamento, respectivamente.

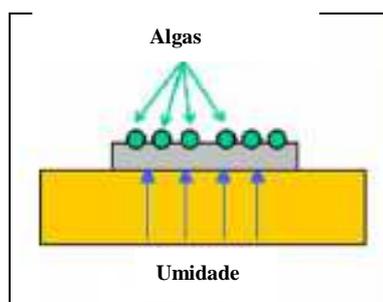


Figura 4 – Diagrama esquemático do sistema de umidificação realizado por Escadeillas et al. (2007).

Fonte: Escadeillas et al. (2007)

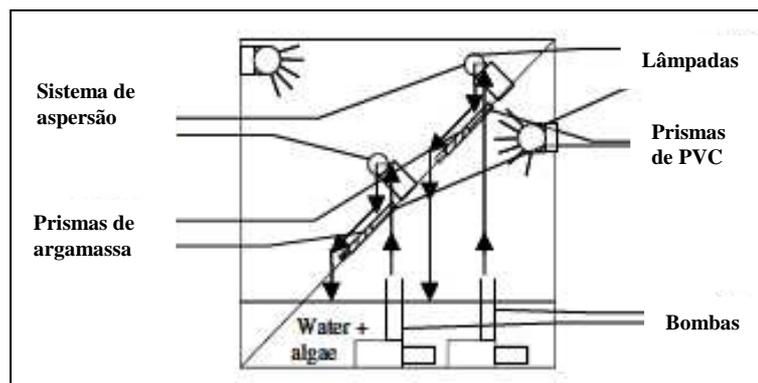


Figura 5 – Diagrama esquemático do teste de escoamento realizado por Escadeillas et al. (2007).

Fonte: Escadeillas et al. (2007)

A quantificação do crescimento das manchas nas argamassas foi o tema do segundo artigo realizado por Escadeillas et al. (2009). O segundo trabalho apresentou a escolha e desenvolvimento dos métodos de caracterização das argamassas (medição de rugosidade e estimativa de poros de superfície) e a escolha e desenvolvimento de técnicas de quantificação de algas nas argamassas (análise de imagem e medição do fator de reflexão).

2.3.6 Ensaios preconizados por Muynck et al. (2008)

Muynck et al. (2008) apresentaram a eficácia de duas estratégias na prevenção do crescimento de algas *Chlorella vulgaris* no concreto celular autoclavado. A primeira estratégia consistiu na utilização de repelentes de água a fim de afetar a biorreceptividade do material. Na segunda estratégia foram aplicados produtos inibidores para o crescimento de algas. Para a avaliação das estratégias, um teste de crescimento acelerado foi desenvolvido. Foi construída uma estrutura modular para a realização do teste de escoamento de água (*run-off*), permitindo a avaliação simultânea e separada de diferentes séries de ensaios. Os autores observaram que a efetividade do tratamento se mostrou dependente da biorreceptividade do concreto. Como o problema estético está relacionado com a proporção de área coberta com algas e a intensidade da coloração, a qualificação de crescimento de algas foi obtida com a análise de imagem e medições espectrofotométricas, conforme Dubosc (2001).

Os dois tratamentos superficiais, repelente de água e biocidas, resultaram numa taxa de incrustação retardada. No entanto, a cobertura completa destas amostras foi também obtida após uma ou duas semanas adicionais de ensaios acelerados. Devido ao seu baixo custo e simplicidade, o teste pode ser facilmente realizado em outros laboratórios. A Figura 6 apresenta a representação esquemática de uma unidade de instalação modular projetada no estudo e a Figura 7 apresenta a instalação modular utilizada no ensaio.

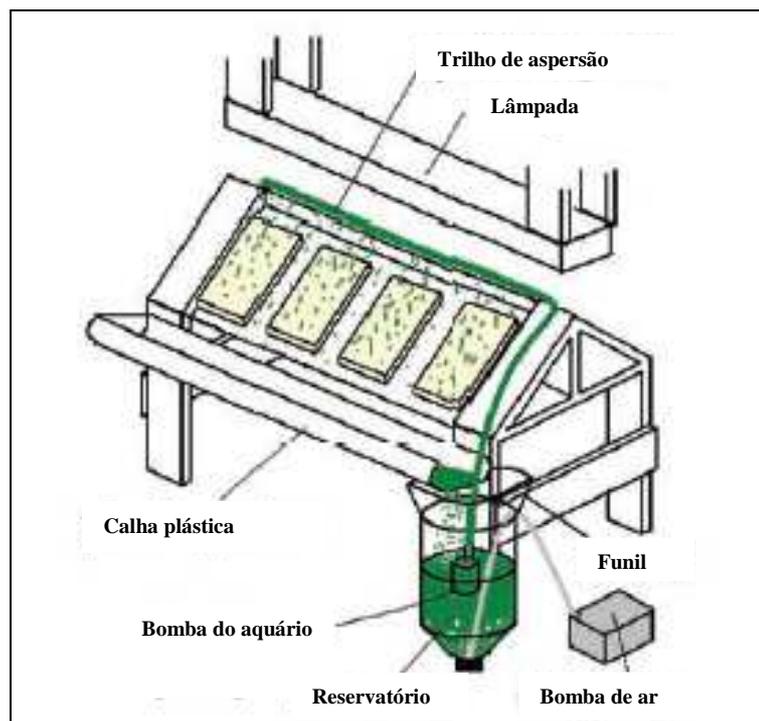


Figura 6 – Representação esquemática de uma unidade da instalação modular projetada por Muynck et al. (2008).

Fonte: Muynck et al. (2008)



Figura 7 – Instalação modular utilizada por Muynck et al. (2008).

Fonte: Muynck et al. (2008)

2.3.7 Ensaio preconizado por Giannantonio et al. (2009)

Giannantonio et al. (2009) descreveram a formação de biofilme por diversos gêneros de fungos em superfícies de concreto sob condições controladas de laboratório. Foi idealizada uma câmara com circulação de fluxo para testar os efeitos de diferentes composições de concreto com nutrientes exogenamente adicionados sobre colonização de fungos e formação de filme. Fungos pertencentes aos gêneros *Alternaria*, *Cladosporium*, *Epicoccum*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium*, *Pestalotiopsis* e *Trichoderma* foram colocados em

cultura a partir de estruturas de concreto visivelmente colonizadas e usadas individualmente e também em mistura para inocular ladrilhos de argamassa com composições variáveis de cimento, adições suplementares de materiais cimentícios, relação água/cimento, e rugosidade da superfície. Foi observada uma forte correlação entre a relação água/cimento do ladrilho e a quantidade de biofilme formado. Essa observação sugere que uma relação água/cimento mais alta torna o concreto mais suscetível à formação de biofilme. Esse fato é previsível, uma vez que o aumento da quantidade de água usada na hidratação do cimento pode resultar em maior porosidade, que pode diminuir a resistência da estrutura e aumentar a permeabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014), resultando em uma maior área superficial e disponibilidade de umidade e de nutrientes para as comunidades colonizadoras. Os diversos efeitos que a relação água/cimento apresenta sobre as propriedades do concreto, bem como sua forte relação com a formação de biofilme neste estudo, sugerem que essa proporção pode ser indicada para prever a biorreceptividade de uma estrutura. Da mesma forma, cimento contendo o fotocatalítico dióxido de titânio e exposto à luz solar artificial inibiu a colonização fúngica e a formação de biofilme. Ladrilhos de argamassa recobertos com óleo protetor e incubados com água da chuva esterilizada se mostraram capazes de dar suporte à colonização de fungos. Os resultados indicaram que a formação de biofilme fúngico em superfícies de concreto pode ser influenciada por variações na composição da mistura e disponibilidade de nutrientes. Uma vez que no presente estudo a quantidade de biofilme não esteve correlacionada à composição do cimento ou a adições de materiais cimentícios suplementares, é possível que essas variáveis possam ter um efeito *in loco*. A Figura 8 apresenta o diagrama esquemático da câmara de ensaio utilizada neste estudo.

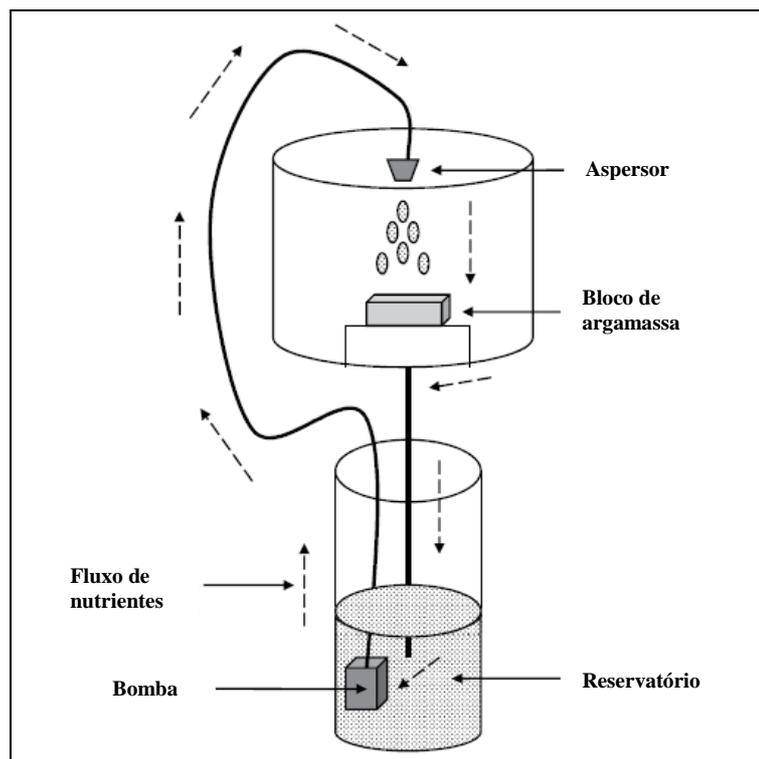


Figura 8 – Diagrama esquemático da câmara de ensaio utilizada por Giannantonio et al. (2009).

Fonte: Giannantonio et al. (2009)

2.3.8 Ensaio preconizado por Jayakumar e Saravanane (2009)

Com o objetivo de conhecer o efeito da macroalga *Chaetomorpha antennina* sobre estruturas de concreto marinhas, Jayakumar e Saravanane (2009) produziram cubos de concreto e os mantiveram na área costeira com crescimento da referida macroalga, sendo também conduzida uma simulação em laboratório. A partir de amostras obtidas oriundas dos cubos de concreto imersos em água potável, com a macroalga *C. antennina* presentes nas superfícies do material, tanto a partir de condições naturais como em condições simuladas de laboratório, foi identificado o efeito deletério da atividade metabólica da macroalga. A análise da superfície sugeriu que a biodeterioração pode ocorrer por meio de mecanismos de biossolubilização, envolvendo a produção de ácidos metabólicos pelas algas. Os resultados mostraram que o nível de cálcio aumentou tanto em condições naturais como de laboratório, enquanto o de sílica diminuiu consideravelmente. Alguns cristais presentes no concreto utilizado para controle não foram encontrados em concreto com algas, evidenciando que as algas os utilizaram para sua atividade metabólica, alterando o material base.

2.3.9 Ensaio preconizado por Wiktor et al. (2009)

Foi realizado estudo por Wiktor et al. (2009) objetivando desenvolver um teste acelerado de laboratório para estudar o efeito biodeteriorativo de diferentes tipos de fungos

sobre uma matriz cimentícia. O teste desenvolvido nesse estudo permitiu obter um desenvolvimento rápido de fungos nas amostras de cimento. Foram necessários três meses de experimentos para a obtenção dos primeiros resultados, o que é bem mais rápido que o tempo necessário em outros testes desenvolvidos para o estudo da biodeterioração causada por fungos. Os resultados foram relacionados à biodeterioração estética e mostraram que, sob as condições experimentais utilizadas, o crescimento de fungos ocorreu desde a primeira semana de incubação. Observações estereomicroscópicas mostraram que o crescimento microbiano foi percebido apenas sobre a superfície das amostras, enquanto a coloração por PAS (Periodic Acid Schiff) revelou a extensão real do crescimento microbiano dentro da matriz, como confirmado pelas observações da microscopia eletrônica de varredura (MEV) de secção da amostra, mostrando a penetração das hifas dentro da matriz. O teste pode ser utilizado com curto período de incubação para comparar a biorreceptividade de materiais cimentícios, enquanto diversos meses de incubação poderiam permitir o estudo dos mecanismos envolvidos na biodeterioração.

2.3.10 Ensaio preconizado por Wiktor et al. (2011)

Wiktor et al. (2011) desenvolveram um teste acelerado de laboratório que permitiu a comparação do crescimento de três tipos de fungos e a biodeterioração estética de uma matriz cimentícia, usando os fungos *Alternaria alternate*, *Exophiala* sp. e *Coniosporium uncinatum*. Tendo em vista que o pH da superfície de amostras de cimento fresco é suficientemente alto para permitir o crescimento dos fungos (pH~12), foi realizado o envelhecimento acelerado da matriz, consistindo na combinação de carbonatação e lixiviação, de forma a reduzir a alcalinidade do composto. Foi observado, por meio da análise por difração de raios-x e por microscopia eletrônica de varredura equipada com microanálise por raios-x, que a superfície da matriz era progressivamente coberta por uma camada de carbonato de cálcio, à medida que o envelhecimento ocorria. Os resultados indicaram que o crescimento microbiano ocorreu na matriz que apresentava uma composição mais calcária do que cimentícia. Os resultados mostraram que não houve desenvolvimento microbiano quando a matriz cimentícia não foi submetida a envelhecimento. Foi observado que o crescimento microbiano ocorreu sobre a superfície e no interior das amostras carbonatadas e lixiviadas. Com relação ao envelhecimento da matriz, o processo combinado levou a um máximo crescimento microbiano, que resultou em modificação da microestrutura da matriz e na diminuição do pH da superfície. A carbonatação da pasta de cimento endurecida fez com que a composição da superfície ficasse mais próxima à composição de uma pedra calcária do que

a de uma matriz cimentícia. O teste de envelhecimento acelerado de laboratório desenvolvido nesse estudo permitiu um rápido crescimento de fungos sobre as amostras de cimento. Foram necessários apenas três meses de experimentos para que fossem obtidos os primeiros resultados. Os resultados obtidos são principalmente relacionados com a biodeterioração estética. A Figura 9 apresenta o esquema da instalação experimental para teste de biodeterioração dos trabalhos de Wiktor et al. (2009) e Wiktor et al. (2011).

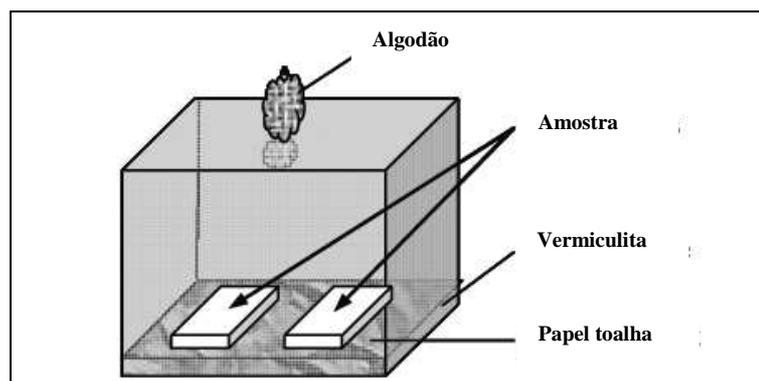


Figura 9 – Instalação experimental para teste de biodeterioração dos trabalhos de Wiktor et al. (2009) e Wiktor et al. (2011).

Fonte: Wiktor et al. (2011)

2.3.11 Ensaio preconizado por Tram et al. (2012)

Tram et al. (2012) realizaram estudo com o objetivo de elucidar a influência das propriedades intrínsecas de rugosidade, porosidade e pH da superfície sobre a suscetibilidade de argamassas à biodegradação por microrganismos fototrópicos. Foi conduzido um teste acelerado de formação de biofilme, permitindo aspersão periódica de uma suspensão de algas sobre a superfície das amostras. O teste de água corrente foi originalmente delineado em Lyon, na França, e então aprimorado no trabalho de Barberousse (2006). A alga verde *Klebsormidium flaccidum* foi escolhida devido à sua representatividade e facilidade de cultivo. Nesse estudo, a formação de biofilme na superfície das amostras foi avaliada por meio de análise de imagens e medida da coloração. A colonização por algas da superfície das amostras não foi influenciada pela porosidade devido às condições específicas do teste que levavam a um constante alto nível de molhamento das amostras de argamassa. A rugosidade, pelo contrário, desempenhou importante papel na colonização biológica. Uma superfície mais rugosa facilitou a fixação das células das algas, favorecendo o crescimento delas. O pH da superfície se mostrou como um dos mais decisivos parâmetros na determinação da biorreceptividade do material. Uma diminuição no pH da superfície, através da carbonatação, promoveu o desenvolvimento das algas, fazendo com que a colonização iniciasse muito antes

e ocorresse mais rapidamente. Os autores recomendam a consideração de um estudo sobre os componentes da argamassa, focados na manutenção de um alto pH para evitar a carbonatação. O teste em câmara simulando o escoamento de água (*run-off*) mostrou-se adequado para estudar a relação entre as características intrínsecas dos materiais em relação à formação de biofilme, tendo ocorrido a colonização das amostras de forma homogênea e reprodutível no teste.

2.3.12 Análise comparativa entre os ensaios

Apesar de os ensaios preconizados por Dubosc et al. (2001), Escadeillas et al. (2007) e Giannantonio et al. (2009) utilizarem amostras de argamassa, o objetivo destes estudos foi a análise da biorreceptividade de concretos. Esta escolha baseou-se no fato de que, na prática, os fenômenos e efeitos provocados na superfície de um concreto são os mesmos daqueles em uma argamassa. Além disso, a utilização de argamassas permite a utilização de amostra com dimensões menores que a amostra de concreto. Contudo, os estudos não consideraram que o agregado graúdo de um concreto poderá estar localizado muito próximo da superfície, muitas vezes até mesmo aparente. Conforme Neville e Brooks (2013), a interface entre o agregado e a pasta de cimento hidratada, denominada zona de transição, é a fase mais frágil do concreto, pois apresenta maior porosidade. Nestes termos, um estudo de biodeterioração do concreto deverá considerar o efeito da zona de transição na biodeterioração dos materiais cimentícios.

Muitos dos estudos preconizados fazem o uso de métodos de envelhecimento da amostra antes do ensaio acelerado de biodeterioração, a fim de acelerar ainda mais o tempo de ensaio. Shirakawa et al. (2003), Barberousse et al. (2007), Escadeillas et al. (2007), Wiktor et al. (2009) e Tram et al. (2012) fizeram o uso da carbonatação da amostra para reduzir o pH da superfície. Este procedimento foi utilizado nestes estudos porque pouca atividade biológica acontece em concretos recém moldados e, conseqüentemente, com alto pH. Ainda, Wiktor et al. (2009) e Wiktor et al. (2011) utilizaram a lixiviação como procedimento de envelhecimento da amostra antes do ensaio acelerado de biodeterioração. Assim como a carbonatação, a lixiviação modifica as características originais do material (WIKTOR, 2011).

Os estudos que trabalharam com algas e cianobactérias, como os de Dubosc et al. (2001), Barberousse et al. (2007), Escadeillas et al. (2007), Muynck et al. (2008) e Tram et al. (2012), tiveram de um a três meses de duração do ensaio de biodeterioração. Já os estudos que trabalharam com fungos, como os de Shirakawa et al. (2003), Giannantonio et al. (2009), Wiktor et al. (2009) e Wiktor et al. (2011), apresentaram uma duração de três meses. Por sua

vez, o estudo de Guillitte e Dreesen (1995), realizado com plantas, e o estudo de Jayakumar e Saravanane (2009), realizado com macroalgas filamentosas, apresentaram o tempo de nove meses.

A duração dos ensaios acelerados de biodeterioração depende, principalmente, dos métodos de envelhecimento utilizados nas amostras antes do ensaio, do tipo de microrganismo e da quantidade de microrganismo inoculado. Ainda, alguns estudos consideraram o cobrimento total das amostras como data final, enquanto outros consideraram o tempo necessário para diferenciar a proliferação entre as variáveis como data final. Contudo, é possível identificar, de forma geral, que os estudos realizados com algas apresentaram um tempo de resposta inferior aos estudos com os demais microrganismos.

Os ensaios apresentados indicaram que a análise da biorreceptividade dos materiais cimentícios de uma edificação não pode ser realizada de forma generalizada. A metodologia de ensaio a ser escolhido dependerá do tipo de material cimentício, dos microrganismos envolvidos e da localização da área a ser analisada em uma edificação, como superfícies inclinadas, planas ou verticais, a proximidade com solo, presença de escoamento de água e microclima da área. Contudo, é possível identificar, de forma geral, que os estudos realizados com algas apresentam um tempo de resposta inferior aos demais microrganismos. É também possível identificar que os ensaios realizados com algas e cianobactérias necessitaram de controle de iluminação, enquanto que os ensaios realizados com fungos e bactérias dispensaram a presença de luz. Ainda, foi possível identificar que, devido ao pH inicial das superfícies de concreto ser elevado, foi necessário o envelhecimento da amostra para acelerar o experimento e simular um material já exposto ao meio.

Apesar de já existir uma quantidade significativa de pesquisas na área, é possível identificar lacunas quanto às metodologias de ensaio. Os ensaios existentes não abrangeram todas as variáveis de biodeterioração dos materiais cimentícios, como, por exemplo, a análise da biorreceptividade de concretos frente ao ataque por algas utilizando amostra de concreto e não de argamassa.

É importante o reconhecimento da importância de todas as interações entre os materiais, os organismos colonizadores, a estrutura e os parâmetros ambientais, bem como a influência sobre a biorreceptividade. Em geral, a medida da biorreceptividade é relativa uma vez que, dificilmente, são utilizados em um experimento todos os organismos colonizadores envolvidos, vindo daí uma das razões da dificuldade de padronização de medições (GUILLITTE e DREESEN, 1995).

A revisão de literatura realizada permitiu verificar as áreas de maior necessidade de pesquisa e, igualmente, a necessidade de aprimoramento dos ensaios acelerados de biodeterioração, assim como o desenvolvimento de ensaios específicos para amostras de concreto. Da mesma forma, também auxiliou a determinar as condições de teste mais adequadas à determinação de biorreceptividade de amostras de concreto submetidas a diferentes tratamentos de superfície e com diferente relação água/cimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação da biorreceptividade do concreto foi desenvolvido um método de ensaio acelerado de biodeterioração específico para este trabalho, com base nos métodos de ensaio em materiais cimentícios apresentados na revisão bibliográfica. O programa experimental foi dividido nas seguintes etapas: caracterização dos materiais; amostra e caracterização do concreto; coleta e condições de cultivo dos microrganismos; execução de câmaras de ensaio de biodeterioração; e ensaio acelerado de biodeterioração.

Este estudo utilizou como material da amostra para o ensaio acelerado de biodeterioração três traços de concreto convencional com três tratamentos de superfície. Os traços foram compostos por cimento, areia e brita, conforme apresentado na caracterização dos materiais. Quanto aos microrganismos utilizados para inoculação do concreto no ensaio de biodeterioração, foram utilizadas algas microscópicas coletadas *in loco*.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado para a execução dos corpos de prova foi o cimento de alta resistência inicial CP V – ARI. Este cimento foi escolhido por apresentar menor percentual de adições na composição química e rápida hidratação, permitindo maior hidratação dos corpos de prova dentro do período de cura previsto do programa experimental. A análise permitiu observar que o formato das partículas é irregular. A caracterização da composição granulométrica do cimento foi realizada pelo método da granulometria a laser, utilizando como fluido álcool isopropílico e o equipamento Microtrac modelo S3500. As características químicas, físicas e mecânicas do cimento, informadas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 2 enquanto a Figura 10 apresenta a curva granulométrica obtida.

Tabela 2 – Características do cimento.

Ensaio		Limites especificados por norma (ABNT NBR 5733:1991)		Valor médio
Ensaio Químicos	Teores (%)	PF	≤ 4,5	3,63
		MgO	≤ 6,5	5,94
		SO ₃ para C ₃ A ≤ 8	≤ 3,5	3,03
		RI	N/A	12,28
Ensaio físicos	Finura (%)	#200	≤ 6,0	0
		#400	N/A	1,37
	Tempo de pega	Início (min.)	≥ 60	220,45
		Fim (min.)	≤ 600	262
Ensaio mecânicos	Resistência à compressão	1 dia	≥ 11,0	22,62
		3 dias	≥ 24,0	34,03
		7 dias	≥ 34,0	39,16
		28 dias	N/A	47,56

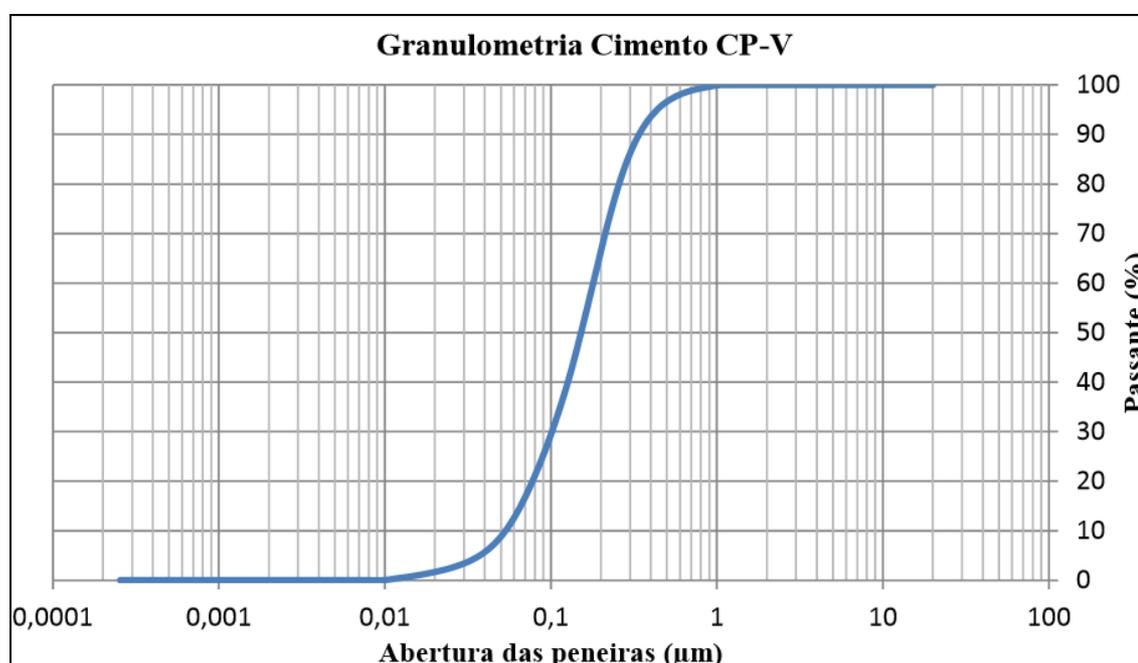


Figura 10 – Granulometria do cimento.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado no estudo foi a areia natural extraída de rio, proveniente da Região do Vale do Rio dos Sinos/RS e de origem quartzosa. A caracterização granulométrica do agregado miúdo foi realizada conforme a ABNT NM 248/2003 e a massa unitária e massa específica conforme ABNT NBR NM45:2006 e ABNT NBR NM 52:2009, respectivamente. A massa específica encontrada foi de 2,55 g/cm³ e a massa unitária 1,37 g/cm³. Os resultados granulométricos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Abertura de Peneira (mm)	% Retido	% Acumulado
4,8	1	1
2,4	3	4
1,2	7	11
0,6	11	22
0,3	26	48
0,15	51	99
Fundo	1	100

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo adotado para a pesquisa foi de origem basáltica. Assim como para a caracterização do agregado miúdo, foram realizados procedimentos conforme descritos nas ABNT NBR NM 45:2006, ABNT NBR NM 53:2009 e ABNT NBR NM 248:2003. Os resultados obtidos para massa específica e massa unitária foram de $2,89 \text{ g/cm}^3$ e $1,54 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Os resultados granulométricos do agregado graúdo são apresentados na Tabela 4 e as curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo são apresentadas na Figura 11.

Tabela 4 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Abertura de Peneira (mm)	% Retido	% Acumulado
9,5	20	20
6,3	48	68
4,8	18	86
2,4	13	99
1,2	1	100

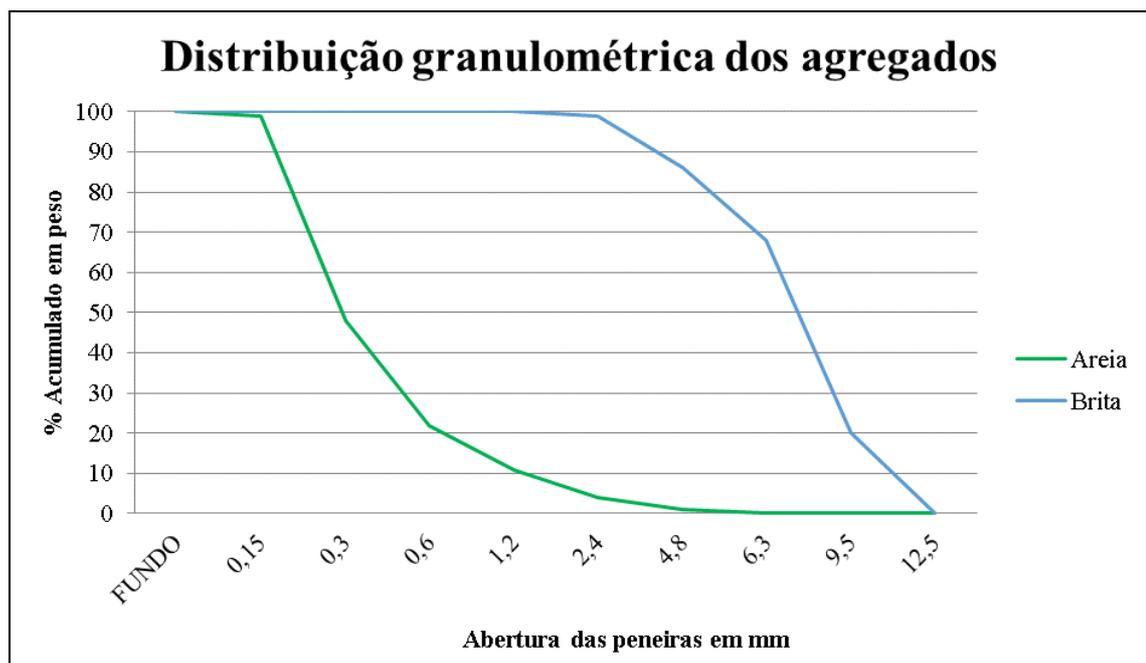


Figura 11 – Curva granulométrica dos agregados.

3.2 AMOSTRA DE CONCRETO

A amostra do estudo foi o concreto convencional e as variáveis de estudo foram a relação água/cimento (a/c) e os tratamentos de superfície. A variável relação a/c tem o intuito de formular traços com porosidades distintas, pois quanto maior a relação a/c maior é a porosidade, enquanto que os tratamentos de superfície são os responsáveis pela diferença na rugosidade do acabamento final. Os tratamentos superficiais compreenderam alisamento de superfície com régua (tratamento 1), tratamento da superfície com esponja (tratamento 2) e tratamento da superfície com escova de aço (tratamento 3). As relações água/cimento foram 0,60 (traço A), 0,75 (traço B) e 0,80 (traço C). As variáveis foram realizadas em quatro repetições, sendo três com inoculação e uma sem inoculação de microrganismos para a realização do controle. A Figura 12 apresenta o fluxograma das variáveis da amostra de concreto.

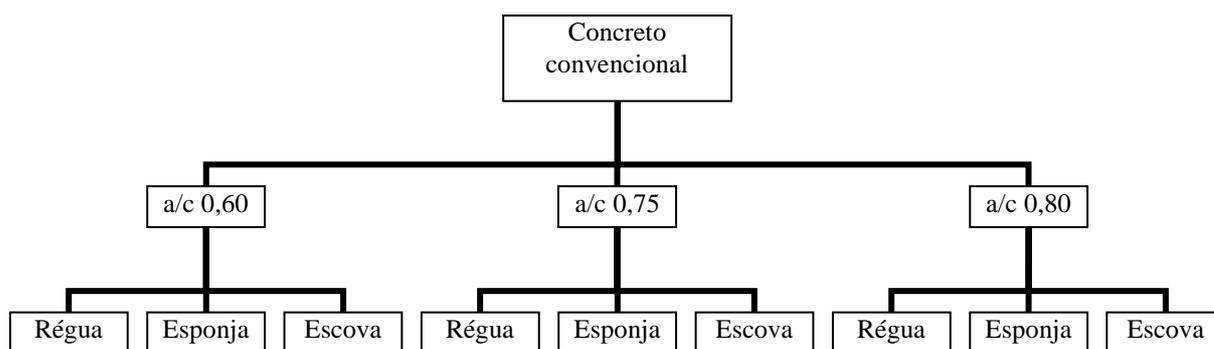


Figura 12 – Fluxograma das variáveis.

3.2.1 Concretagem

A concretagem, os processos de moldagem, tratamentos superficiais, cura e carbonatação foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da UNISINOS. Para garantir a trabalhabilidade semelhante entre os três traços de concreto com diferentes relações a/c sem o uso de aditivos foram formulados três traços com as seguintes composições:

1:4 - 1 parte de cimento para 1,75 de areia e 2,25 de brita

1:5 - 1 parte de cimento para 2,3 de areia e 2,7 de brita;

1:6 - 1 parte de cimento para 2,85 de areia e 3,15 de brita.

3.2.2 Moldagem

Os corpos de prova para a composição da amostra utilizada no ensaio acelerado de biodeterioração foram moldados conforme adaptação do procedimento descrito na ABNT

NBR 5738:2015, pois o estudo exige dimensões inferiores às descritas na norma. A dimensão deve ser a mínima possível para comportar os agregados graúdos. Dessa forma, para este trabalho, escolheu-se corpos de provas cilíndricos, com 5cm de diâmetro e 3cm de espessura para a moldagem e 1cm de espessura, adquirida por corte das peças, para o ensaio acelerado de biodeterioração. A Figura 13 apresenta as formas de tubo de policloreto de vinila (PVC) utilizados para a moldagem dos corpos de prova.



Figura 13 – Formas dos corpos de prova.

3.2.3 Tratamentos superficiais

Os dois primeiros tratamentos superficiais, régua e esponja, foram realizados logo após a concretagem. O tratamento superficial denominado neste trabalho como régua foi realizado alisando a superfície final de acabamento com lâminas de vidro imediatamente após a moldagem. O tratamento de esponja consistiu em passar suavemente uma esponja simples sobre a superfície do concreto ainda fresco aproximadamente três horas após a moldagem. A Figura 14 mostra o tratamento de esponja sendo realizado.



Figura 14 – Tratamento superficial realizado com esponja.

O tratamento superficial com escova de aço foi realizado 24 horas após a moldagem dos corpos de prova. A escovação aconteceu por, aproximadamente, dois minutos em cada peça, até a exposição do agregado graúdo. A

Figura 15 apresenta o procedimento para o tratamento superficial realizado com escova de aço.



Figura 15 – Tratamento superficial realizado com escova de aço.

A Figura 16 apresenta o resultado visual dos tratamentos superficiais. Os oito primeiros moldes visíveis na figura, da esquerda para a direita, apresentam tratamento superficial realizado por esponja, seguido pelos moldes com tratamento superficial realizado por escova e régua, respectivamente.



Figura 16 – Tratamentos superficiais.

3.2.4 Cura e carbonatação

A desforma foi realizada após transcorridas 24 horas da concretagem e então as peças foram para a câmara de cura por um período de 28 dias. Este tempo é suficiente para o concreto atingir um elevado grau de hidratação, necessário para os procedimentos de carbonatação. A câmara de cura apresenta temperatura e umidade controladas em $21 \text{ }^\circ \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e 100%, respectivamente.

Após o período de cura da amostra, os corpos de prova sofreram processo de carbonatação. A carbonatação é a reação do CO_2 com o cimento hidratado. O gás CO_2 , presente na atmosfera, na presença de umidade forma ácido carbônico e reage com o Ca(OH)_2 , formando CaCO_3 . A carbonatação ocorre da superfície para o interior, mas é extremamente lenta em condições normais de exposição atmosférica. (NEVILLE E BROOKS, 2013). Então, para acelerar o processo foi realizada a carbonatação acelerada em câmara com concentração de 1% de CO_2 e umidade relativa de $70\% \pm 5\%$ por um período de 28 dias. A carbonatação teve por finalidade baixar o pH da superfície objetivando simular um concreto envelhecido, não sendo necessária a carbonatação total da amostra (SHIRAKAWA et al., 2003; BARBEROUSSE et al., 2007; ESCADEILLAS et al., 2007; MUYNCK et al., 2009; GIANNANTONIO et al., 2009; WIKTOR et al., 2009; WIKTOR et al., 2010; TRAM et al., 2012). A Figura 17 apresenta a câmara de carbonatação.



Figura 17 – Câmara de carbonatação.

3.2.5 Corte

As amostras de concreto utilizadas no ensaio acelerado de biodeterioração foram moldadas com 3 cm de espessura, acarretando em corpos de prova relativamente pequenos quando comparados com os corpos de prova usualmente utilizados em estudos de concreto. Esta foi a menor espessura possível encontrada para garantir a homogeneização da mistura durante a moldagem. Contudo, o ensaio de biodeterioração exige peças de espessura inferior, pois o estudo trabalha com umidade ascensional. Assim, quanto menor a espessura, maior a suplemento de água, garantindo a aceleração do processo. Dessa forma, após a cura e carbonatação, as peças de concreto foram cortadas para atingir a espessura de 1 cm. O corte

foi realizado no Laboratório de Laminação da Geologia da UNISINOS. A Figura 18 apresenta o procedimento de corte das peças.



Figura 18 – Corte dos corpos de prova.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Foram realizados ensaios de abatimento do tronco de cone, resistência à compressão, resistência ao desgaste por abrasão e medição da frente de carbonatação. A caracterização do concreto objetivou evidenciar os parâmetros qualitativos do material para a realização do comparativo de biorreceptividade. Os traços, relação água/cimento e abatimento são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização do concreto.

Traço (cimento – areia – brita, em massa)	Relação Água/cimento	Abatimento (cm)
A: 1 – 1,75 – 2,25	0,60	95
B: 1 – 2,30 – 2,70	0,75	90
C: 1 – 2,85 – 3,15	0,80	95

A determinação da consistência do concreto pelo abatimento foi determinada pela realização da medição do tronco de cone, conforme prescrito pela NBR NM 67:1998, no momento da concretagem. O ensaio mediu a consistência e a fluidez do material, permitindo o controle da uniformidade dos traços de concreto utilizados.

O método de ensaio para determinar a resistência à compressão foi realizado conforme ABNT NBR 5739:2007. Para este ensaio, foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 100 x 200 mm de dimensão, moldados conforme ABNT NBR 5738:2003. Este ensaio permitiu estabelecer uma relação de resistência à compressão entre os três traços de concreto.

Para obtenção de parâmetros de rugosidade dos tratamentos superficiais realizados no concreto foi realizado o ensaio de desgaste por abrasão. O método de ensaio para

determinação do índice de desgaste por abrasão utilizado foi o preconizado pela Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (CIENTEC), sendo o ensaio realizado no CIENTEC. O ensaio simula um percurso de 500 m percorridos pelo corpo de prova submetidos a uma pressão constante de 0,06 MPa sobre pó abrasivo carborundo. O índice de desgaste é expresso como a média entre as alturas iniciais e finais do corpo de prova medidas em cinco pontos.

A permeabilidade dos diferentes traços de concreto foi verificada mediante a medição da frente de carbonatação. A taxa real de carbonatação depende da permeabilidade do concreto, seu teor de umidade e do teor de CO₂ e umidade relativa do meio ambiente. Como a permeabilidade do concreto é governada pela relação água/cimento, concretos com elevada relação água/cimento serão mais suscetíveis à carbonatação, ou seja, maior será a profundidade de carbonatação (NEVILLE E BROOKS, 2013). Assim, como a realização da carbonatação dos corpos de prova em laboratório, em condições controladas de umidade e teor de CO₂, a permeabilidade tornou-se a condição de comparação entre as variáveis.

A frente de carbonatação foi medida mediante o auxílio do reagente químico fenolftaleína. A fenolftaleína é utilizada como um indicador ácido-base, pois é uma substância que tem a propriedade de mudar de cor em função do pH do meio, ficando incolor em meio ácido e de coloração rosa em meio básico. A mudança de cor ocorre com valores de pH entre 8,2 e 9,8 coincide com o pH da carbonatação do concreto. Este ensaio foi realizado no momento de corte das peças.

3.4 COLETA E CONDIÇÕES DE CULTIVO DOS MICRORGANISMOS

3.4.1 Coleta de microrganismos

Os microrganismos utilizados neste estudo foram coletados *in loco*. Foram realizadas coletas de material de três localidades distintas das áreas externas do campus da UNISINOS em São Leopoldo. O critério de seleção dos pontos de coleta foi a identificação de proliferação de microrganismos de coloração verde em superfícies de concreto aparente e exposto ao ambiente externo em blocos de concreto localizados em pisos.

O procedimento de coleta do material foi realizado conforme descrito por Dubosc et al. (2001). Primeiramente, as manchas biológicas foram raspadas das superfícies com *swab* de algodão e armazenadas em microtubos com água destilada até o transporte para o Laboratório de Biologia Molecular da UNISINOS.

3.4.2 Tratamento e cultura dos microrganismos

No laboratório, o material foi analisado microscopicamente a fim de verificar o tipo de microrganismo coletado. Após identificadas as características de alga, o material foi incubado em placas de petri com meio ágar Bold Basal Medium (BBM) e foram mantidos em câmara de crescimento a 20 °C e fotoperíodo de 12 horas luz, localizada no laboratório de Fisiologia Vegetal da UNISINOS. Esta condição permite a retomada do crescimento ativo de modo que as algas possam ser inoculadas numa fase de crescimento exponencial (ESCADEILLAS et al., 2007). A Figura 19 apresenta o material na câmara de crescimento com condições de exposição controladas.

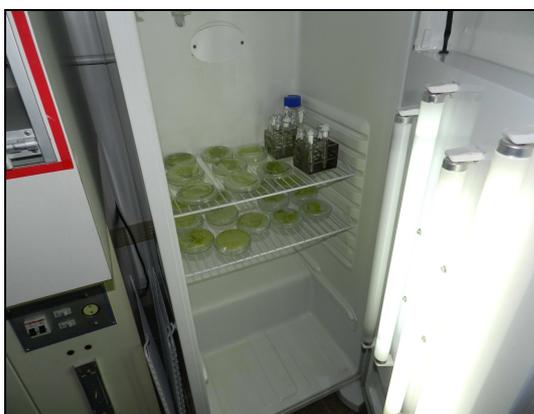


Figura 19 – Câmara de crescimento.

Durante a fase de incubação do material coletado foi realizado o isolamento parcial da alga predominante. Foi realizada uma sequência de seleção para a obtenção do isolamento parcial. A seleção se deu pelo ciclo de cultivo dos microrganismos nas placas de petri, raspagem do material evidente e cultivo novamente do material raspado em nova placa de petri. O meio nutriente utilizado para o cultivo das algas foi a formulação “Bold’s Basal Medium” (BBM), que contém as seguintes soluções:

Solução 1: 25,0 g NaNO_3 por litro de d- H_2O ;

Solução 2: 2,5 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ por litro de d- H_2O ;

Solução 3: 7,5 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ por litro de d- H_2O ;

Solução 4: 7,5 g K_2HPO_4 por litro de d- H_2O ;

Solução 5: 17,5 g KH_2PO_4 por litro de d- H_2O ;

Solução 6: 2,5 g NaCl por litro de d- H_2O ;

Solução 7: 50,0 g “disodium” EDTA, 31,0 gm KOH por litro de d- H_2O ;

Solução 8: 4,98 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ por litro de H_2O acidificada (H_2O acidificada é 999,0ml de d- H_2O + H_2SO_4 concentrado)

Solução 9: 11,42 g H_3BO_3 por litro de d- H_2O ;

Solução 10: 8,82 g $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1,44 g $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0,71 g MoO_3 , 1,57 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ e 0,49 g $\text{CoNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ por litro de d- H_2O .

A formulação BBM as seguintes concentrações:

10,0 ml das soluções 1, 2, 3, 4, 5 e 6 por litro de d- H_2O ;

1,0 ml das soluções 7, 8 e 9 por litro de d- H_2O ;

2,0 ml da solução 10 por litro de d- H_2O .

Para o presente estudo foram preparados 100 mL das soluções 1, 2, 3, 4, 5 e 6, 50 ml das soluções 7, 8 e 9 e 200 mL de meio nutriente BBM sólido. Para solidificar o meio nutriente, foi dissolvido 3% de ágar na água destilada utilizada na formulação BBM. As soluções utilizadas no meio nutriente e o ágar diluído em água destilada foram esterilizados em autoclave. O preparo do meio nutriente foi realizado em capela esterilizada com álcool etílico 70% e submetido a 15 minutos de exposição à luz ultravioleta antes do preparo e 15 minutos de exposição à luz ultravioleta durante a solidificação das placas de petri.

3.5 CÂMARAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO

Após análise dos ensaios de biodeterioração existentes apresentados na revisão bibliográfica e a identificação da lacuna existente, como, por exemplo, a análise da biorreceptividade de concretos ao ataque por algas utilizando amostra de concreto, foi projetado um ensaio acelerado de biodeterioração para analisar amostras de concreto com proliferação de algas. O projeto compreendeu câmaras de ensaio estático de biodeterioração com iluminação, umidade e temperatura controladas, localizado no laboratório de Fisiologia Vegetal da UNISINOS. As câmaras eram caixas de vidro hermeticamente vedadas com filme plástico na superfície. Dessa forma foi possível realizar o acompanhamento visual da proliferação em qualquer momento sem comprometer as variáveis de umidade durante o andamento do ensaio (WIKTOR et al., 2010).

A luminosidade foi obtida por meio da utilização de lâmpadas fluorescentes tubulares e o fotoperíodo de exposição foi de 12 horas/dia, segundo bibliografia. Para garantir a umidade dentro da câmara, o fundo da caixa foi revestido com vermiculita (ESCADEILLAS et al., 2007; WIKTOR et al., 2010), as amostras foram colocadas sobre uma camada de 6 cm

de vermiculita saturada de água destilada e autoclavada e foi considerada a umidade relativa superior a 98% (ESCADEILLAS et al., 2007). O ensaio foi realizado em sala climatizada a fim de controlar a temperatura de ensaio.

Primeiramente, foi realizado um projeto piloto com apenas uma variável de traço de concreto e as três variáveis de tratamento de superfície para a validação do projeto de ensaio. O ensaio foi realizado com três repetições com inoculação de microrganismos e uma repetição sem inoculação. A Figura 20 apresenta o croqui da câmara utilizada no projeto piloto. A unidade de medida do croqui é o metro, sistema métrico decimal.

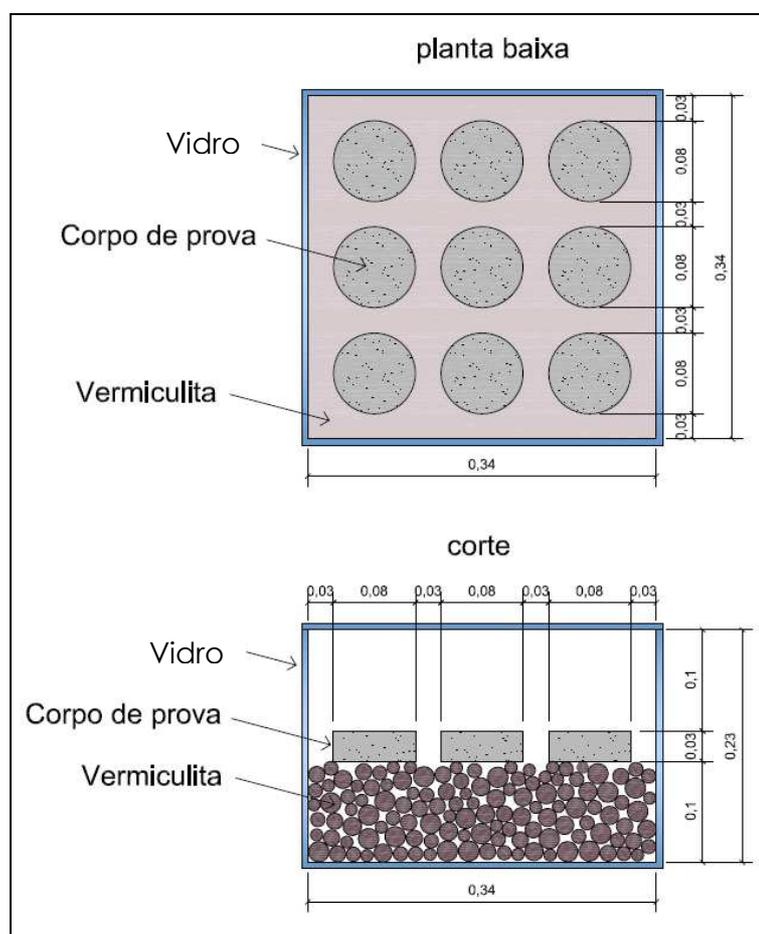


Figura 20 – Planta baixa e corte da câmara de biodeterioração. Valores em metros.

Após verificação dos parâmetros do projeto piloto foi iniciado o ensaio de biodeterioração com todas as variáveis do estudo. A Figura 21 apresenta a câmara utilizada no ensaio de biodeterioração.



Figura 21 – Ensaio de biodeterioração

3.6 ENSAIO ACELERADO DE BIODETERIORAÇÃO

3.6.1 Esterilização dos materiais

Todos os materiais que ficaram expostos aos microrganismos durante o ensaio acelerado de biodeterioração foram devidamente esterilizados. Conforme ordem de montagem, primeiramente as caixas de vidro foram higienizadas com álcool etílico 70%. Após, a vermiculita foi autoclavada e, em seguida, imersa em água destilada autoclavada dentro das caixas de vidro (WIKTOR et al., 2010). A Figura 22 apresenta um dos procedimentos de autoclave.



Figura 22 – Autoclave da vermiculita.

Os corpos de prova de concreto foram imersos em álcool etílico 70% por 30 minutos e secados em estufa por 1h. Após a secagem, os corpos de prova e a vermiculita foram imersos por 48h em água destilada e autoclavada para garantir a saturação dos

materiais. Duas horas antes da inoculação, as amostras foram retiradas das câmaras para que a superfície estivesse seca, facilitando a absorção da solução com algas (ESCADEILLAS et al., 2007). A Figura 23 apresenta a esterilização por imersão e a Figura 24 secagem em estufa dos corpos de prova.



Figura 23 – Esterilização dos corpos de prova.



Figura 24 – Secagem das amostras.

3.6.2 Inoculação da amostra

Para a inoculação foi necessária a remoção das algas de meio nutriente sólido para sua colocação em meio nutriente líquido. Duas placas petri com proliferação de algas evidentes foram selecionadas para o procedimento. Primeiramente, foi adicionado o meio nutriente líquido BG sobre a placa de petri. Com o auxílio de um raspador de células foi realizada a ressuspensão, dissolução e homogeneização dos microrganismos no meio líquido sobre a placa de petri, seguido pela diluição do material em tubos de ensaio. A Figura 25 apresenta a raspagem e dissolução dos microrganismos da placa de petri. A Figura 26 apresenta as algas dissolvidas no meio líquido e Figura 27 apresenta a diluição e a hominização das algas no meio nutriente líquido.



Figura 25 – Raspagem das algas.

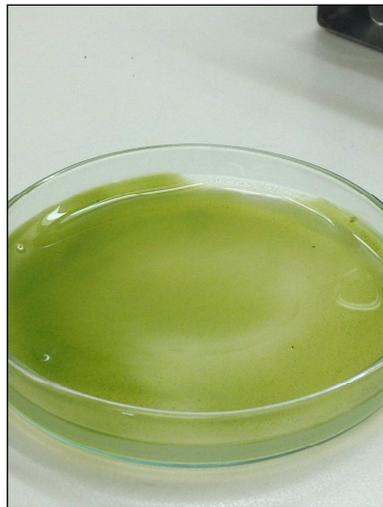


Figura 26 – Dissolução das algas.



Figura 27 – Diluição e homogeneização das algas.

Para o estudo piloto, foi utilizada a concentração $4,16 \times 10^6$ células/mL e foram inoculados 100 μ L por corpo de prova de concreto. Depois de verificado o lento crescimento

dos microrganismos no ensaio piloto, foi ajustada a concentração de células para $3,8 \times 10^7$ células/mL, mantendo a inoculação de 100 μ L por amostra. A contagem das células foi realizada em câmara de Neubauer. A Figura 28 apresenta o procedimento realizado para a contagem das células.

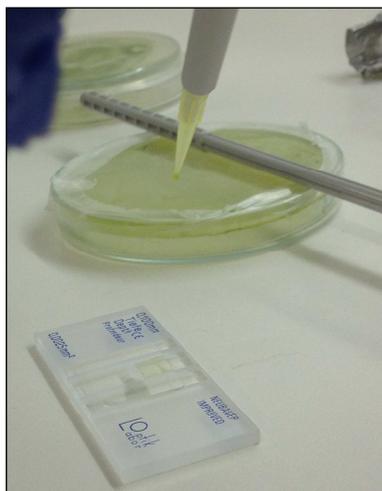


Figura 28 – Procedimento de contagem de células.

3.6.3 Ensaio acelerado de biodeterioração

Após a inoculação, os corpos de prova de concreto foram colocados nas câmaras de ensaio acelerado de biodeterioração em condições otimizadas para acelerar a potencialidade de crescimento das algas sobre a superfície. A temperatura, iluminação e fotoperíodo foram controlados na sala de ensaio acelerado. A temperatura foi mantida em $21 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e o foto período foi de 12 h dia/noite, sendo a incidência de luz mantida em 2000 lux. O nível d'água dentro da câmara foi mantido próximo a 4 cm do fundo da câmara para fornecer o suprimento de umidade às vermiculitas e aos corpos de prova por ascensão capilar. A Figura 29 apresenta a marca do nível d'água mantido durante o estudo.



Figura 29 – Nível d'água.

No ensaio acelerado de biodeterioração, os corpos de prova de concreto foram localizados dentro da câmara de ensaio de modo a facilitar rápidas interpretações visuais enquanto o ensaio estava em andamento. As repetições com inoculação, denominadas R1, R2 e R3, foram distribuídas em linhas e as variáveis de estudo em colunas. As variáveis apresentaram a denominação A, B e C para os traços e 1, 2 e 3 para os tratamentos, correspondendo aos tratamentos de régua (R), esponja (S) e escova (E), respectivamente. Ainda, a última coluna de cada traço apresenta a variável controle. O controle foi realizado com corpos de prova sem inoculação em uma peça de cada variável. A Tabela 6 apresenta a localização dos corpos de prova dentro da câmara de ensaio acelerado de biodeterioração.

Tabela 6 – Localização dos corpos de prova dentro da câmara de ensaio.

	Traço A				Traço B				Traço C			
	R	S	E	C	R	E	S	C	R	S	E	C
R 1	A1.1	A2.1	A3.1	A1s	B1.1	B2.1	B3.1	B1s	C1.1	C2.1	C3.1	C1s
R 2	A1.2	A2.2	A3.2	A2s	B1.2	B2.2	B3.2	B2s	C1.2	C2.2	C3.2	C2s
R 3	A1.3	A2.3	A3.3	A3s	B1.3	B2.3	B3.3	B3s	C1.3	C2.3	C3.3	C3s

Conforme Escadeillas (2007), em condições normais e favoráveis de crescimento (superfície porosa), leva aproximadamente um ano para que seja possível visualizar o crescimento e de dois a cinco anos para que a superfície apresente uma cobertura realmente intensa. Nas condições do ensaio e para um suporte poroso e biorreceptivo, a cobertura total começa a aparecer em menos de dois meses depois da inoculação. Essa aceleração deve-se em parte às condições do suporte, mas, sobretudo, devido ao fato de que o suporte é diretamente inoculado e mantido úmido. Conforme tais parâmetros, para o presente ensaio foi determinado um período mínimo de 12 semanas.

3.6.4 Análises da biodeterioração

Os ensaios realizados após a inoculação das amostras tiveram como objetivo acompanhar a proliferação de microrganismos durante o ensaio acelerado de biodeterioração e verificar a extensão das manchas biológicas nos corpos de prova. Os ensaios foram realizados durante o processo de biodeterioração e na última idade do ensaio acelerado de biodeterioração.

A extensão da proliferação nos corpos de prova foi analisada mediante análise colorimétrica visual de imagem. As imagens foram adquiridas por câmera fotográfica digital com frequência semanal.

Após finalizado o período do ensaio de acelerado de biodeterioração de 26 semanas de duração foi realizada a análise microscópica do material presente nos corpos de prova. Para esta análise, foi realizada a raspagem da superfície dos corpos de prova com o auxílio de uma agulha cirúrgica e foram confeccionadas lâminas com o material coletado. A análise foi realizada com câmera fotográfica digital acoplada ao microscópio.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

4.1.1 Resistência à compressão

Foram realizados ensaios com três corpos de prova de cada traço aos 7 e 28 dias para os traços A e B e aos 7 dias para o traço C. Os resultados estão apresentados na Tabela 7 e a Figura 30 apresenta o gráfico com as resistências à compressão individual de cada corpo de prova e a média de cada traço.

Tabela 7 – Resistência à compressão.

Traço	Relação a/c	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade	Resistência à compressão (MPa)	
					Individual	Média
A	0,60	14/10/2015	21/10/2015	7 dias	27,5	28,1
					29,3	
					27,5	
		14/10/2015	11/11/2015	28 dias	36,2	
					33,0	
					31,9	
B	0,75	14/10/2015	21/10/2015	7 dias	21,7	22,6
					23,7	
					22,3	
		14/10/2015	11/11/2015	28 dias	29,3	
					29,4	
					29,7	
C	0,80	19/10/2015	26/10/2015	7 dias	20,1	19,1
					18,9	
					18,3	

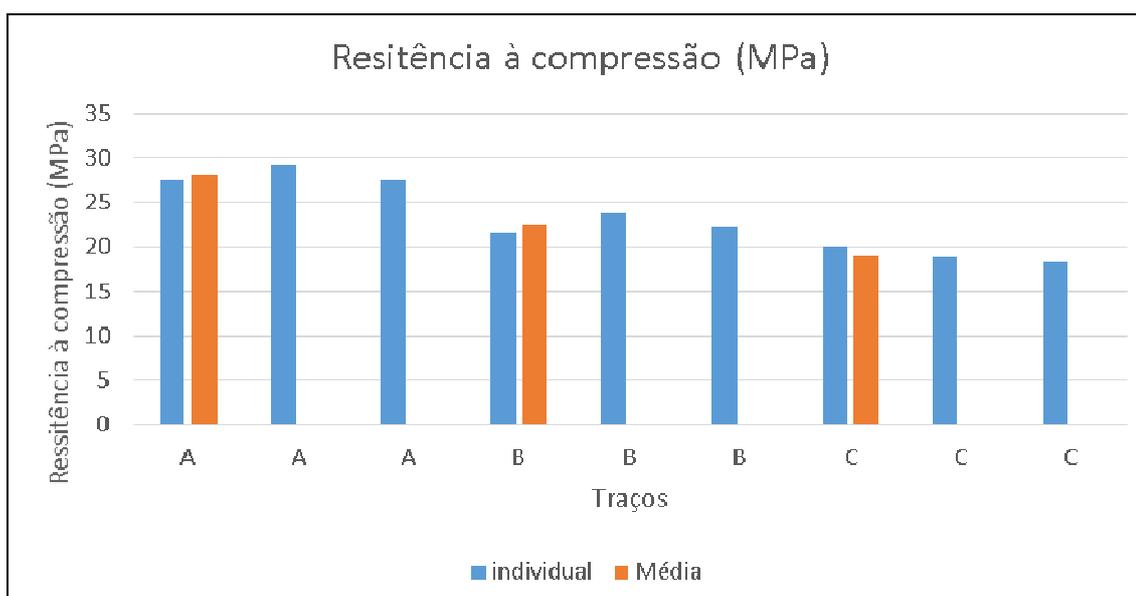


Figura 30 – Resistência à compressão aos 7 dias.

O ensaio evidencia uma tendência em que o traço A é o mais resistente à compressão, seguido pelo traço B e traço C, nesta ordem. Este resultado está coerente com as relações água/cimento e composição de traço, pois o traço A é o que apresenta maior consumo de cimento e menor relação água/cimento.

4.1.2 Frente de carbonatação

A medida da frente de carbonatação dos traços de concreto está apresentada na Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 e a Figura 31 apresenta o gráfico da frente de carbonatação medida nos três traços.

Tabela 8 – Frente de carbonatação do traço A.

Estilo	Traço A			Média
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	
Medida 1(mm)	3,5	5,0	2,5	3,7
Medida 2 (mm)	3,5	3,0	3,0	3,2
Medida 3 (mm)	3,0	2,5	2,0	2,5
Média (mm)	3,3	3,5	2,5	3,1

Tabela 9 – Frente de carbonatação do traço B.

Estilo	Traço B			Média
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	
Medida 1(mm)	5,5	4,5	4,5	4,8
Medida 2 (mm)	5,5	5,5	5,0	5,3
Medida 3 (mm)	6,0	6,0	5,5	5,8
Média (mm)	5,7	5,3	5,0	5,3

Tabela 10 – Frente de carbonatação do traço C.

Estilo	Traço C			Média
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	
Medida 1(mm)	6,5	8,0	7,5	7,3
Medida 2 (mm)	7,5	7,0	5,5	6,7
Medida 3 (mm)	6,5	7,5	7,5	7,2
Média (mm)	6,8	7,5	6,8	7,1

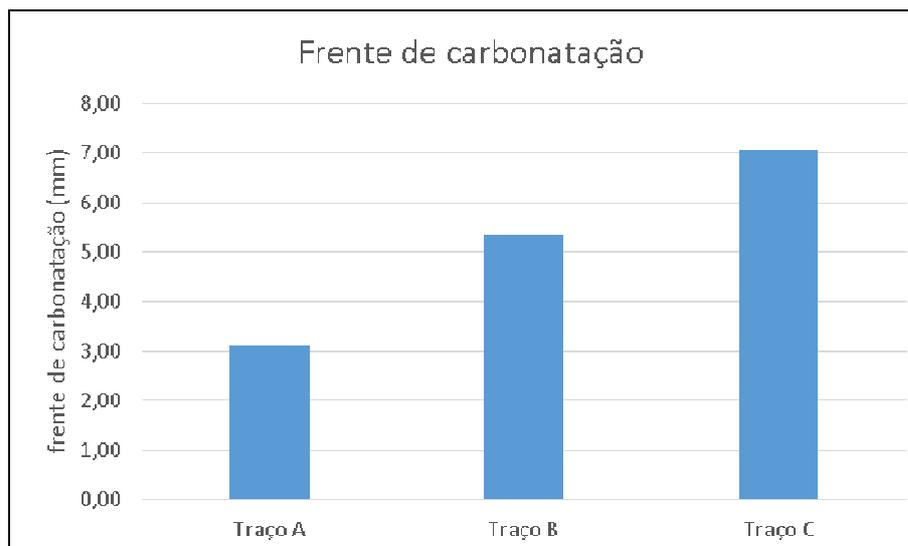


Figura 31 – Frente de carbonatação.

Quando os corpos de prova foram carbonatados em laboratório, em condições controlada de umidade e teor de CO₂, a permeabilidade tornou-se a variável de comparação entre as variáveis. Assim, o ensaio evidencia uma tendência em que o traço A é o menos permeável, seguido pelo traço B e traço C, nesta ordem. Este resultado está coerente com as relações água/cimento, pois o traço A é o que apresenta menor relação água/cimento. A Figura 32 apresenta a imagem dos corpos de prova das três repetições do traço C após utilização da substância de fenolftaleína para a medição da frente de carbonatação.



Figura 32 – Medição da frente de carbonatação.

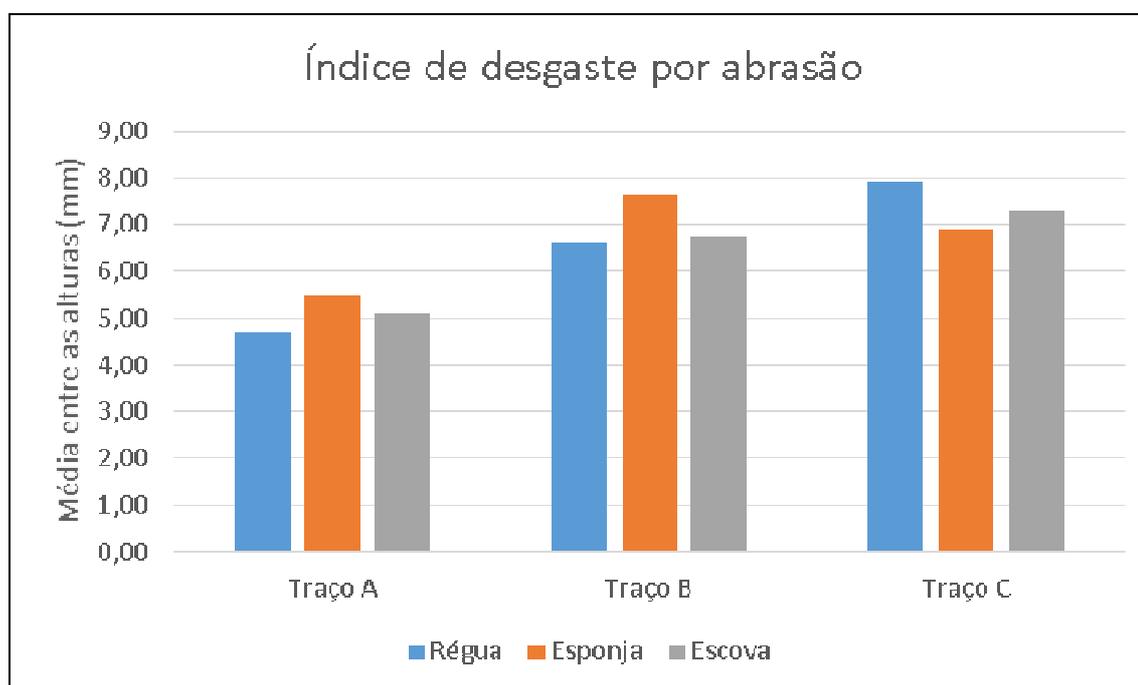
4.1.3 Resistência ao desgaste por abrasão

O índice de desgaste por abrasão é expresso como a média entre as alturas iniciais e finais do corpo de prova medidas em cinco pontos. O resultado gerado pelo ensaio de desgaste por abrasão tem por finalidade apresentar parâmetro de rugosidade dos três tratamentos superficiais, régua, esponja e escova. A Tabela 11 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 11 – Resistência ao desgaste por abrasão.

Tratamento	Traço A			Traço B			Traço C		
	A1	A2	Média	B1	B2	Média	C1	C2	Média
Régua	4,27	5,10	4,69	6,33	6,87	6,60	7,69	8,11	7,90
Esponja	5,41	5,60	5,51	9,44	5,84	7,64	7,00	6,81	6,91
Escova	4,91	5,29	5,10	6,91	6,56	6,74	7,48	7,12	7,30

O valor médio das medidas entre as alturas iniciais e finais dos corpos de prova gera um índice de desgaste por abrasão. Quanto menor o desgaste por abrasão, menor a rugosidade do material. O tratamento superficial denominado régua tende a ser o tratamento que apresenta menor desgaste por abrasão nos traços A e B quando comparado com os outros dois tratamentos. Já o tratamento superficial com esponja apresentou maior desgaste por abrasão nestes dois traços. Contudo, no traço C, os valores do índice de desgaste por abrasão são invertidos, sendo a esponja o tratamento superficial que apresenta menor desgaste por abrasão e a régua o que apresenta o maior desgaste por abrasão. O tratamento superficial realizado com escova manteve-se na média em todos os traços. A Figura 33 apresenta o gráfico do índice de desgaste por abrasão encontrados no ensaio.

**Figura 33 – Índice de desgaste por abrasão.**

O ensaio aparentemente não apresenta os resultados esperados para o traço C. A resistência à compressão muito baixa deste traço fez com que os resultados do ensaio de resistência à abrasão ficassem comprometidos.

4.2 BIODETERIORAÇÃO DO CONCRETO

4.2.1 Projeto piloto

O projeto piloto foi realizado com o intuito de aprimorar o ensaio acelerado de biodeterioração. O ensaio realizado no projeto piloto teve a duração de 28 dias. Após detectada a ausência de crescimento dos microrganismos inoculados no ensaio realizado no projeto piloto foram modificados os quantitativos de células e a dimensão da vermiculita. A concentração de células a serem inoculadas foi aumentada de $4,16 \times 10^6$ células/ml para $3,8 \times 10^7$ células/ml, mantendo a inoculação de 100 μ l por corpo de prova de concreto. A dimensão da vermiculita foi modificada para um material de menor diâmetro. A Figura 34 apresenta o resultado da última idade do ensaio piloto.



Figura 34 – Ensaio piloto.

4.2.2 Decrescimento das algas por análise colorimétrica visual

O cronograma de ensaio acelerado de biodeterioração determinou um período mínimo de 12 semanas de ensaio, prorrogados após detectada a ausência de crescimento. Contudo, após transcorridas 26 semanas de condução do teste, não foi verificado visualmente crescimento e proliferação dos microrganismos.

No presente estudo foi verificado um decréscimo na mancha biológica inoculada ao longo do tempo de ensaio, sendo a presença de manchas biológicas visíveis apenas em 22% dos corpos de prova inoculados após transcorridas as 26 semanas de ensaio. Ainda, os corpos de prova de controle, sem inoculação, não apresentaram em nenhuma idade do ensaio manchas biológicas visíveis. Assim, a repetição de controle não aparece nos gráficos e tabelas de análise. A Figura 35 apresenta o gráfico de presença de mancha biológica durante o tempo de ensaio, considerando a média entre as repetições.

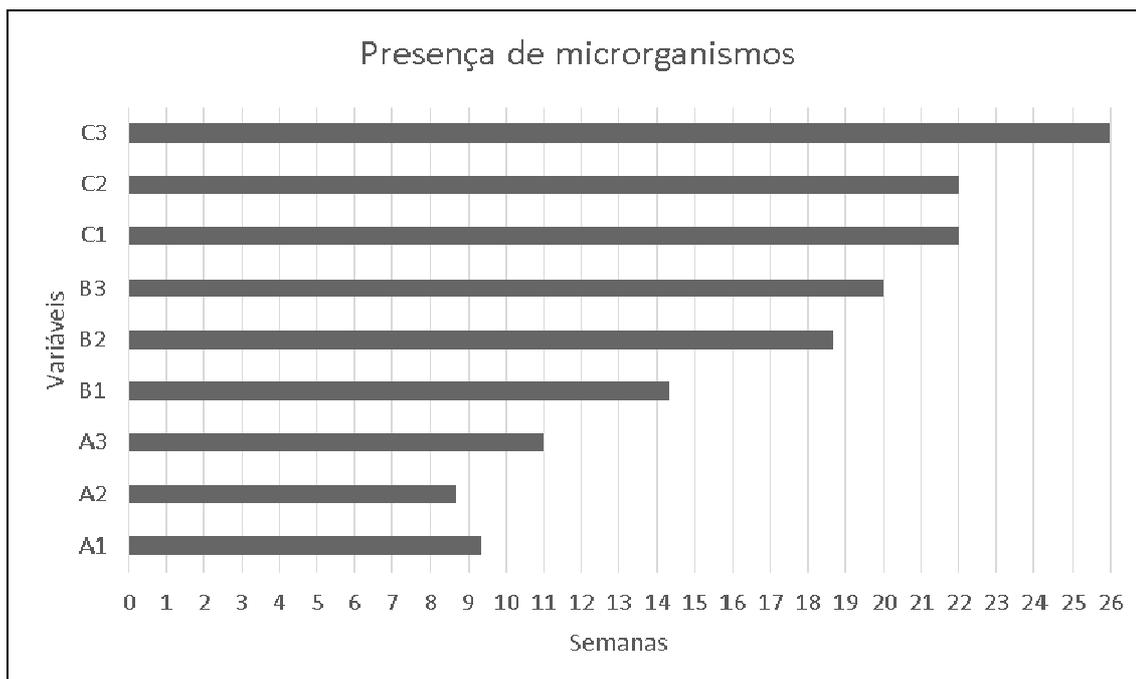


Figura 35 – Presença de microrganismos.

As manchas biológicas do traço A foram as primeiras manchas a se extinguirem. Já no traço C, o traço considerado mais biorreceptivo devido a maior porosidade quando comparado aos outros dois traços, as manchas biológicas permaneceram visíveis até a última idade de ensaio. Contudo, é possível identificar um decréscimo da mancha mesmo nos corpos de prova do traço C. Ainda, na última semana de ensaio é possível identificar manchas de coloração cinza escuro de formato arredondado, compatível com manchas biológicas derivadas pela presença de fungos. A Figura 36 e a Figura 37 apresentam os corpos de prova do traço C na primeira e na última semana de ensaio.

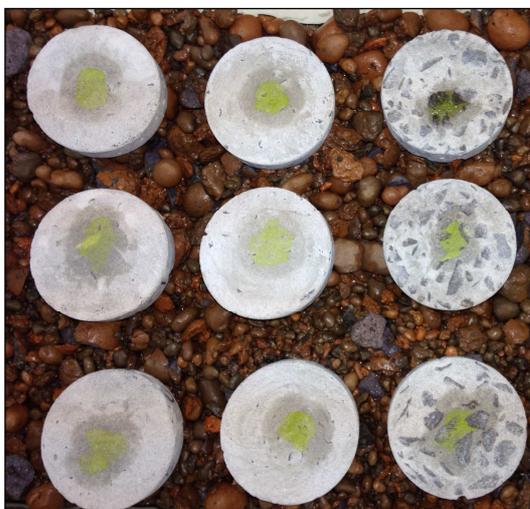


Figura 36 – Traço C na semana 1.



Figura 37 – Traço C na semana 26.

Quanto aos tratamentos superficiais, é possível verificar que o tratamento superficial realizado com escova de aço, que expõe o agregado graúdo, foi o tratamento superficial com maior tendência a ser o mais biorreceptivo, apresentando microrganismos visíveis por maior período de tempo de ensaio. Dessa forma, assim como considerada por Neville e Brooks (2013) como a fase mais frágil do concreto devido à porosidade, considera-se que a zona de transição do concreto é provavelmente a fase mais biorreceptiva do material.

Para a análise do decrescimento da mancha biológica nos demais tratamentos superficiais é necessário analisar a presença de mancha em todas as repetições e não só analisar a média, pois alguns corpos de prova apresentaram manchas biológicas por período relativamente superior à média entre as repetições. Assim, é possível identificar que o primeiro tratamento, denominado régua, foi o tratamento com menor tendência a biorreceptividade, pois os corpos de prova deste tratamento foram os primeiros a perder a mancha biológica inoculada. A Figura 38 apresenta o gráfico de presença de mancha biológica durante o tempo de ensaio com todas as repetições.

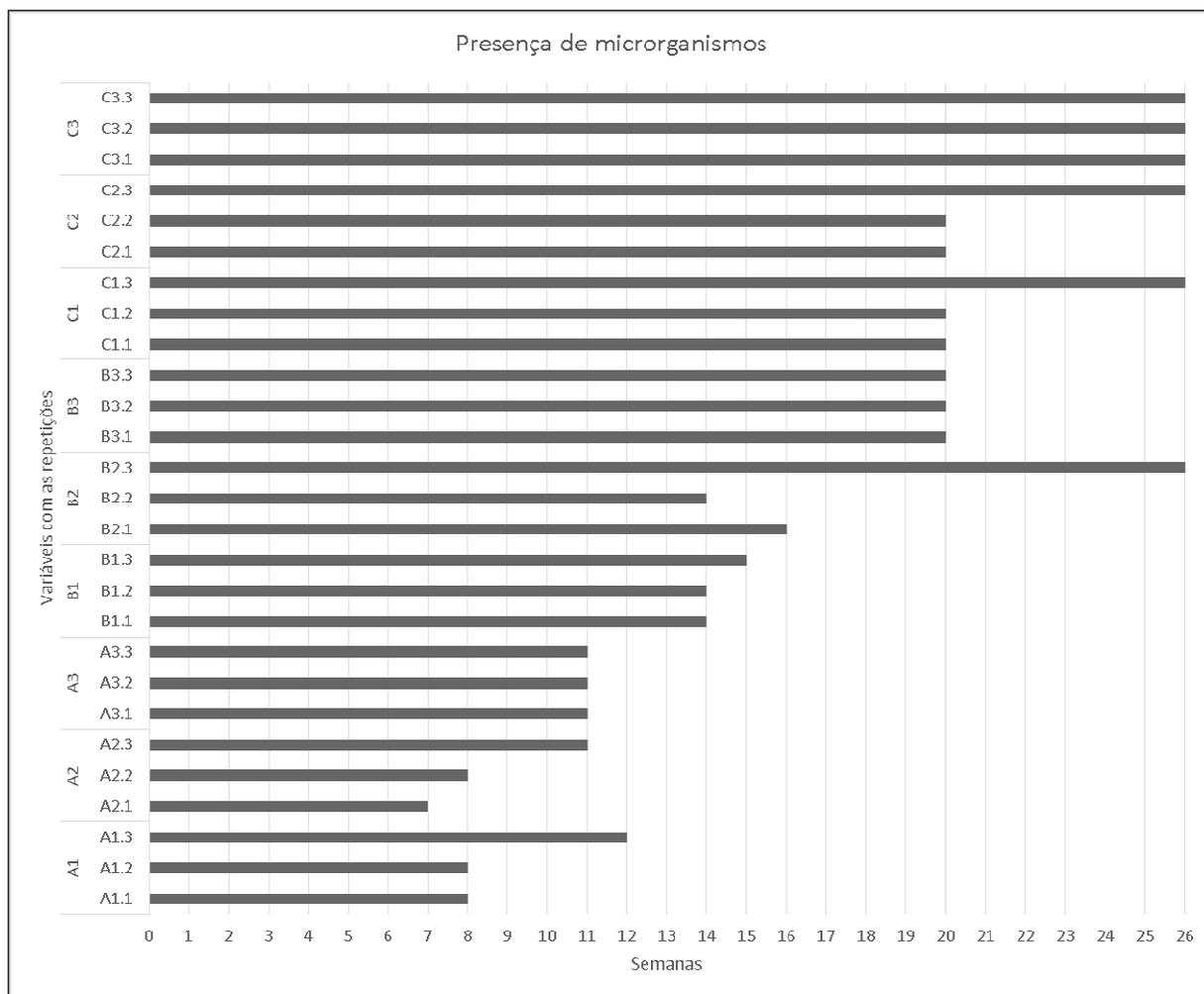


Figura 38 – Presença de microrganismos.

Também é possível identificar uma tendência de um padrão entre as repetições desproporcionais com a média. As repetições atípicas são referentes aos corpos de prova A1.3, B2.3 e C1.3. Nota-se que todos os valores atípicos são da terceira repetição das variáveis. A causa provável desse fenômeno seria o maior suprimento de água nos blocos das terceiras repetições, decorrente de um pequeno desnível na prateleira em que a câmara de ensaio estava alojada. Na Figura 39, correspondente a semana 21 de ensaio, é possível verificar maior presença de microrganismos visíveis nos corpos de prova das terceiras repetições, localizadas na porção inferior da imagem.



Figura 39 – Semana 21.

Assim como nos ensaios preconizados por Escadeillas et al. (2007), Wiktor et al. (2009) e Wiktor et al. (2011), a umidade dentro da câmara de ensaio foi considerada próxima a 100%. Escadeillas et al. (2007) consideraram a umidade relativa do ar superior à 98% devido à vedação da câmara de ensaio, não sendo realizadas verificações da umidade durante o ensaio, procedimento esse adotado no presente ensaio.

No entanto, mesmo mantendo as câmaras de ensaio vedadas, foi necessário repor água semanalmente para manter seu nível constante. A perda de água foi atribuída à necessidade de abrir a câmara de ensaio por alguns minutos para a realização da análise visual, uma vez que a umidade relativa do ar dentro da câmara era superiora a do ar na sala climatizada por ar condicionado. Ainda, verificando a coloração cinza claro dos corpos de prova de concreto, pode-se considerar que as superfícies estavam secas ou com pouca presença de água, considerando-se, dessa maneira, que a umidade relativa do ar dentro da câmara de ensaio era inferior à pretendida.

A presença de microrganismos nas repetições localizadas na área com maior nível d'água dentro da câmara identifica que o suprimento de água por ascensão capilar foi evidênte. Porém, provavelmente a baixa umidade relativa do ar dentro da câmara foi a condição decisiva para o decréscimo das manchas biológicas.

4.2.3 Microrganismos viáveis detectados

Após transcorridas as 26 semanas de ensaio, todos as variáveis foram submetidas à análise microscópica. O material da superfície dos corpos de prova de uma repetição de cada variável foi raspado com o auxílio de uma agulha cirúrgica e analisado microscopicamente. Foi detectada a presença de microrganismos em todos os corpos de prova

analisados. Contudo, apenas nas amostras C1 e C3 foi detectada a presença de alga com as mesmas características visuais da alga inoculada nos corpos de prova. A Figura 40 apresenta a imagem microscópica da lâmina de ensaio do material raspado do corpo de prova da variável C1 e a Figura 41 do corpo de prova da variável C3.

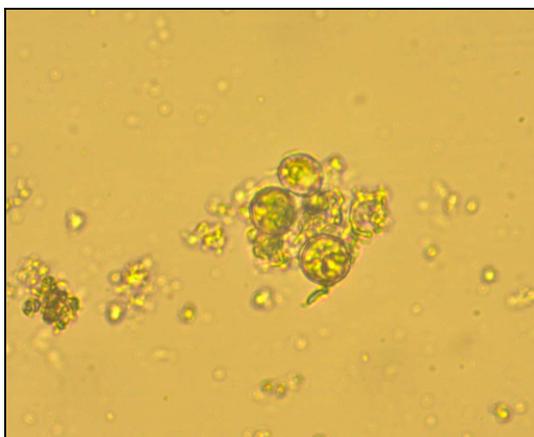


Figura 40 – Imagem microscópica da amostra C1.

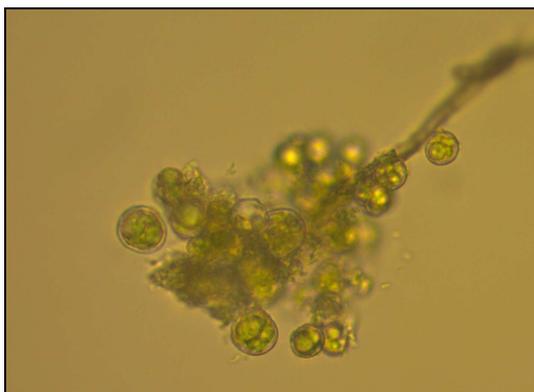


Figura 41 – Imagem microscópica da amostra C3.

A análise microscópica condiz com a análise colorimétrica visual, uma vez que estas duas variáveis apresentaram mancha biológica de coloração verde até a última idade do ensaio.

A amostra C2 foi a que apresentou maior quantidade de microrganismos durante a análise microscópica. O material raspado então foi colocado novamente em meio nutriente sólido para verificar se tais microrganismos eram viáveis para crescimento. A Figura 42 apresenta a proliferação de microrganismos no meio nutriente sólido.



Figura 42 – Microrganismos encontrados.

As placas de petri do meio nutriente sólido apresentaram crescimento de microrganismos filamentosos condizentes com as características de fungos. A presença destes microrganismos evidencia que existia no local de coleta uma interação entre a alga parcialmente isolada utilizada para a inoculação dos corpos de prova e demais microrganismos, como o encontrado na presente análise.

Conforme apresentado por Cwalina (2008), as interações entre os microrganismos envolvidos no caso de biodeterioração são complexas, sendo que muitos tipos de microrganismos podem estar envolvidos, agindo separadamente ou conjuntamente. A tentativa de isolar a alga predominante pode ter eliminado a interação entre os microrganismos presentes no processo de biodeterioração estética encontrado no local da coleta do material. Dessa forma, o material inoculado, parcialmente isolado, não se desenvolveu conforme previsto. Não surgiram as manchas biológicas com as mesmas características visuais das manchas biológicas do local de coleta do material.

5 CONCLUSÃO

O estudo evidenciou que tanto os parâmetros de rugosidade quanto os parâmetros de permeabilidade podem influenciar na biorreceptividade do concreto convencional. Levando em consideração que os parâmetros das variáveis do estudo demonstraram uma tendência para o aumento ou a diminuição da biorreceptividade do concreto, é possível valer-se desse conhecimento para a elaboração de um material esteticamente mais durável. Os tratamentos superficiais compreenderam alisamento de superfície com régua (tratamento 1), tratamento da superfície com esponja (tratamento 2) e tratamento da superfície com escova de aço (tratamento 3). As relações água/cimento foram 0,60 (traço A), 0,75 (traço B) e 0,80 (traço C).

A caracterização do concreto apresentou os parâmetros qualitativos do material para a realização do comparativo de biorreceptividade entre as variáveis. Foi possível verificar que o traço A, que apresenta relação a/c 0,60, tende a ser o mais resistente à compressão e com menor permeabilidade, seguido pelo traço B (a/c 0,75) e traço C (a/c 0,85). Este resultado está coerente com as relações água/cimento e composição de traço, pois o traço A é o que apresenta maior consumo de cimento e menor relação água/cimento. Contudo, a caracterização realizada por desgaste por abração não apresentou os resultados esperados devido à baixa resistência a compressão do concreto estudado. O ensaio de desgaste por abrasão não apresentou resultados condizentes para o parâmetro de rugosidade dos tratamentos superficiais esponja e escova no traço C, traço que apresentou menor resistência a compressão. Já nos traços A e B, o ensaio de desgaste por abrasão apresentou uma tendência em que o tratamento denominado régua, realizado com o alisamento da superfície é o tratamento superficial que apresenta menor rugosidade, seguido pelos tratamentos realizados com escova e esponja, nesta ordem.

Apesar de não ser o resultado esperado, o decrescimento das algas possibilitou avaliar a biorreceptividade das diferentes variáveis de estudo. Foi possível analisar a velocidade do decrescimento nos diferentes traços de concreto e diferentes tratamentos superficiais, evidenciando a tendência biorreceptiva dos materiais. Foi possível identificar uma tendência em que o concreto com menor relação a/c e maior consumo de cimento é o concreto menos biorreceptivo, pois as algas nesta variável foram as primeiras a desaparecer da superfície dos corpos de prova. Ainda, o concreto com maior relação a/c e menor consumo

de cimento tende a ser o mais biorreceptivo, pois nele a mancha biológica permaneceu presente até a última idade de ensaio.

Quanto aos tratamentos superficiais, mesmo embora o desgaste por abrasão ter comprometido a identificação do parâmetro de rugosidade das variáveis esponja e régua do traço C, foi possível identificar uma tendência em que o concreto com menor rugosidade é o menos biorreceptivo. Isso foi possível porque o índice de desgaste a abrasão conseguiu identificar que a variável denominada régua tende a apresentar a menor rugosidade para todos os traços.

A provável baixa umidade relativa do ar dentro da câmara de ensaio influenciou no decréscimo das manchas biológicas devido a diminuição do suprimento de água na superfície dos corpos de prova. Porém, quando os corpos de prova ficaram mais próximos do nível d'água, como no caso dos corpos de prova da terceira repetição, a ascensão capilar foi eficiente.

Com o auxílio da análise microscópica foi possível identificar microrganismos presentes em todos os corpos de prova do ensaio, apesar de não ser evidenciada mancha biológica visível em todos os corpos de prova. Ainda, a análise microscópica permitiu detectar a presença de algas com as mesmas características visuais da alga inoculada, evidenciando a viabilidade da alga parcialmente isolada e coletada *in loco*. Porém, a inoculação da alga isolada comprometeu a proliferação, pois não foram reproduzidas em laboratório as complexas interações entre microrganismos presentes *in loco*.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensaio acelerado de biodeterioração apresentou resultados significativos, sendo possível a análise da biorreceptividade do material. Quanto maior a relação água/cimento, maior a biorreceptividade e quanto menor a rugosidade, menor a biorreceptividade. No entanto, o estudo não apresentou o crescimento da mancha biológica devido provavelmente à deficiência no suprimento de água.

Este estudo pode auxiliar na produção de um material mais durável, uma vez que os resultados encontrados evidenciam a possibilidade de se trabalhar com os parâmetros do concreto para a obtenção de um material que venha a apresentar menos manifestações de manchas biológicas ao longo da sua vida útil.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se ampliar as variáveis de estudo, afim de garantir estimativas mais condizentes com a realidade. O estudo poderá ser aplicado em concretos especiais, por exemplo. Também é válida a adaptação da metodologia proposta para a inoculação de mais de um microrganismo, permitindo o conhecimento da relação entre os microrganismos. Ainda, sugere-se adaptar as condições de umidade dentro da câmara de ensaio, pois foi identificado que a umidade é a condição de ensaio determinante para manter a viabilidade dos microrganismos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLSOPP, D; SEAL, K.J.; GAYLARDE, C.C. **Introduction to Biodeterioration**. 2.ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 2004.
- ARIÑO, X.; GOMES-BOLEA, A.; SAIZ-JIMENEZ. Lichens on ancient mortars. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.40, n.2-4, p.217-224, 1997.
- BAI, J. Durability of sustainable concrete materials. **Sustainability of construction materials**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, p. 239-253, 2009.
- BARBEROUSSE, H. **Etude de la diversité des algues et des cyanobactéries colonisant les revêtements de façade em France et recherche des facteurs favorisant leur implantation**. 2006. 193f. Tese (Doutorado do Museu Nacional de História Natural) – Paris, França. 2006.
- BARBEROUSSE, H.; RUOT, B.; YÉPRÉMIAN, C.; BOULON, G. An assessment of façade coatings against colonization by aerial algae and cyanobacteria. **Building and Environment**, v.42, p.2555-2561, 2007.
- BERSCH, R. A. **Avaliação da ação da florescência em cerâmica vermelha com adição de lodo de fosfatização**. 112p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.
- BICUDO, Carlos E. de M.; MENEZES, Mariângela. Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições. Rima, 2006.
- CRISPIM, C.A.; GAYLARDE, P.M.; GAYLARDE, C.C. Algal and cyanobacterial biofilms on calcareous historic buildings. **Current Microbiology**, v.46, p.79-82, 2003.
- CWALINA, B. Biodeterioration of concrete. **Architecture Civil Engineering Environment**. The Silesian University of Technology, n.4, p.133-139, 2008.
- DE MUYNCK, Willem et al. Evaluation of anti-fouling strategies on aerated concrete by means of an accelerated algal growth test. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR)**, Cape Town, South Africa. 2008. p. 131-132.
- DE MUYNCK, W.; RAMIREZ, A.M.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Evaluation of strategies to prevent algal fouling on white architectural and cellular concrete. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.63, p.679-689, 2009.
- DERUELLE, S. Rôle du support dans la croissance des microorganismes. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, v.24, p.163-168, 1991.

DUBOSC, A.; ESCADEILLAS, G.; BLANC, P.J. Characterization of biological stains on external concrete walls and influence of concrete as underlying material. **Cement and Concrete Research**, v.31, p.1613-1617, 2001.

ESCADEILLAS, Gilles; BERTRON, A.; BLANC, PHILIPPE; DUBOSC, A. Accelerated testing of biological stain growth on external concrete walls. Part 1: Development of the growth tests. **Materials and structures**, v.40, n.10, p.1061-1071, 2007.

FILLA, J. C.; AUDIBERT, J. L.; MORALES, G. Biodeterioração de concretos e argamassas. **Téchne**, n.157, 2010.

GIANNANTONIO, D. J.; KURTH, J. C.; KURTIS, K. E.; SOBECKY, P. A. Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.63, n.3, p.252-259, 2009.

GUILLETTE, O.; DREESEN, R. Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials. **The Science of the Total Environment**, v.167, p.365-374, 1995.

GU, J.; FORD, T.E.; BERKE, N.S.; MITCHELL, R. Biodeterioration of concrete by the fungus *Fusarium*. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.41, p.101-109, 1998.

HALLIDAY, M. H. F. **Recuperação do concreto armado**. 2008. 125f. Monografia (Especialização em Inspeção, Manutenção e Recuperação de Estruturas) – Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de Pernambuco, Pernambuco. 2008.

HOOTON, R. Doug; BICKLEY, John A. Design for durability: the key to improving concrete sustainability. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 422-430, 2014.

JAYAKUMAR, S.; SARAVANANE, R. Biodeterioration of coastal concrete structures by Macro algae - *Chaetomorpha antennina*. **Materials Research**, v.12, n.4, p.465-472, 2009.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. 56f. Monografia (Especialização em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2008.

MACKECHNIE, J. R.; ALEXANDER, M. G. Using durability to enhance concrete sustainability. **Journal of Green Building**, v. 4, n. 3, p. 52-60, 2009.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, 2008.

MILLER, A.Z.; DIONÍSIO, A.; LAIZ, L.; MACEDO, M.F.; SAIZ-JIMENEZ, C. The influence of inherent properties of building limestones on their bioreceptivity to phototrophic microorganisms. **Annals of Microbiology**, v.59, n.4, 2009.

- MITCHELL, R.; GU, J.D. Changes in the biofilm microflora of limestone caused by atmospheric pollutants. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.46, p.299-303, 2000.
- MORA, Eduardo Peris. Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. **Building and Environment**, v. 42, n. 3, p. 1329-1334, 2007.
- MÜLLER, Harald S. et al. Design and properties of sustainable concrete. *Procedia Engineering*, v. 95, p. 290-304, 2014a.
- MÜLLER, Harald S.; HAIST, Michael; VOGEL, Michael. Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 321-337, 2014b.
- MURRAY, M. G.; THOMPSON, W. Fm. Rapid isolation of high molecular weight plant DNA. **Nucleic acids research**, v. 8, n. 19, p. 4321-4326, 1980.
- NEVILLE, Adam M.; BROOKS, Jeffrey John. **Tecnologia do Concreto**. Bookman Editora, 2013.
- ORTEGA-CALVO, J.J.; ARIÑO, X.; HERNANDEZ-MARINE, M.; SAIZ-JIMENEZ, C. Factors affecting the weathering and colonization of monuments by phototropic microorganisms. **The Science of the Total Environment**, v.167, p.329-341, 1995.
- PERRICHET, A. Développement de microorganismes à la surface des bétons et enduits. **Matériaux et Constructions**, v.17. n.98, 1984.
- PRIETO, B.; SILVA, B. Estimation of the potential bioreceptivity of granitic rocks from their intrinsic properties. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.56, p.206-215, 2005.
- ROQUE, J. A.; MORENO JUNIOR, A. L. **Considerações sobre vida útil do concreto**. In I Encontro Nacional de pesquisa-Projeto-Produção de Concreto Pré-moldado. 2005. Ed. Unicamp. São Carlos, 2005. Disponível em http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/125.pdf. Acesso em Julho de 2015.
- SANTOS, L. C. **Biodeterioração do concreto**. XII Encontro Anual de Iniciação Científica, Foz do Iguaçu, 02 a 05 de setembro de 2003. Disponível em: http://www.ppg.uem.br/Docs/pes/eaic/XII_EAIC/palestras/4.pdf. Acesso em: abril 2013.
- SHIRAKAWA, M. A. **Estudo da biodeterioração do concreto por *Thiobacillus***. 1994.137f. Dissertação (Mestrado). São Paulo. 1994.

SHIRAKAWA, M. A.; BEECH, I. B.; TAPPER, R.; CINCOTTO, M. A.; GAMBALE, W. The development of a method to evaluate bioreceptivity of indoor mortar plastering to fungal growth. **International biodeterioration & biodegradation**, v.51, n.2, p.83-92, 2003.

SILVA, M. R.; PINHEIRO, S. M. M. Microorganisms and asthetic biodeterioration of concrete and mortar. In: Second International RILEM Workshop on Microbial Impact on Building Materials. Ed. M. Ribas Silva. RILEM publications SARL, p. 47-54, 2004.

Disponível em:

<http://www.rilem.org/gene/main.php?base=500218&id_publication=49&id_papier=255>.

Acesso em maio 2013.

STERFLINGER, K. Fungi as geologic agents. **Geomicrobiology Journal**, v.17, p.97-124, 2000.

TIANO, P. Biodegradation of cultural heritage: decay mechanisms and control methods. 2002. Disponível em: <<http://www.arcchip.cz/w09/w09tiano.pdf>>. Acesso em maio 2015.

TOMASELLI, L.; LAMENTI, G.; BOSCO, M.; TIANO, P. Biodiversity of photosynthetic micro-organisms dwelling on stone monuments. **International biodeterioration & biodegradation**, v.46, p.251-258, 2000.

TRAN, T. H.; GOVIN, A.; GUYONNET, R.; GROSSEAU, P.; LORS, C.; GARCIA-DIAZ, E.; RUOT, B. Influence of the intrinsic characteristics of mortars on biofouling by *Klebsormidium flaccidum*. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.70, p.31-39, 2012.

URZÌ, C.; DE LEO, F. Evaluation of the efficiency of water-repellent and biocide compounds against microbial colonization of mortars. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.60, p.25-34, 2007.

WARSCHEID, T.; BRAAMS, J. Biodeterioration of stone: a review. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.46, p.343-368, 2000.

WARSCHEID, T.; OELTING, M.; KRUMBEIN, W.E. Physiochemical aspects of biodeterioration processes on rocks with special regard to organic pollutants. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.28, p.37-48, 1991.

WEI, S.; SANCHEZ, M.; TREJO D.; GILLIS, C. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures. **International Biodeterioration & Biodegradation**, n.64, p. 748-754, 2010. Disponível em:

<http://www.cugb.edu.cn/upload/20600/papers_upload/news_2011429151238.pdf>. Acesso em: abril 2013.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto com ênfase na carbonatação.**162p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

WIKTOR, V.; DE LEO, F.; URZÌ, C.; GUYONNET, R.; GROSSEAU, P.H.; GARCIA-DIAZ, E. Accelerated laboratory test to study fungal biodeterioration of cementitious matrix. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.63, n.8, p.1061-1065, 2009.

WIKTOR, V.; GROSSEAU, P.; GUYONNET, R.; GARCIA-DIAZ, E.; LORS, C. Accelerated weathering of cementitious matrix for the development of an accelerated laboratory test of biodeterioration. **Materials and structures**, v.44, n.3, p.623-640, 2010.

