



PUC-SP

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**

**FERNANDA DE OLIVEIRA SANTANA
JULIA MACHADO YOUSSEF ANDERY
SABRINA MELO ANDRADE DE FARIAS
WEIDA PIRES DA ROCHA**

**CONCRETOS AUTORREGENERATIVOS: TIPOLOGIAS, POTENCIALIDADES E
MECANISMOS DE COMBATE À FISSURAÇÃO EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

São Paulo

2023



Pontifícia Universidade Católica de São Paulo

FERNANDA DE OLIVEIRA SANTANA
JULIA MACHADO YOUSSEF ANDERY
SABRINA MELO ANDRADE DE FARIAS
WEIDA PIRES DA ROCHA

**CONCRETOS AUTORREGENERATIVOS: TIPOLOGIAS, POTENCIALIDADES E
MECANISMOS DE COMBATE À FISSURAÇÃO EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Banca Examinadora da
Pontifícia Universidade Católica de São
Paulo, como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil,
sob a orientação da Prof^a. Dr^a. Karen Niccoli
Ramirez.

São Paulo

2023

FERNANDA DE OLIVEIRA SANTANA
JULIA MACHADO YOUSSEF ANDERY
SABRINA MELO ANDRADE DE FARIAS
WEIDA PIRES DA ROCHA

**CONCRETOS AUTORREGENERATIVOS: TIPOLOGIAS, POTENCIALIDADES E
MECANISMOS DE COMBATE À FISSURAÇÃO EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação da Prof^a. Dr^a. Karen Niccoli Ramirez.

Aprovado em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Karen Niccoli Ramirez – PUC-SP (Orientadora)

Dra. Mariana de Almeida Motta Rezende – PUC-SP

Me. Matheus Lorena Gonçalves Marquesi – PUC-SP

RESUMO

A utilização de estruturas de concreto é uma prática comum em diversas construções. No entanto, essas estruturas podem apresentar manifestações patológicas como fissuras, trincas e rachaduras, que comprometem sua durabilidade. Diante dessa problemática, os concretos autorregenerativos se mostram altamente benéficos, não apenas para aumentar a vida útil da estrutura, mas também para diminuir a necessidade de manutenção. Esta pesquisa tem como objetivo detalhar as tipologias do concreto autorregenerativo e analisar espécies de concretos com essa capacidade. Dando ênfase na autorregeneração autônoma, destacam-se suas características, vantagens e o processo de regeneração de fissuras por meio da incorporação de agentes cicatrizantes. A metodologia baseia-se na revisão sistemática da literatura, apresentando estudos e pesquisas que mostram a composição e funcionamento do concreto autorregenerativo a partir da adição de bactérias, polímeros, aditivos cristalizantes, minerais e fibras, com a adição do agente cicatrizante podendo ser utilizada em cápsulas, tubos vasculares ou diretamente. Também são apresentados estudos de caso que evidenciam os resultados esperados em aplicações práticas, considerando a influência do ambiente e das condições de exposição. Por fim, o trabalho analisa as diferentes tipologias de concretos autorregenerativos e destaca suas potencialidades e mecanismos que atuam no combate à fissuração, reconhecendo a complexidade que a tecnologia apresenta, além de ressaltar possibilidades para estudos futuros acerca do tema.

Palavras-chave: concreto autorregenerativo, estruturas de concreto, fissuras, durabilidade, autorregeneração autônoma.

ABSTRACT

The use of concrete structures is a common practice in various construction projects. However, these structures can exhibit pathological manifestations such as cracks and fissures, which compromise their durability. Given this issue, self-healing concretes prove to be highly beneficial, not only for extending the service life of the structure but also for reducing the need for maintenance. This article intends to elaborate on the typologies of self-healing concrete and analyze various species of concrete with this capability. Focusing on autonomous self-healing, it highlights its characteristics, advantages, and the process of healing cracks through the incorporation of healing agents. The methodology is based on a systematic literature review, presenting studies and research that demonstrate the composition and functioning of self-healing concrete through the addition of bacteria, polymers, crystalline additives, minerals and fibers, with the healing agent being added in capsules, vascular tubes, or directly. Case studies are also presented to illustrate the expected results in practical applications, considering the influence of the environment and exposure conditions. Finally, the study analyzes the different typologies of self-healing concretes and highlights their potentials and mechanisms that act in combating cracking, recognizing the complexity that the technology presents, as well as emphasizing possibilities for future studies on the subject.

Keywords: self-healing concrete, concrete structures, cracks, durability, autonomous regeneration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de mecanismo para concreto autorregenerativo	11
Figura 2 – Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão	20
Figura 3 – Evolução da quantidade de artigos publicados ao longo do tempo	24
Figura 4 – Concreto autorregenerativo autógeno e autônomo	26
Figura 5 – Agentes causadores da autorregeneração	27
Figura 6 – Processo e reação química da carbonatação	28
Figura 7 – Microcápsulas feitas de gelatina de porco e contendo 50% de silicato de sódio e 50% de óleo	31
Figura 8 – Autorregeneração autônoma baseada em cápsulas	32
Figura 9 – Autorregeneração autônoma vascular	32
Figura 10 – Esquema de um tendão de polímero com memória de forma	33
Figura 11 – Esquema mostrando o mecanismo potencial de autovedação de fissuras usando PSA	34
Figura 12 – Precipitação de CaCO_3 a partir da uréase	36
Figura 13 – Mecanismo de reparo de fissuras por bactérias	37
Figura 14 – (a) concreto fissurado (b) bioconcreto fissurado (c) 100 dias após do concreto fissurado (d) 100 dias após do bioconcreto fissurado	38
Figura 15 – Autorregeneração de fissuras precoces e estruturais sob quatro tipos de exposição	40
Figura 16 – Autorregeneração de fissuras em diferentes argamassas	43
Figura 17 – Processo de fissuração e autorregeneração com e sem fibras de PVA .	45
Figura 18 – Cura com água deionizada	46
Figura 19 – Cura com água deionizada e CO_2	46
Figura 20 – Cura em água ionizada	47
Figura 21 – Cura com água ionizada e CO_2	47
Figura 22 – Amostra de concreto autorregenerativo com ação dos GARS	48
Figura 23 – Esquematização do Processo de autorregeneração	49
Figura 24 – Mapa da média pluviométrica no Brasil entre 1977 e 2006	55
Figura 25 – Esquema da estrutura de obra subterrânea	57
Figura 26 – Morfologia do bioconcreto	58
Figura 27 – Fissura da amostra do bioconcreto	59

Figura 28 – Fissura da amostra do concreto comum	60
Figura 29 – Processo de autorregeneração por microcápsulas	61
Figura 30 – Modelo digital da estrutura do painel de ensaio	62
Figura 31 – Modelo real da estrutura do painel de ensaio	63
Figura 32 – Esquema da aplicação dos dois tipos de concreto	65
Figura 33 – Aplicação na região A	65
Figura 34 – Aplicação na região B	66
Figura 35 – Resultados após seis meses	66
Figura 36 – Laje de subpressão já concluída com as fôrmas dos pilares do 2º subsolo	68
Figura 37 – Cobertura fluida de concreto autorregenerativo do Museu de Arte do Rio - M.A.R. – RJ	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resistência à compressão concreto convencional vs. bioconcreto 52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 Metodologia	13
1.3 Justificativa	15
1.4 Estrutura da pesquisa	16
2 CONCRETO	19
2.1 Composição do concreto	19
2.2 Propriedades e características do concreto	20
2.3 Manifestações patológicas no concreto	21
2.3.1 Fissuras	21
3 CONCRETO AUTORREGENERATIVO	23
3.1 Histórico do concreto autorregenerativo	23
3.2 Composição do concreto autorregenerativo	25
3.2.1 Concreto Autorregenerativo Autógeno	26
3.2.2 Propriedades e características do concreto autorregenerativo ...	28
4 CONCRETO AUTORREGENERATIVO AUTÔNOMO	30
4.1 Polímeros	33
4.2 Bactérias	35
4.3 Aditivos cristalizantes	38
4.4 Aditivos minerais	41
4.5 Fibras	43
5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CONCRETO AUTORREGENERATIVO .	50
5.1 Durabilidade	50
5.2 Resistência mecânica	51
5.3 Custos	52

5.4 Redução de impacto ambiental	53
5.5 Sensibilidade ao ambiente	54
6 ESTUDOS DE CASO	57
6.1 Aplicação de bioconcreto em uma obra subterrânea	57
6.2 Primeira grande aplicação de concreto autorregenerativo no Reino Unido	60
6.3 Aplicação de concreto autorregenerativo em uma cortina de contenção	64
6.4 Aplicação de concreto com aditivo cristalizante no Museu da Imagem e do Som – RJ	67
6.5 Aplicação de concreto com aditivo cristalizante no Museu de Arte do Rio – RJ	68
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
8 REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

Devido à baixa resistência à tração do concreto, é comum o surgimento de fissuras nesses elementos. Tais fissuras podem se manifestar de diversas formas e são decorrentes de diferentes mecanismos, podendo surgir antes ou após o endurecimento do concreto (MOLIN, 1988). Elas surgem nas estruturas devido às tensões aplicadas no material quando estas superam sua capacidade de resistência mecânica, podendo comprometer tanto a estética quanto a durabilidade e a integridade da estrutura. (CORSINI, 2010).

Em geral, as fissuras permitem a entrada de substâncias na estrutura que causam a sua degradação, podendo comprometer a sua segurança e estabilidade, e levar a sua ruína (ZAGO, 2021).

Neste cenário, a utilização do concreto autorregenerativo mostra-se interessante e benéfica, uma vez que é definido principalmente pela capacidade de reparar suas pequenas fissuras de forma autônoma. Recentemente, o desenvolvimento da tecnologia desse material tornou-se um objeto de estudo relevante para os pesquisadores em biotecnologia e ciências da engenharia civil (TALAIEKHOZANI e MAJID, 2014).

De acordo com Rooij *et al.* (2013), é possível dividir a autorregeneração do concreto em dois tipos: cicatrização autógena e cicatrização autônoma. A cicatrização autógena está relacionada ao material e é causada pelos próprios fatores presentes no concreto. Por outro lado, a cicatrização autônoma é aquela que ocorre devido a aditivos que são incluídos na mistura do concreto na sua fase inicial.

A cicatrização autógena é um mecanismo que ocorre naturalmente para reparar as fissuras, sem depender de intervenções externas. Esse processo é uma das principais razões pelas quais muitos edifícios e estruturas antigas conseguiram resistir ao longo do tempo, mesmo com pouca assistência técnica e manutenção (LIMA, 2021).

De acordo com Talaiekhosani e Majid (2014), vários processos autógenos são propostos para a autorregeneração do concreto, e podem ser divididos entre naturais, químicos e biológicos.

Os processos naturais incluem formação de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio, bloqueio de rachaduras por impurezas na água, hidratação adicional do

cimento não reativo ou materiais cimentícios e expansão da matriz cimentícia hidratada no flanco da fissura (inchaço de C–S–H). Os biológicos ocorrem por meio da precipitação de carbonatos de cálcio e de silicato de ferro-alumínio polimórfico, a qual é realizada por fungos, bactérias, microrganismos mesófilos ou microrganismos termopílicos. Por último, os processos químicos de autorregeneração podem ser feitos pelo modo passivo ou ativo (TALAIKHOZANI e MAJID, 2014). Khattab, Shekha e Abdi (2019) afirmam que fissuras de concreto podem ser curadas parcialmente por vários processos naturais, conforme representado na Figura 1.

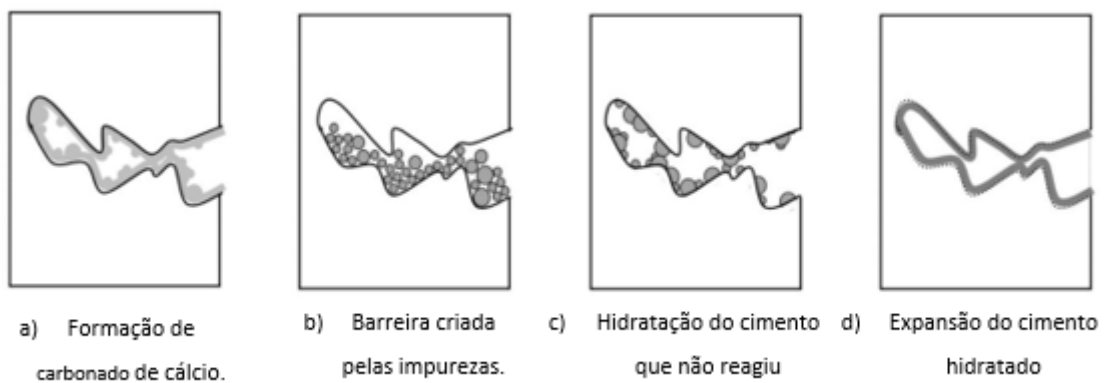


Figura 1: Tipos de mecanismo para concreto autorregenerativo
 Fonte: Adaptado de TALAIKHOZANI e MAJID (2014, p.3)

Em processos naturais, quatro fenômenos podem bloquear as fissuras, conforme Figura 1: (a) o desenvolvimento de camada de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio; (b) impurezas na presença de água; (c) a hidratação do cimento que não reagiu e (d) a expansão do cimento hidratado nas paredes da trinca (inchaço do gel de hidrato de silicato de cálcio) (TALAIKHOZANI e MAJID, 2014).

De acordo com Talaiekhazani e Majid (2014), em muitos casos, mais de um desses processos ou mecanismos podem acontecer simultaneamente. De fato, a maioria desses mecanismos pode preencher apenas parcialmente a entrada de algumas fissuras e não pode preenchê-las completamente. A autorregeneração natural do concreto é útil para evitar o desenvolvimento de fissuras e prevenir a penetração profunda de produtos químicos nocivos, como ácidos.

A cicatrização autônoma ocorre como resultado de uma intervenção externa, em que são adicionados à mistura original do concreto componentes como cinza volante e materiais expansivos. Essas inclusões na composição do concreto durante

a mistura inicial são responsáveis por desencadear o processo de cicatrização autônoma. Esta ocorre quando são utilizados materiais que normalmente não estariam presentes na composição original do concreto, mas foram adicionados com o objetivo de promover tal processo (ROOJI *et al.*, 2013).

De acordo com Moreira (2017), esse tipo de cicatrização refere-se à capacidade de cura do concreto por conta de componentes adicionais introduzidos propositalmente na matriz de cimento. Estes componentes, em ambiente que apresente certo grau de umidade, acabam por catalisar o processo de cura, podendo ainda selar a fissura.

A cicatrização autônoma pode ocorrer por diferentes processos. Segundo Van Tittelboom e De Belie (2013), a cicatrização pode ocorrer por meio da utilização de cápsulas ou sistemas vasculares que contenham agentes cicatrizantes. Esses agentes são liberados em resposta à fissuração do concreto e podem reagir ou não com um segundo componente presente na matriz de cimento.

De acordo com Takagi *et al.* (2013), é possível também alcançar a cicatrização autônoma por meio da utilização de catalisadores cristalinos como agentes cicatrizantes. Os catalisadores atuam como hidrofílicos impermeabilizantes, e consomem o Ca(OH)_2 para formar produtos cristalinos que desobstruem poros no concreto e preenchem as fissuras.

As bactérias extremófilas, que têm a habilidade de sobreviver durante longos períodos em ambientes alcalinos, como o concreto, também podem atuar como agentes autocicatrizantes quando incorporadas nele (WIKTOR e JONKERS, 2011).

Outra possibilidade, apresentada por Lee, Wong e Buenfeld (2016) é a utilização de polímeros com capacidade de retenção de líquido em sua estrutura para formar um hidrogel insolúvel. Quando expostos à umidade proveniente do transporte através da fissura, esses polímeros sofrem expansão volumétrica, permitindo o preenchimento completo da fissura, sem exercer tensões de tração durante o processo.

A presente pesquisa aborda os tipos de concreto autorregenerativo, bem como suas potencialidades e mecanismos de combate à fissuração em estruturas de concreto, apresentando os estudos em desenvolvimento e realizando as análises necessárias para este fim.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar e categorizar as diferentes tipologias de concretos autorregenerativos, destacando suas potencialidades e elucidando os mecanismos pelos quais atuam no combate à fissuração, visando contribuir para avanços e aplicações laboratoriais e práticas na engenharia civil.

1.1.2 Objetivos Específicos

Identificar e descrever as principais tipologias de concretos autorregenerativos disponíveis na literatura e no mercado.

Descrever os diferentes mecanismos de ação dos concretos autorregenerativos, sejam autônomos ou autógenos, encapsulados ou capsulados, destacando inclusive a ação dos agentes com capacidade de regeneração focando em sua atuação e reparos de fissuras.

Investigar as possíveis limitações e desafios na aplicação de concretos autorregenerativos em estruturas de concreto.

Apresentar estudos de caso em que se fizeram necessário a utilização do concreto autorregenerativo, a fim de ilustrar uma aplicação prática e real em estruturas de concreto.

Realizar uma análise crítica dos resultados obtidos, avaliando as potencialidades e mecanismos da utilização dos concretos autorregenerativos em estruturas de concreto.

1.2 Metodologia

A metodologia utilizada para a elaboração desta pesquisa consiste na revisão sistemática da literatura acerca do tema, com a busca, de forma exploratória e descritiva, em artigos científicos, monografias, livros, dissertações e teses que tratam sobre a utilização de concretos autorregenerativos como material de construção em estruturas de concreto. Foram utilizados como base de dados *online* o Social Science

Research Network, SpringerLink, Science Direct, IOP Science e *Google Acadêmico*, utilizando as principais palavras-chave: estruturas de concreto, bioconcreto, concreto autorregenerativo, aditivos cristalizantes, autorregeneração autônoma, autorregeneração autógena e demais termos associados ao assunto.

Para análise dos resultados, foram considerados estudos que abordassem o concreto autorregenerativo a partir da adição de bactérias, polímeros, aditivos cristalizantes, minerais e fibras, sendo a adição do agente cicatrizante em cápsulas, tubos vasculares ou direta.

Esta pesquisa bibliográfica e documental tem abordagem quantitativa e qualitativa, a fim de relacionar os dados obtidos em relação à composição, tipos e propriedades do concreto autorregenerativo, que são apresentados em forma de gráficos e infográficos para melhor visualização e interpretação.

A pesquisa se dividiu em várias etapas. Na primeira etapa, foi realizado o contexto do estudo, elaborando um levantamento histórico das principais pesquisas relacionadas ao tema da autorregeneração do concreto, além de definir a composição tanto do concreto convencional quanto do concreto autorregenerativo. Também conduziu-se uma investigação sobre as propriedades e características mecânicas destes para que fosse possível realizar uma comparação entre o concreto convencional e o concreto autorregenerativo. Além disso, nesta etapa, foram examinadas as principais causas de fissuras e manifestações patológicas em elementos de concreto.

Na segunda etapa da pesquisa, realizou-se uma classificação dos tipos de autorregeneração, com uma análise detalhada dos principais mecanismos e agentes que promovem a autorregeneração autônoma do concreto.

Após uma pesquisa detalhada sobre esse tópico, um levantamento e análise de estudos de caso foi desenvolvido, tanto em um contexto internacional quanto nacional, sobre a aplicação prática do concreto autorregenerativo em estruturas de concreto, a fim de compreender suas vantagens e desvantagens em relação ao concreto convencional e desenvolver uma análise crítica dos resultados obtidos, avaliando sua viabilidade técnica em obras de engenharia civil.

Por fim, com base na literatura revisada, considerando os tipos de agentes cicatrizantes abordados nesta pesquisa, apresentaram-se as principais vantagens e

desvantagens que o concreto autorregenerativo pode oferecer em diferentes aspectos em comparação ao concreto convencional.

1.3 Justificativa

A utilização de estruturas de concreto é comum em diversas construções, seja em edifícios, pontes ou outras obras de infraestrutura. Entretanto, essas estruturas podem apresentar manifestações patológicas como fissuras, trincas e rachaduras.

Segundo Van Tittelboom e De Belie (2013), a presença de fissuras em estruturas de concreto pode comprometer sua durabilidade, pois substâncias líquidas e gasosas nocivas para a estrutura podem penetrar por meio dessas fissuras e trincas causando danos. Conseqüentemente, as fissuras podem se alargar e a armadura pode ficar exposta ao ambiente. Uma vez que o processo de corrosão da armadura é iniciado, a estrutura como um todo pode acabar entrando em colapso. Portanto, fica claro que a verificação, conservação e manutenção das fissuras no concreto são fundamentais.

De acordo com Medeiros *et al.* (2011), quando se trata de estruturas executadas com concreto e projetadas para durar mais tempo, a redução da sua durabilidade resulta em um incremento no uso de matérias-primas, liberação de compostos prejudiciais ao meio ambiente, despesas de energia e custos suplementares para efetuar reparos, reformas e manutenção. Em tais situações, estender a vida útil das estruturas pode ser uma solução benéfica a longo prazo para preservar os recursos naturais, reduzir o impacto ambiental, economizar energia e prolongar a capacidade de extrair as reservas naturais.

Os concretos autorregenerativos, ou *self-healing concrete*, se apresentam como alternativa altamente benéfica, melhorando a vida útil do concreto e o reparo de manifestação patológicas, como fissuras e rachaduras, diminuindo a necessidade e custos de manutenção, conforme Van Tittelboom e De Belie (2013).

Deste modo, este trabalho justifica-se pela urgência em consolidar informações sobre as tipologias de concretos autorregenerativos, elucidar seus mecanismos e potencialidades, e, assim, oferecer subsídios para a sua aplicação mais eficiente e eficaz em estruturas de concreto. A análise e categorização propostas visam preencher lacunas no entendimento do tema e, conseqüentemente, contribuir

significativamente para a literatura especializada e para a prática profissional na área de engenharia civil.

1.4 Estrutura da pesquisa

Capítulo 1: Introdução, objetivos, metodologia, justificativa e estrutura da pesquisa

No primeiro capítulo, é apresentada inicialmente uma introdução que contextualiza o tema central da pesquisa, fornecendo uma visão geral e preparando o leitor para os tópicos subsequentes. A seção objetivo geral destaca a principal meta que a pesquisa pretende atingir, traçando um panorama amplo da finalidade do estudo. Em objetivos específicos, delineiam-se as metas mais detalhadas e específicas que, em conjunto, direcionam o trabalho em direção ao objetivo geral. A seção de metodologia expõe as técnicas e abordagens adotadas na pesquisa, esclarecendo como os dados foram coletados e analisados. Na justificativa, é ressaltada a relevância do estudo, elucidando sua importância no contexto acadêmico e prático. Finalmente, a estrutura da pesquisa fornece uma visão geral de como o trabalho está organizado, facilitando a compreensão do leitor sobre a disposição dos temas e a progressão do estudo.

Capítulo 2: Concreto

No segundo capítulo, aborda-se inicialmente a composição do concreto, elucidando os componentes fundamentais e suas respectivas funções na mistura. Em seguida, na seção propriedades e características do concreto, são detalhadas as qualidades intrínsecas e externas deste material, explorando sua resistência mecânica, durabilidade, entre outros aspectos técnicos que o tornam adequado para diferentes aplicações na construção civil. Por fim, a seção manifestações patológicas no concreto aborda alguns das principais potenciais falhas e defeitos que podem surgir em estruturas de concreto ao longo do tempo e a prevenção e reparo desses problemas utilizando concreto autorregenerativo.

Capítulo 3: Concreto Autorregenerativo

No terceiro capítulo, faz-se um histórico do concreto autorregenerativo, traçando um panorama da evolução deste material inovador, desde suas primeiras

concepções até as aplicações mais recentes e avanços tecnológicos. A seção subsequente, composição do concreto autorregenerativo, aprofunda-se nos componentes fundamentais que conferem a este tipo de concreto a capacidade única de autorregeneração, detalhando os elementos e processos que permitem a autocura de fissuras e imperfeições.

Capítulo 4: Concreto Autorregenerativo Autônomo

No quarto capítulo, é explorado o tema do concreto autorregenerativo autônomo, dando ênfase ao revolucionário avanço tecnológico que permite ao concreto a capacidade de autocura. O foco está na compreensão dos mecanismos e componentes que conferem essa propriedade de recuperação autônoma e seus processos microscópicos. O estudo detalha como as reações químicas internas e os materiais incorporados contribuem para a regeneração de fissuras e imperfeições, revolucionando assim a forma como as estruturas de concreto são percebidas e utilizadas no setor da construção.

Capítulo 5: Vantagens e Desvantagens do Concreto Autorregenerativo

No quinto capítulo, é analisado o concreto autorregenerativo, enfatizando suas vantagens e desvantagens. Destacando-se sua durabilidade ampliada pela autocura e comparativa resistência mecânica ao concreto tradicional. Abordam-se os custos de produção, benefícios a longo prazo e minimização dos impactos ambientais considerando a menor necessidade de manutenção. Além disso, é avaliada a performance deste material em variadas condições ambientais e climáticas.

Capítulo 6: Estudos de casos e aplicações

No sexto capítulo, são apresentados alguns estudos de casos, oferecendo uma visão prática e aplicada de temas previamente discutidos. A partir da análise de casos reais, busca-se demonstrar a eficácia, os desafios e os resultados tangíveis de determinadas abordagens e tecnologias em contextos específicos. Esta análise criteriosa visa não apenas validar teorias, mas também elucidar aprendizados práticos, permitindo uma avaliação crítica da implementação e dos resultados alcançados em ambientes reais de trabalho.

Capítulo 7: Considerações Finais

Nas considerações finais, fornece-se uma recapitulação dos principais pontos abordados e destacando as conclusões e contribuições da pesquisa; reflete-se sobre os resultados obtidos, sua significância e relevância e sugerem-se diretrizes para pesquisas ou aplicações futuras.

Capítulo 8: Referências Bibliográficas

Nas referências bibliográficas, apresentam-se as fontes consultadas ao longo da pesquisa, seguindo um formato especificado pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ou outros padrões de referência utilizados na instituição acadêmica.

2 CONCRETO

Este capítulo é destinado ao aprofundamento do tópico concreto, um material fundamental na construção civil. O intuito é proporcionar uma compreensão robusta e detalhada sobre o concreto, estabelecendo uma base sólida para os tópicos subsequentes deste estudo.

2.1 Composição do concreto

Pode-se dizer que o concreto é composto por uma combinação adequada de agregados, água e aglomerantes (PINHEIRO, MUZARDO e SANTOS, 2007).

Os aglomerantes são responsáveis por proporcionar coesão à mistura, unindo os agregados e conferindo resistência ao concreto, enquanto os agregados desempenham um papel fundamental na estrutura do concreto, fornecendo estabilidade dimensional. Eles são compostos por agregados graúdos e miúdos (ARAUJO, GODINHO e TANAKA 2018).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2019), o cimento é um material em pó fino que possui propriedades de ligação e aglutinação. Quando misturado com água, ele passa por um processo de solidificação, atuando como aglomerante hidráulico.

No processo de produção de concreto, é comum utilizar também aditivos químicos para modificar características específicas. A quantidade desses aditivos varia de acordo com a proporção de cimento utilizada na mistura. Esses aditivos têm o objetivo de melhorar as propriedades de engenharia tanto na sua fase de moldagem quanto no estado endurecido do concreto (KURTZ e HOFFMANN, 2016).

Há várias opções para a produção de concreto, que envolvem a utilização de diversos tipos de cimento e a incorporação de pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras. Adicionalmente, esses tipos de concreto podem ser submetidos a uma série de processos, como aquecimento, cura a vapor, autoclave, tratamento a vácuo, prensagem, vibração por impacto, extrusão e projeção (NEVILLE, 2013).

2.2 Propriedades e características do concreto

A resistência à compressão, conhecida como f_c , é a principal característica do concreto. Para defini-la são moldados corpos-de-prova e realizado o ensaio de determinação da resistência à compressão (PINHEIRO, MUZARDO e SANTOS, 2007).

A partir dos resultados obtidos, constrói-se um gráfico relacionando os valores de f_c com a densidade de frequência, referente à quantidade de corpos-de-prova relativo a cada valor de f_c obtido. Este gráfico é denominado por Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal para a resistência do concreto à compressão, exemplificado na Figura 2.

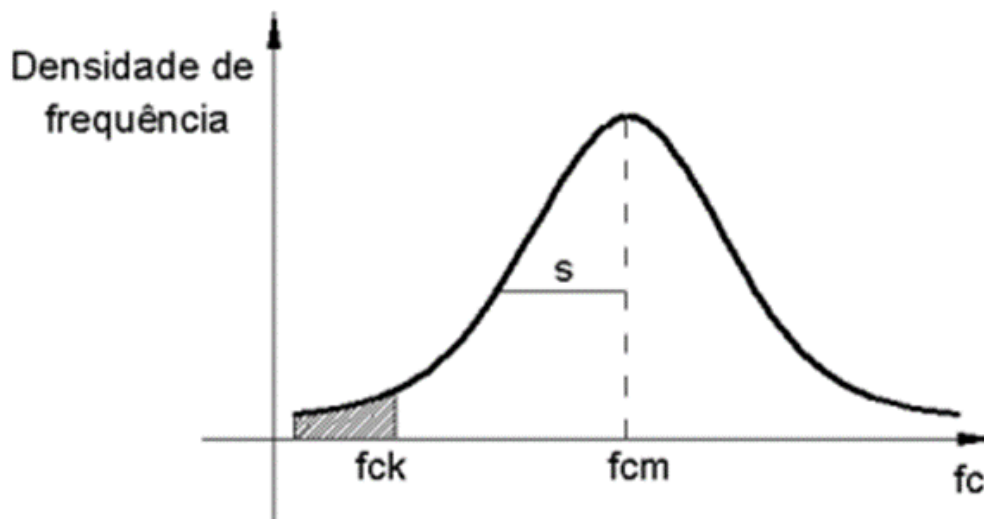


Figura 2 – Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão
Fonte: PINHEIRO, MUZARDO e SANTOS (2007, p. 2.2).

Na curva de Gauss encontram-se os valores de resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), resistência média do concreto à compressão (f_{cm}), e desvio-padrão (s).

De acordo com Neville (2016), a resistência do concreto não apresenta grandes variações, sendo essencial para o projeto estrutural, precisando ser especificada para fins de controle. A ABNT NBR 8953:2015: Concreto para Fins Estruturais - Classificação, Propriedades, Requisitos e Métodos de Ensaio define as classes de resistência em função de f_{ck} . Por exemplo, um concreto classe C25 representa um concreto com f_{ck} de 25 MPa. Na prática, devido à limitada quantidade de corpos-de-

prova ensaiados em obra, calcula-se o valor estimado da resistência característica do concreto à compressão, denominado $f_{ck_{est}}$.

A resistência obtida de uma mistura trabalhável de cimento, agregados e água, adequadamente lançada - misturada, curada e ensaiada nas mesmas condições - é influenciada pelas relações do cimento com água e com agregado, pela textura superficial, a granulometria, a forma, a resistência e a rigidez das partículas de agregado, e pela dimensão máxima do agregado (GILKEY, 1961).

De acordo com Neville (2016) a porosidade representa o volume total de vazios presentes, incluindo o ar aprisionado, poros capilares, poros de gel e ar incorporado. Ela exerce uma influência significativa na resistência à compressão do concreto.

As propriedades do concreto são comprometidas quando as estruturas são expostas a grandes tensões, ficando suscetíveis a manifestações patológicas como a formação de fissuras.

2.3 Manifestações patológicas no concreto

Na construção civil, as manifestações patológicas no concreto são falhas ou problemas que podem acontecer nas estruturas de concreto, afetando a sua durabilidade, resistência e desempenho (ARIVABENE, 2015). Esses problemas podem ser consequência de diversos fatores, tais como falhas no projeto, materiais de baixa qualidade, execução inadequada da obra e fatores ambientais, por exemplo.

2.3.1 Fissuras

De acordo com a norma de impermeabilização ABNT NBR 9575:2003: SELEÇÃO E PROJETO, as microfissuras possuem abertura menor que 0,05 mm. Já as aberturas que variam de 0,05 mm até 0,5 mm são classificadas como fissuras, enquanto aquelas que possuem abertura maior que 0,5 mm e menor que 1,0 mm são denominadas trincas.

As fissuras são um problema comum nas construções e podem afetar a estética, durabilidade e características estruturais das edificações. Tanto em alvenarias quanto em estruturas de concreto, as fissuras surgem devido à presença de tensões nos materiais. Quando a carga aplicada é superior à capacidade de

resistência do material, as fissuras tendem a se formar para aliviar essas tensões. (CORSINI, 2010).

A existência de fissuras é um indicativo de que a estrutura está perdendo sua durabilidade, segurança e resistência, o que afeta negativamente sua utilização. Isso pode resultar na redução da vida útil da estrutura e prejudicar tanto seu funcionamento quanto sua estética. Além disso, as fissuras podem levar à corrosão da armadura, principalmente quando expostas a ambientes agressivos (CARMONA, 2005).

As fissuras são classificadas como ativas ou passivas. As fissuras ativas são aquelas que continuam a sofrer variações ao longo do tempo, podendo abrir ou fechar. Essas fissuras ativas podem ser classificadas como sazonais ou progressivas. As fissuras sazonais estão associadas a variações de temperatura, enquanto as fissuras progressivas têm um aumento gradual ao longo do tempo, o que pode representar riscos para a estrutura em algum momento, uma vez que as fissuras passivas não sofrem alterações conforme o tempo (TERREZO, 2021).

Após analisar os estudos de Arivabene (2015), Corsini (2010), Carmona (2005) e Terrezo (2021), percebe-se uma compreensão detalhada e técnica sobre as manifestações patológicas no concreto, com ênfase especial nas fissuras. Esses trabalhos elucidam que as fissuras não são apenas questões estéticas menores, mas sim indicativos de falhas estruturais sérias que afetam a durabilidade, a segurança e a funcionalidade das estruturas de concreto. Em suma, esses estudos oferecem um panorama abrangente e técnico, sublinhando a importância de abordar as manifestações patológicas no concreto não apenas como problemas isolados, mas como um aspecto fundamental na garantia da qualidade, segurança e longevidade das estruturas de concreto na construção civil.

3 CONCRETO AUTORREGENERATIVO

Uma das mais novas evoluções no âmbito da engenharia civil é o concreto autorregenerativo: esse tipo de concreto apresenta a capacidade única de reparar automaticamente fissuras em sua estrutura ao longo do tempo, contribuindo para a durabilidade e vida útil prolongada das estruturas.

3.1 Histórico do concreto autorregenerativo

Em 1836, a Academia Francesa da Ciência relatou o fenômeno da autocicatrização do concreto em tubulações e estruturas de retenção de água, e a partir disso iniciaram-se os estudos acerca do assunto (ROOIJ *et al.*, 2013).

Em 1994, a Dra. Carolyn M. Dry realizou um estudo sobre o concreto autorregenerativo, pela Universidade de Illinois, nos Estados Unidos, onde foram estudados dois sistemas de autocicatrização, sendo as estruturas inteligentes ativas e as passivas. As ativas necessitam de uma intervenção para que seja iniciado o processo de autorregeneração, já as passivas possuem a habilidade de reagir por conta própria e iniciar o fenômeno sem interferência humana (GHOSH, 2009).

Sendo assim, foram realizados os primeiros ensaios com o concreto autorregenerativo utilizando fibras ocas de polipropileno preenchidos com adesivo de metil metacrilato, atuando como o agente cicatrizante. À medida que as fissuras surgiam na estrutura, as fibras de polipropileno se rompiam e, com isso, o adesivo contido na sua composição era liberado, fazendo com que essas fissuras se cicatrizassem passivamente. Além disso, as fibras podiam ser aquecidas externamente, de forma que o princípio do adesivo fosse liberado. Este estudo foi importante para perceber que no modo ativo, é possível se ter um controle maior e atingir melhor os resultados com a cicatrização, de modo que o usuário que está fornecendo a intervenção externa tem controle do processo, porém o modo passivo acaba se sobressaindo economicamente, uma vez que não necessita de mão de obra para execução da reparação das fissuras (DRY, 1994).

E, conforme o levantamento de pesquisas, a quantidade de artigos publicados sobre materiais autocicatrizantes cresceu drasticamente ao longo dos anos. A Figura

3 mostra a evolução da quantidade de artigos publicados sobre concreto autorregenerativo ao longo do tempo, disponíveis na internet.



Figura 3 – Evolução da quantidade de artigos publicados ao longo do tempo
 Fonte: Adaptação própria, a partir do Google Acadêmico (2023).

O assunto ganhou tanta relevância que, em 2005, a RILEM - *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* - estabeleceu um comitê técnico chamado SHC 221 - *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials* - com o objetivo de pesquisar os fenômenos de autocicatrização em materiais à base de cimento (CAPPELLESSO, 2018).

Pouco tempo depois, em 2016, um novo comitê foi estabelecido na RILEM, coordenado pelos Prof. Dr. Feng Xing e Erik Schlangen, denominado SHE: *Self-healing concrete – Its efficiency and evaluation*. O objetivo deste comitê é fornecer informações atualizadas sobre os estudos em andamento, com base em revisões bibliográficas e artigos científicos publicados, relacionados à eficiência e avaliação do concreto autocicatrizante (CAPPELLESSO, 2018).

Os estudos sobre o tema também se desenvolveram em âmbito nacional. Em 2023, estudantes da Escola Técnica Polivalente Americana desenvolveram um tipo de concreto autorregenerativo utilizando a inserção da bactéria *Bacillus Subtilis*.

O concreto autorregenerativo desenvolvido neste estudo é composto pelo traço convencional do concreto com a adição de cápsulas preenchidas de bactérias do tipo *Bacillus Subtilis*, produtoras de calcário e lactato de cálcio. A autocicatrização ocorre por meio da produção de carbonato de sódio pela liberação de hidróxido de cálcio, no processo de digestão destas bactérias, que ocorre na hidratação do concreto com água, ocorrendo o processo de biomineralização. Neste estudo, são realizados ensaios em corpos de prova em três tipos de amostras com diferentes aberturas de fissuras, nos quais foi observado que a adição das bactérias *Bacillus subtilis* mostram-se eficiente na autocicatrização das fissuras através da formação do carbonato de cálcio (CENTRO PAULA SOUZA, 2023).

3.2 Composição do concreto autorregenerativo

A composição do concreto autorregenerativo tem um papel fundamental em sua capacidade de regeneração e desempenho, envolvendo a seleção cuidadosa dos materiais e proporções adequadas para obter as propriedades desejadas.

Segundo De Freitas *et al.* (2021), sua composição conta com os mesmos componentes do concreto convencional, sendo sua base água, agregados e aglomerantes, somado a mais um elemento adicional e principal que o torna autoregenerante, denominado *agente de cura*.

Há diversos mecanismos e agentes que podem potencialmente promover a autorregeneração do concreto, permitindo que ele se repare de forma independente. Uma opção seria a formação secundária de minerais que são compatíveis com a matriz do material, ou seja, não afetam negativamente, mas aumentam a durabilidade do concreto ao selar as fissuras recém-formadas e reduzir a permeabilidade da matriz. Outra alternativa viável é a inclusão de partículas de cimento não reagidas na matriz do concreto, que apresentam propriedades de autorregeneração. Além disso, é possível contar com a contribuição de outros agentes para a propriedade dos concretos autorregenerativos, tais como substâncias químicas ou até mesmo agentes biológicos, conforme explica Jonkers (2007).

De acordo com Blaiszik *et al.* (2010), o objetivo da autorregeneração é recuperar a função perdida ou degradada devido a danos em um sistema de materiais

e que pode ser dividida em dois macrogrupos autorregenerativos, sendo eles autógena e autônoma, como se explica na Figura 4.

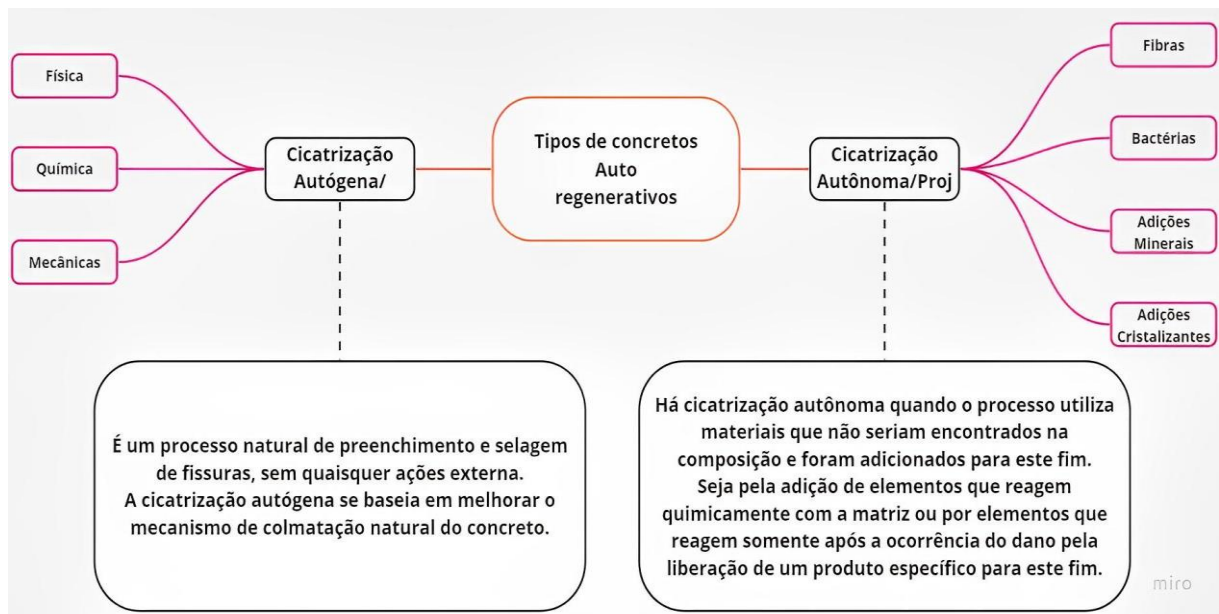


Figura 4 – Concreto autorregenerativo autógeno e autônomo
 Fonte: Autores (2023), a partir de LUHAR e GOURAV (2015); BLAISZIK *et al.* (2010, p.190).

3.2.1 Concreto autorregenerativo autógeno

Segundo Van Tittelboom e De Belie (2013), a capacidade específica interna de autorregeneração é denominada autógena, que é um conceito descrito na literatura como a habilidade natural dos materiais cimentícios de se repararem autonomamente. Contudo, é importante ressaltar que a autorregeneração autógena é limitada a fissuras de pequenas dimensões, que vão de 5µm até 300 µm, se manifestando de forma mais efetiva quando há disponibilidade de água no ambiente e que esse fenômeno ocorre em função da persistente hidratação dos componentes do clínquer ou da carbonatação do hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 -, as fissuras têm a capacidade de se fechar progressivamente.

De Rooij *et al.* (2013) estruturam as causas físicas, químicas e mecânicas que são agentes causadores naturais da autorregeneração autógena de fissuras, como mostra a Figura 5.

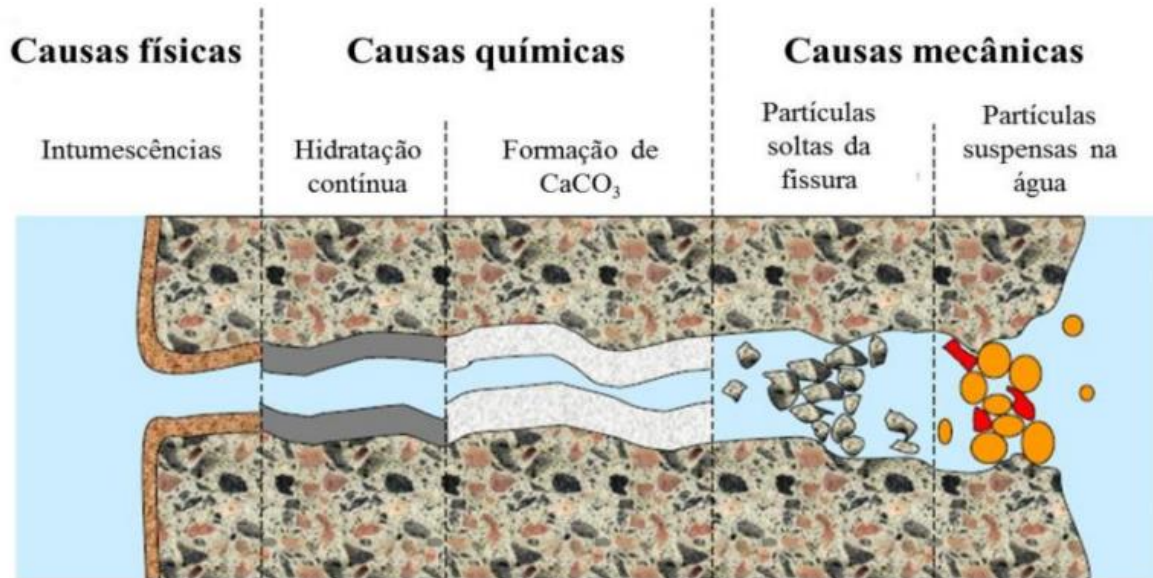


Figura 5 – Agentes causadores da autorregeneração
 Fonte: DE ROOIJ *et al.* (2013, p.30).

As causas mecânicas, segundo De Rooij *et al.* (2013), acontecem pela obstrução das fissuras devido a impurezas presentes na água e partículas desprendidas do concreto oriundas da fragmentação.

As causas químicas, conforme De Rooij *et al.* (2013), acontecem com duas possíveis origens: (i) a da hidratação contínua, quando tem-se hidratação adicional do cimento não reagido ou do material cimentício, resultando na formação de uma nova camada que se estende ao longo da fissura, mas que só ocorre autorregeneração quando tem-se fissuras menores que 0,1mm; e (ii) a formação de carbonato de cálcio, conhecida como carbonatação, que nos estudos comprova ter maior influência e parcela positiva na autorregeneração de fissuras.

Entendido a importância da formação de CaCO_3 como uma causa em destaque na autorregeneração autógena, é válido ressaltar o processo de carbonatação, que de acordo com Fusco (2008), ocorre a reação entre o CO_2 presente em meio aquoso nos poros do concreto e o Ca(OH)_2 também presente nesse ambiente. Essa interação entre esses elementos conduz à formação de produtos, sendo eles o CaCO_3 - carbonato de cálcio - e H_2O - água -, como mostra a Figura 6.

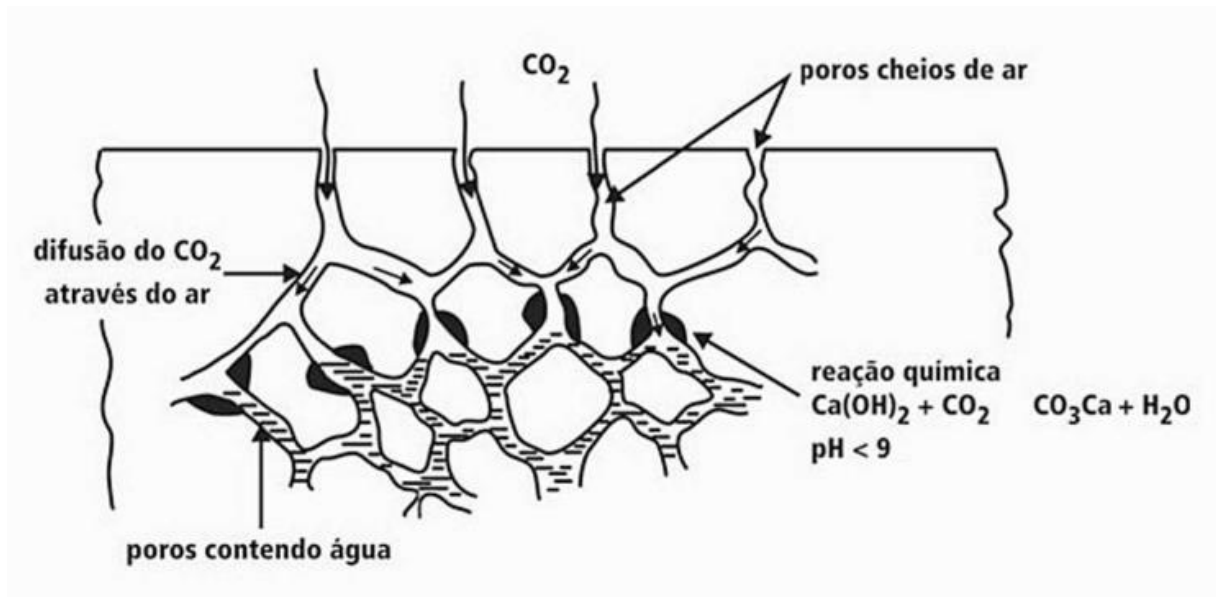


Figura 6 – Processo e reação química da carbonatação
Fonte: FUSCO (2008, p.57).

Já as causas físicas estão relacionadas às intumescências, tratando-se de um processo de expansão volumétrica devido à interação entre componentes do cimento e a água presente no concreto (DE ROOIJ *et al.*, 2013).

Ao analisar os estudos de Van Tittelboom e De Belie (2013), De Rooij *et al.* (2013) e Fusco (2008), percebe-se uma compreensão profunda sobre a autorregeneração autógena em estruturas de concreto. Esta capacidade de autocura, limitada a fissuras de pequenas dimensões, destaca-se como uma característica intrínseca notável do concreto, mostrando que essas descobertas são cruciais para o campo da engenharia civil, pois oferecem uma visão mais aprofundada dos processos internos do concreto e como eles podem ser otimizados ou replicados artificialmente para melhorar a eficácia do concreto em termos de autorregeneração.

3.2.2 Propriedades e características do concreto autorregenerativo

A aplicação de processos de autorregeneração do concreto pode não só induzir sua capacidade de selar fissuras, como também alterar suas características e propriedades mecânicas (LIMA, 2021).

A adição de bactérias na argamassa, segundo Lima (2021), ocasiona a formação de carbonato de cálcio, densificando a microestrutura do concreto,

tornando-o menos poroso. Assim, a capacidade de penetração de água no compósito é reduzida, além de apresentar um aumento de sua resistência.

Conforme Rao, Reddy e Sasikala (2017), a deposição de CaCO_3 no concreto causa redução da sua porosidade, melhora sua ligação e aumenta a integridade da matriz cimentícia, prevenindo a formação de fissuras. Foi verificada uma redução de 70% na porosidade de amostras cimentícias com bactérias, por meio de ensaio de pulso ultrassônico.

Outros autores têm feito experimentos no concreto com adições de diferentes bactérias. A formação de calcário nas fissuras contribui com o aumento da resistência mecânica do concreto. Por outro lado, a adição de nutrientes na pasta cimentícia não gera o mesmo resultado. Chahal e Siddique (2011) apontaram um aumento de 20% na resistência do concreto com adição de bactérias em 28 dias enquanto Wang *et al.* (2014), observaram que a adição de microcápsulas contendo nutrientes na argamassa de cimento causou uma redução de 15% na resistência à compressão no mesmo período de tempo.

Embora a incorporação de agentes cicatrizantes - bactérias e seus nutrientes - na pasta de cimento traga benefícios como o aumento da vida útil da construção e a redução dos custos de manutenção, o surgimento de fissuras a longo prazo ainda representa um desafio para os agentes cicatrizantes bacterianos, uma vez que sua atividade metabólica se reduz ao longo do tempo (LUO, QIAN e LI, 2015).

Segundo Li *et al.* (2019), esse fenômeno ocorre devido à alta alcalinidade do concreto, à escassez de nutrientes ou oxigênio para as bactérias, bem como ao fechamento dos poros da matriz cimentícia ao longo do tempo. Diversos pesquisadores sugerem o encapsulamento ou a imobilização dos microrganismos, por meio de materiais protetores a fim de aumentar a eficiência bacteriana na cicatrização de fissuras. Essas técnicas aumentam a probabilidade de sobrevivência das bactérias nesse ambiente (JONKERS *et al.*, 2010).

Em relação a resistência mecânica de cada concreto, Lima (2021) destaca que o concreto com atividade biológica gera resultados diversos. Isso ocorre devido a diversos fatores que influenciam na capacidade de aumentar ou reduzir sua resistência à compressão, como o tipo e a quantidade de bactérias utilizadas na mistura, e o material utilizado para encapsular esses agentes.

4 CONCRETO AUTORREGENERATIVO AUTÔNOMO

Em nível microscópico, a cicatrização autônoma é definida pela presença de microcápsulas contendo substâncias cicatrizantes ou pela existência de canais vazios que transportam esses agentes cicatrizantes (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). Em termos gerais, a técnica consiste em adicionar, durante o processo de fabricação do concreto, materiais denominados agentes de cura além de sua composição convencional, com o propósito de permitir sua autorregeneração em um momento futuro.

De acordo com Tang, Kardani e Cui (2015), os materiais com capacidade de autorregeneração autônoma podem ser categorizados em dois grupos distintos: cápsulas e sistemas vasculares. A forma como o agente de regeneração é armazenado em cada um desses grupos influencia diretamente o volume de dano que pode ser recuperado e, em cada caso específico, há uma variação na quantidade de repetição do processo de regeneração e a velocidade com que a recuperação ocorre.

Os autorregenerativos autônomos baseados em cápsulas, segundo Blaiszik *et al.* (2010), utilizam várias cápsulas separadas para armazenar o agente de cura. Sendo assim, o processo de autorregeneração se inicia quando ocorrem danos e as cápsulas são rompidas, liberando o agente de cura na área afetada. No entanto, após a liberação, o agente de cura é esgotado, o que limita a ocorrência a apenas um evento de regeneração local.

Ao examinar os estudos de Van Tittelboom e De Belie (2013), Tang, Kardani e Cui (2015), e Blaiszik *et al.* (2010), é possível identificar avanços significativos na tecnologia de cicatrização autônoma do concreto. Essa técnica, que envolve a incorporação de microcápsulas contendo agentes cicatrizantes ou a criação de sistemas vasculares dentro do concreto, representa um desenvolvimento inovador na engenharia de materiais. Em cada sistema, a maneira como o agente de regeneração é armazenado e liberado determina a eficácia do processo de cicatrização, a quantidade de dano que pode ser recuperado, a possibilidade de repetição do processo de regeneração e a velocidade da recuperação.

As cápsulas podem ser formadas de diferentes materiais e possuem diversos tamanhos e formas. Em uma pesquisa conduzida pela Universidade de Cambridge, foram incorporadas microcápsulas de tamanho variando entre 50 μm a 700 μm .

Inicialmente foram utilizadas microcápsulas de vidro em macroescala, e posteriormente foram desenvolvidas microcápsulas com aproximadamente 600 μm de diâmetro feitas de gelatina de porco, contendo 50% de silicato de sódio e 50% de óleo. (DAVIES *et al.*, 2016). A Figura 7 mostra a estrutura dessas microcápsulas.

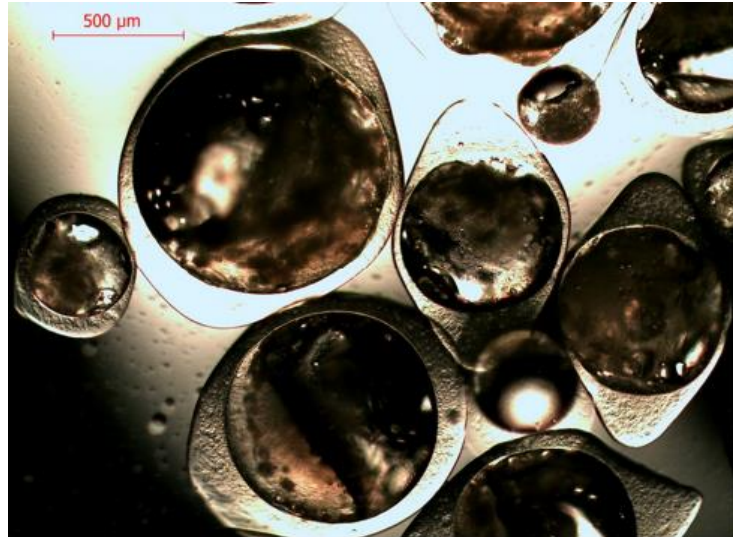


Figura 7 – Microcápsulas feitas de gelatina de porco e contendo 50% de silicato de sódio e 50% de óleo
Fonte: DAVIES *et al.* (2016, p. 03).

Os materiais autorregenerativos autônomos vasculares utilizam uma rede de capilares ou canais ocos, armazenando o agente de cura até que ocorra dano e o processo de autorregeneração comece. Os tubos em um sistema vascular podem ser compostos de diferentes materiais. Uma solução utilizada em sistemas de autorregeneração do tipo vascular são os tubos de vidro. Segundo Santos (2022), é recorrente a escolha de tubos constituídos de vidro para o transporte do agente cicatrizante para a matriz do concreto. Esses tubos possuem diâmetros que normalmente variam entre 0,8mm e 4mm. Ainda, no sistema vascularizado os tubos podem ser dispostos em uma, duas ou três direções (IRRIGARAY e BRAZ-CÉSAR, 2019).

Após o surgimento do dano e a soltura do agente regenerativo, a rede pode ser reenchida a partir de uma fonte externa ou por uma região intacta que esteja ligada ao sistema vascular. Vários eventos de regeneração local podem ocorrer como resultado dessa ação de reabastecimento (BLAISZIK *et al.*, 2010). As Figuras 8 e 9 mostram como esses mecanismos ocorrem.

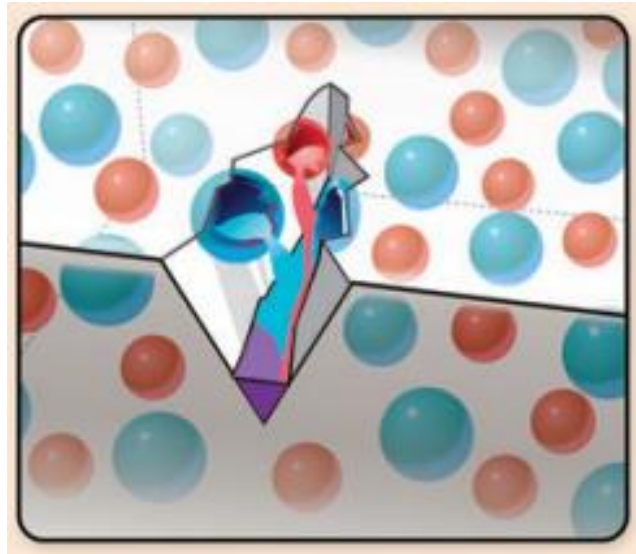


Figura 8 – Autorregeneração autônoma baseada em cápsulas
 Fonte: BLAISZIK *et al.* (2010, p. 182).

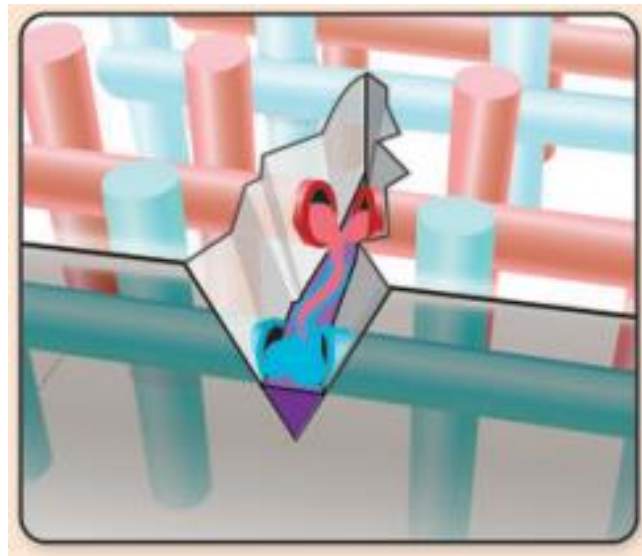


Figura 9 – Autorregeneração autônoma vascular
 Fonte: BLAISZIK *et al.* (2010, p. 182).

Uma outra possibilidade de sistemas vasculares foi desenvolvida pela Universidade de Cardiff; uma solução que emprega polímeros com memória de forma - SMP - como um mecanismo para selar fissuras em estruturas de concreto, com o propósito de aprimorar a capacidade de autocicatrização do concreto. Quando ativados, esses SMP retornam à sua forma original ou, se contidos, geram uma tensão externa. Os tubos foram desenvolvidos inicialmente utilizando tiras de PET e

posteriormente formados a partir de filamentos (DAVIES *et al.*, 2016). A Figura 10 mostra um esquema de um tendão feito com polímero de memória de forma.

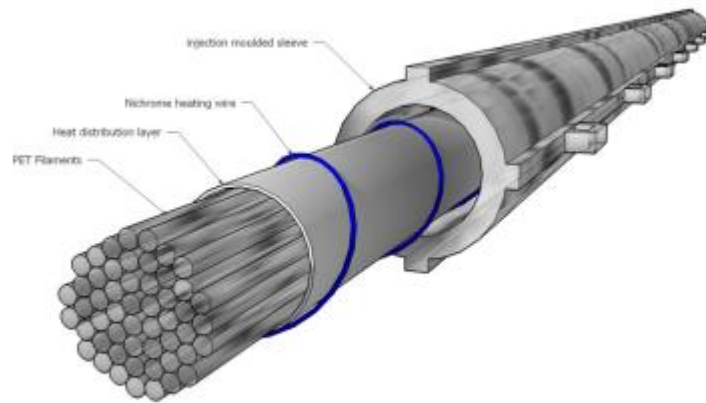


Figura 10 – Esquema de um tendão de polímero com memória de forma
Fonte: DAVIES *et al.* (2016, p.05).

Conforme Tang, Kardani e Cui (2015), a eficiência de um sistema de autorregeneração é influenciada por vários parâmetros. O agente de cura escolhido é fundamental, uma vez que diferentes agentes podem ter diferentes reatividades, durabilidades e compatibilidades com a matriz cimentícia. A técnica de aplicação da autorregeneração também é crucial, pois determina como e quando o agente de cura é liberado no sistema. Além disso, o mecanismo pelo qual a regeneração é iniciada – seja por um gatilho mecânico, térmico ou químico – tem um impacto significativo na eficácia do processo.

A complexidade dessa área sugere que não há uma solução única que seja ideal para todas as aplicações. Ao contrário, diferentes combinações de agentes de cura, técnicas e gatilhos de regeneração podem variar para diferentes cenários de aplicação (TANG, KARDANI e CUI, 2015).

4.1 Polímeros

Uma opção para a autorregeneração do concreto são os polímeros superabsorventes - PSA. Esses polímeros possuem a capacidade de reter grande quantidade de líquido e com isso inchar e aumentar de volume. O PSA é adicionado

ao concreto de forma convencional. Quando o concreto sofre fissuração é necessário que este entre em contato com umidade para que o PSA comece a agir. Uma vez submetido à umidificação externa, a umidade faz com que esse material inche e, assim, as fissuras são preenchidas (LEE, WONG e BUENFELD, 2010). A capacidade de expansão do PSA pode variar conforme o tipo de polímero e as características do líquido, tais como composição, temperatura e pressão. Quando em contato com água deionizada, a taxa de expansão pode ser superior a 500g/g, porém, em soluções típicas de poros de concreto, essa taxa pode ser de 10 a 20g/g. (LEE, WONG e BUENFELD, 2016). A Figura 11 mostra o funcionamento deste mecanismo.

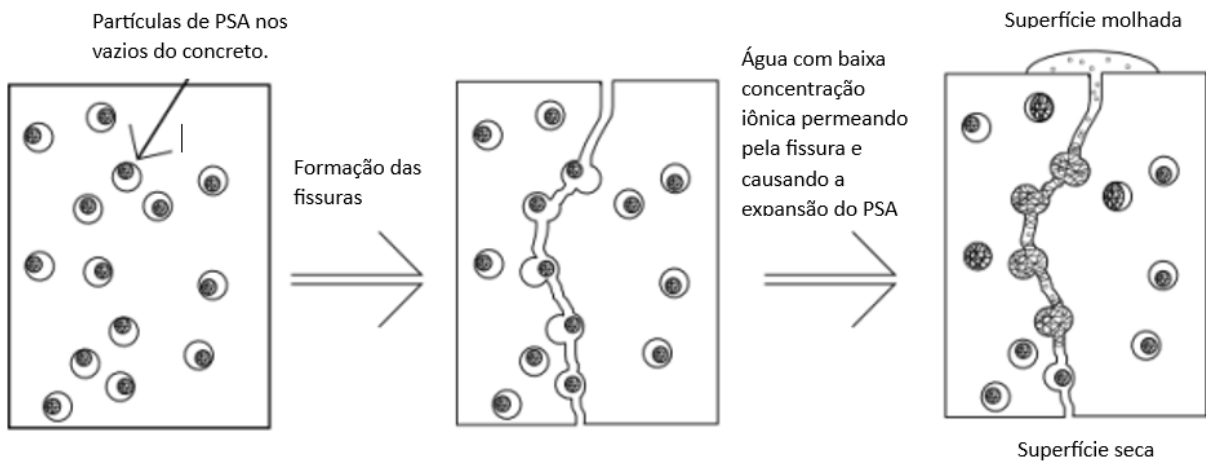


Figura 11 – Esquema mostrando o mecanismo potencial de autovedação de fissuras usando PSA
Fonte: Adaptado de LEE, WONG e BUENFELD (2010, p.02).

Os polímeros superabsorventes, quando incorporados ao concreto, oferecem diversas vantagens relacionadas ao gerenciamento da água na mistura. Eles influenciam os processos de absorção e/ou liberação de água, afetando, por conseguinte, as características reológicas do concreto em seu estado fresco e alterando as condições de umidade interna do material.

Devido aos princípios de funcionamento dos polímeros superabsorventes, eles podem apresentar benefícios quando aplicados em regiões com baixa precipitação ou para estruturas que não estão diretamente sujeitas à chuva. Isso ocorre porque eles têm uma notável habilidade de absorver água, o que funciona mesmo em locais com baixa umidade. Portanto, eles têm o potencial de contribuir para o processo de cura da matriz de cimento (IRRIGARAY e BRAZ-CÉSAR, 2019).

4.2 Bactérias

A ideia de utilizar bactérias em concreto, ou de considerar o concreto como um ambiente propício para tipos específicos de bactérias, não é tão surpreendente quanto pode parecer inicialmente, conforme Jonkers (2007). Mesmo que o meio concreto possa parecer desfavorável para a vida, dadas suas condições extremamente secas e alcalinas, existem ambientes naturais similares onde as bactérias conseguem prosperar, como em formações rochosas ou em regiões desérticas.

Segundo Alves *et al.* (2019), um dos requisitos fundamentais para a autorregeneração de fissuras no concreto é a capacidade de movimentar substâncias para o interior das mesmas. Sendo o concreto um material dotado de porosidade, ele permite essa movimentação de materiais através de seu sistema de poros.

De acordo com Seifan, Samani e Berenjian (2016), o composto regenerativo com bactérias pode ser integrado à estrutura do concreto por meio de microcápsulas, um sistema vascular, ou pode ser incorporado diretamente durante a mistura do concreto.

Conforme Jonkers (2007), na natureza, identificam-se cepas bacterianas que podem ser destinadas à integração na matriz de concreto. Estas cepas, quando utilizadas como agentes de autorregeneração em estruturas de concreto, devem apresentar eficiência, possuindo a capacidade de reparar fissuras de maneira duradoura, preferencialmente ao longo de toda a vida útil da estrutura em questão.

O princípio à cicatrização de fissuras por via bacteriana é que esses microrganismos servem majoritariamente como catalisadores na transformação de um composto inicial em um material de preenchimento apropriado. Os minerais que se formam, como os derivados de carbonato de cálcio, assumem então o papel de um bioconcreto, efetivamente vedando as novas fissuras. Portanto, é crucial que tanto os microrganismos quanto os compostos precursores desse bioconcreto sejam partes integrantes da composição material. Vale ressaltar que a incorporação desses elementos não deve comprometer outras propriedades relevantes do concreto (JONKERS, 2007).

De acordo com Pacheco-Torgal e Labrincha (2013), biomineralização é um fenômeno natural no qual organismos vivos, como certas bactérias, facilitam a formação de minerais em seu ambiente imediato. No caso de bactérias que

decompõem ureia, o processo libera amônio e dióxido de carbono. Esse amônio aumenta o pH do ambiente ao redor, criando condições propícias para a formação de carbonato de cálcio, um tipo de mineral. Essa é uma maneira comum de estimular a formação de carbonato de cálcio em locais ricos nesse elemento. Como demonstrado na Figura 12, abaixo:

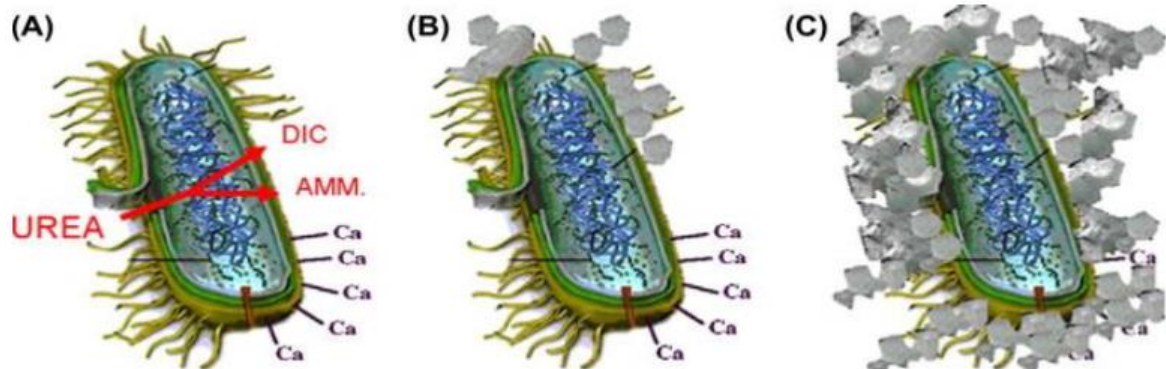


Figura 12 – Precipitação de CaCO_3 a partir da uréase
 Fonte: PACHECO-TORGAL e LABRINCHA (2012, p. 1137).

Na maioria das pesquisas, bactérias que quebram ureia e pertencem ao gênero *Bacillus* têm sido empregadas na geração biológica de minerais compostos por carbonato de cálcio. O processo de criação desses minerais por esses microrganismos envolve a transformação enzimática da ureia em amônia e CO_2 (PACHECO-TORGAL e LABRINCHA, 2013).

Conforme Martins *et al.* (2021), com a habilidade de autorregeneração, o bioconcreto utiliza a formação de carbonato de cálcio como um mecanismo de reparo para fissuras e rachaduras em sua estrutura. Se a água se infiltrar através dessas aberturas, bactérias específicas são ativadas. Essas bactérias, ao consumir oxigênio, passam de um estado solúvel para um insolúvel, depositando carbonato de cálcio e outros minerais inorgânicos que vedam as aberturas, não apenas restaurando a integridade da estrutura, mas também evitando a entrada de substâncias nocivas. Após a reparação completa das fendas, as bactérias retornam ao seu estado inativo ou dormente.

A ideia central é o reparo de fissuras baseado em bactérias, que quando ocorre uma fissura na superfície recém-formada do concreto, as bactérias ali presentes se ativam e proliferam em contato com a água. Estas então formam o carbonato de cálcio, que serve para selar as fissuras e, por consequência, fornecem uma camada

de proteção ao aço, resguardando-o de corrosões químicas externas (ALVES *et al.*, 2019). Como exemplificado na Figura 13.

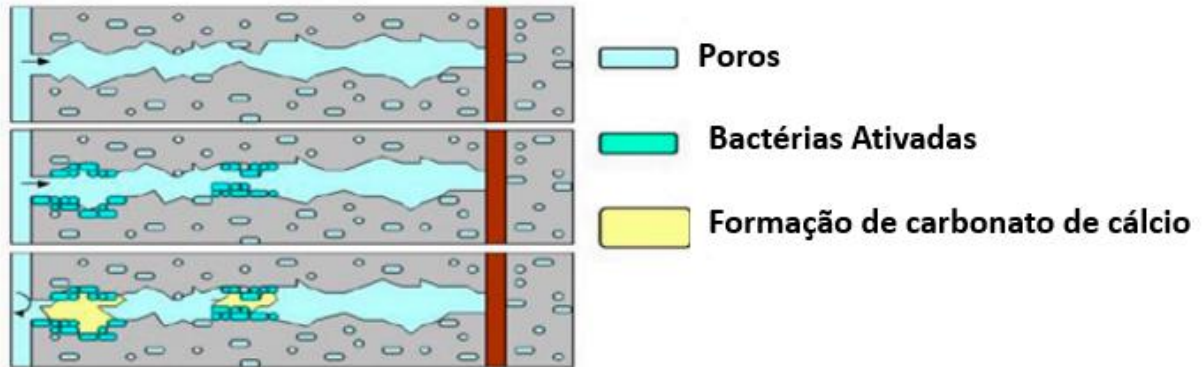


Figura 13 – Mecanismo de reparo de fissuras por bactérias
 Fonte: Adaptado de ALVES *et al.* (2019, p. 3).

Conforme Wiktor e Jonkers (2011), a análise feita por microscópio, demonstrada na Figura 14, mostrou que no corpo de prova de concreto com bactérias, observou-se um fechamento das fissuras consideravelmente maior, de 0,46 mm, em comparação com o corpo de prova de concreto convencional, que apresentou 0,18 mm. Dado que a amostra de bioconcreto apresentou uma quantidade expressiva de precipitação de carbonato de cálcio CaCO_3 , nota-se que tal formação mineral esteja associada à ação bacteriana.

A análise dos estudos de Jonkers (2007), Alves *et al.* (2019), Seifan, Samani e Berenjian (2016), Pacheco-Torgal e Labrincha (2013), e Martins *et al.* (2021) revela uma perspectiva inovadora na utilização de bactérias para a autorregeneração do concreto. Uma vantagem significativa da utilização de bactérias em relação à carbonatação é a proteção contra a corrosão da armadura. Enquanto a carbonatação pode reduzir o pH do concreto e, por conseguinte, expor a armadura à corrosão, a formação de carbonato de cálcio pelas bactérias cria uma barreira que protege a armadura contra corrosões químicas externas. Esse processo biológico oferece uma camada de proteção adicional, assegurando a longevidade não só do concreto, mas também da armadura metálica dentro dele.

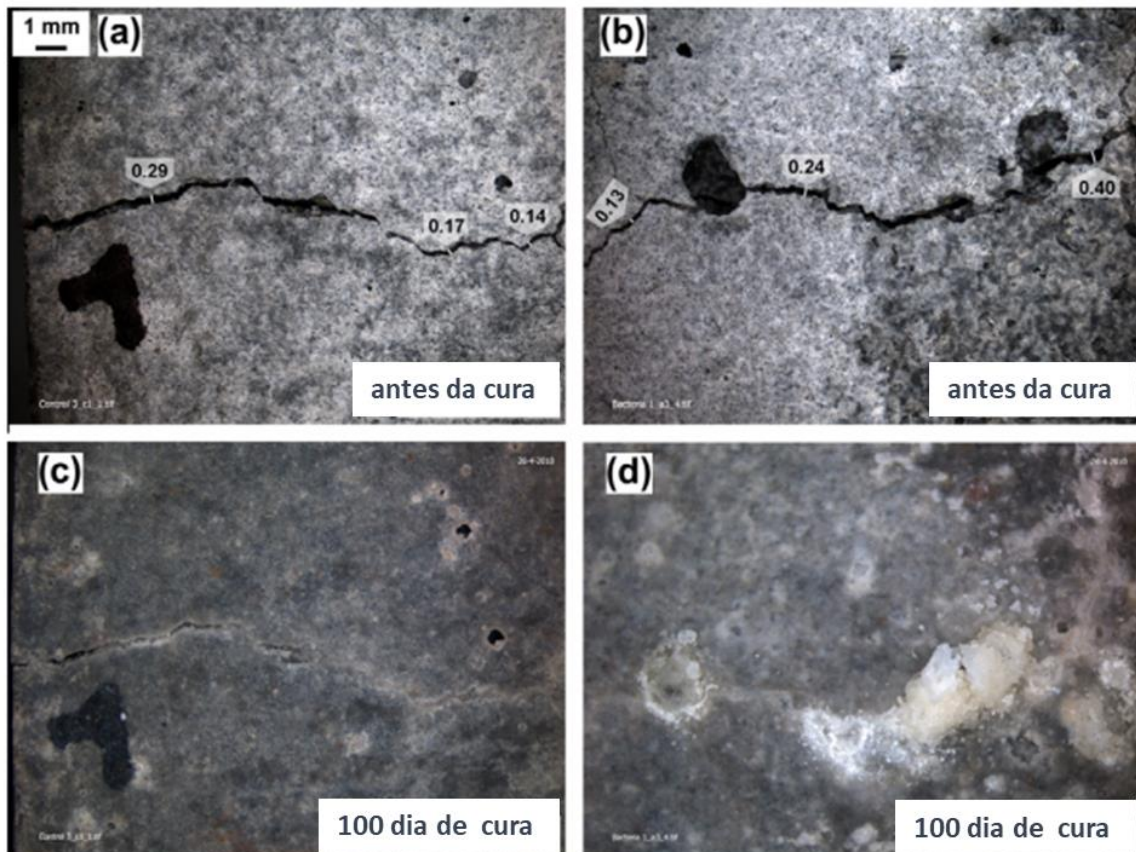


Figura 14 – (a) concreto fissurado (b) bioconcreto fissurado (c) 100 dias após do concreto fissurado (d) 100 dias após do bioconcreto fissurado

Fonte: Adaptado de WIKTOR e JONKERS (2011, p. 765).

Por um lado, no processo de biomineralização, ao formar-se o carbonato de cálcio tem-se a diminuição do pH decorrente da produção de íons de amônio, no entanto, nesse processo é consumido o oxigênio presente, o que reduz a probabilidade de haver corrosão da armadura (IRRIGARAY e BRAZ-CÉSAR, 2019).

4.3 Aditivos cristalizantes

O uso de aditivos químicos tem como principal objetivo a melhoria das características dos sistemas cimentícios, tanto em seu estado fresco quanto endurecido, para atender as necessidades específicas de aplicação. No entanto, é importante destacar que a introdução de aditivos desencadeia interações físicas e químicas no sistema cimento-aditivo. Isso ocorre porque os aditivos provocam modificações nos processos de hidratação do cimento, na cinética de nucleação e no

crescimento dos hidratos, assim como na morfologia dos produtos de hidratação (CHEUNG *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2015).

De acordo com Bianchin (2018), os catalisadores cristalinos são materiais sintéticos que atuam como impermeabilizante hidrofílico. Eles têm a capacidade de consumir o Ca(OH)_2 , formando produtos cristalinos com a propriedade de diminuir a porosidade e reparar fissuras no concreto. Esses materiais são categorizados como cicatrizantes, pois as reações químicas só ocorrem quando há um nível adequado de umidade, que geralmente é fornecido pelo transporte de água por meio das fissuras.

Takagi *et al.* (2013) argumentam que a adição de um impermeabilizante por cristalização à mistura oferece uma vantagem significativa devido à geração de cristais insolúveis que se incorporam nos poros do concreto. Em virtude da propriedade de cristalização, esse agente não apenas tem a capacidade de obstruir os poros e os capilares do concreto, mas também pode preencher microfissuras, resultando na redução da permeabilidade do concreto.

A formação cristalina dos produtos abrange uma diversidade que inclui cristais de etringita, hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio e silicato de cálcio hidratado (CSH). Entre eles, o carbonato de cálcio e o CSH são os responsáveis pela restauração das propriedades mecânicas, conforme destacado por Bianchin (2018).

Segundo Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2013), as condições nas quais o concreto é exposto à água desempenham um papel crucial na eficácia do processo de autorregeneração e no tipo de cristais que se formam. As condições de exposição de ciclos úmido-seco indicam que, em uma recuperação mecânica ótima, os principais cristais de cicatrização encontrados no interior da fissura são uma mistura de CaCO_3 , CSH e etringita. Quando o concreto está continuamente exposto à água, a formação de CaCO_3 nas bordas da fissura é favorecida, o que melhora a impermeabilidade. No entanto, essa formação reduz a capacidade de restauração das propriedades mecânicas.

Conforme observado por Li *et al.* (2004), é possível aumentar a resistência à compressão ao utilizar esses aditivos, graças a fatores como a capacidade de preencher vazios, conhecida como efeito fíler, e a promoção da hidratação do cimento, que melhora a microestrutura da pasta de cimento.

Reddy e Ravitheja (2019) conduziram um estudo experimental sobre a adição de aditivos cristalizantes no concreto, destacando a importância da água no processo

de regeneração. Concluiu-se que os espécimes sujeitos à imersão contínua em água e contato com água -imersão em água por 3,5 dias seguida de exposição ao ar por mais 3,5 dias - apresentaram propriedades de autorregeneração superiores em comparação com os corpos de prova submetidos a ciclos úmido/seco e exposição ao ar em condições de laboratório, ou seja, armazenamento das amostras em condições normais de ar atmosférico, como demonstrado na Figura 15.







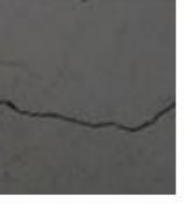


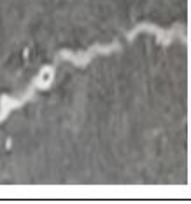




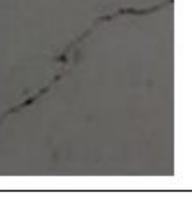
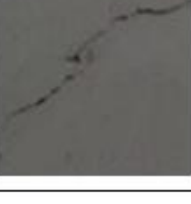
		Fissuras em idades precoces		Fissuras estruturais	
		Antes	Depois	Antes	Depois
Condições de exposição	Imersão na água				
	Ciclos úmido/seco				
	Contato com água				
	Exposição ao ar				

Figura 15 – Autorregeneração de fissuras precoces e estruturais sob quatro tipos de exposição
Fonte: Adaptado de REDDY e RAVITHEJA (2019 p.29).

Os mecanismos de autorregeneração propostos oferecem a vantagem de possibilitar uma segunda ação de cicatrização que pode ser facilmente aplicada em estruturas de concreto que não são facilmente acessíveis para fins de manutenção e reparo, como estruturas subterrâneas, pontes e barragens. (TAKAGI *et al.*, 2013).

4.4 Aditivos minerais

De acordo com a pesquisa conduzida por De Belie *et al.* (2018), a incorporação de adições minerais no concreto influencia na cinética de hidratação, nas propriedades do material, bem como no potencial de autorregeneração. A maioria dos estudos que investigam os efeitos da adição de minerais na autorregeneração, tanto em termos de cinética quanto de eficiência final, concentra-se principalmente na utilização de escória de alto-forno - EAF - e cinzas volantes, cuja parte reativa geralmente apresenta uma estrutura amorfa, diferenciando-se assim das composições cristalinas.

Uma vez que quantidades consideráveis dessas adições permanecem não hidratadas mesmo em idades mais avançadas, a autorregeneração devido à hidratação contínua é promovida. A reação pozolânica, que é específica para adições que contenham sílica, ou sílica e alumina - como cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto forno e argila calcinada, por exemplo -, incorporadas em cimentos compósitos, pode intensificar a hidratação em curso dos grãos de cimento em relação ao desenvolvimento de CSH ao longo do tempo, resultando, por conseguinte, em um certo nível de autorregeneração (DE BELIE *et al.*, 2018).

A capacidade de autorregeneração é aprimorada quando há uma substituição parcial do cimento por escória de alto-forno e cinzas volantes. Huang *et al.* (2016) destaca que é necessário um nível mínimo de hidróxido de cálcio para permitir a reação adicional da escória de alto-forno e das cinzas volantes durante o processo de cura.

Segundo Sahmaran, Yildirim e Erdem (2013), embora as amostras que contêm cinzas volantes tenham mais materiais ligantes que não reagiram – o que teoricamente sugere um maior potencial de autorregeneração –, notam-se resultados mais evidentes de autorregeneração em misturas que incorporam escória de alto-forno.

Isso se deve ao fato de que a escória exibe uma atividade mista cimentícia e pozolânica, e, também, pode sofrer reações de hidratação retardada quando há baixa concentração de hidróxido de cálcio devido à substituição do cimento, o que a diferencia das pozolanas. No entanto, em ambos os casos, o principal mecanismo de cura sob condições de imersão permanente é a hidratação contínua, que resulta na

formação de produtos de reação como CSH, etringita, hidrogranada e hidrotalcita nas fissuras, enquanto durante os ciclos de umidade e seca, a carbonatação se torna o mecanismo predominante, conforme destacado por Huang *et al.* (2016).

A pesquisadora De Belie (2018) indica que os produtos resultantes da hidratação dos grãos de cimento Portland e dos cimentos com escória de alto-forno - EAF - são praticamente os mesmos, com a única diferença da presença de quantidades menores de cristais de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 nos cimentos que contêm maiores proporções de EAF. Isso resulta em uma estrutura de poros mais refinada no concreto com EAF, caracterizada por uma quantidade reduzida de Ca(OH)_2 , que, por conseguinte, pode contribuir para sua maior resistência química (WU, JOHANNESSON e GEIKER, 2012).

Um estudo conduzido por Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2010) apresentou resultados de autorregeneração em três proporções distintas de misturas de argamassa, sendo elas: cimento puro, cimento com adição de 30% de cinza volante e cimento com adição de 10% de sílica ativa. Em todas as três argamassas, observaram-se reações que aparentavam ser semelhantes, uma vez que materiais de cristalização existiam em ambos os lados das fissuras, formando uma ponte entre si. Contudo, é importante destacar que os formatos dos cristais em cada tipo de argamassa eram distintos. Nas argamassas de cimento e cimento com cinza volante, os cristais apresentavam bordas arredondadas e lisas, enquanto na argamassa de cimento com sílica ativa, notaram-se cristais com bordas irregulares.

Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2010) concluíram que todas as variedades de argamassa analisadas demonstraram certo grau de capacidade de autorregeneração, como mostra a Figura 16. Entretanto, cada tipo de aditivo em cada argamassa apresentou condições preferenciais para otimizar seu processo de autorregeneração no fechamento das fissuras, como a idade da argamassa no momento da fissuração e largura da fissura.

Em síntese, os estudos de De Belie *et al.* (2018), Huang *et al.* (2016), Sahmaran, Yildirim e Erdem (2013), Wu, Johannesson e Geiker (2012), e Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2010), ilustram que as adições minerais no concreto desempenham um papel crucial na melhoria da autorregeneração, influenciando a durabilidade e a sustentabilidade do material. A substituição parcial de componentes tradicionais do concreto por materiais como EAF e cinzas volantes não

apenas aprimora as propriedades mecânicas e químicas do concreto, mas também contribui significativamente para sua capacidade de autocura.

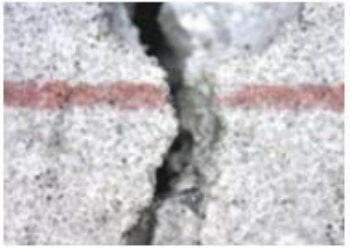
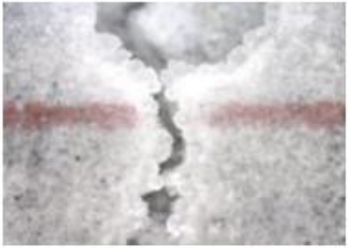
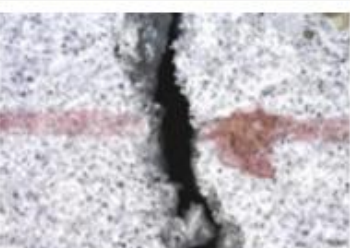

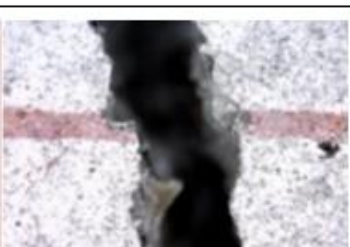
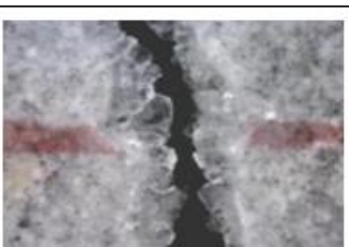
Composição	Antes	Depois
Cimento (fissurado com 3 dias)		
	0,3051 mm	0,0698 mm (19 dias)
Cimento e Cinza volante (fissurado com 3 dias)		
	0,3051 mm	0,1397 mm (29 dias)
Cimento e Sílica ativa (fissurado com 28 dias)		
	0,6787 mm	0,1502 mm (19 dias)

Figura 16 – Autorregeneração de fissuras em diferentes argamassas
Fonte: Adaptado de JAROENRATANAPIROM e SAHAMITMONGKOL (2010, p.555).

4.5 Fibras

Segundo Zhang *et al.* (2023), há alguns modelos dos chamados Concretos Reforçados com Fibras - CRFs - que podem ser classificados principalmente em dois tipos: CRF comum utilizando baixas e moderadas frações volumétricas de fibras e; Concreto Reforçado com Fibras de Alto Desempenho - CRFAD. No primeiro tipo de compósito, as fibras podem ser usadas para controlar a fissuração por retração se utilizadas em baixas porcentagens volumétricas: por exemplo, 0,2-0,3%, bem como para substituição parcial/completa de algum tipo de armadura convencional como

estribos, malhas de arame soldado, por exemplo. Nesse caso, as porcentagens volumétricas de fibras variam entre 0,5 e 1%. Com essas porcentagens de fibras, os compósitos ainda apresentam um comportamento de endurecimento por deformação, mesmo que mantenham uma certa capacidade de suporte de carga pós-fissuração, dependendo da dosagem, dispersão e ligação entre fibras e matriz. As fibras melhoram o processo de autorregeneração devido à sua capacidade de restringir as larguras das fissuras e melhorar a formação de múltiplas fissuras.

Ainda de acordo com Zhang *et al.* (2023), os fatores que afetam a capacidade de autorregeneração em CRFC são os seguintes: as propriedades geométricas da superfície da fissura, como rugosidade, complexidade e continuidade (MIHASHI e NISHIWAKI, 2012), a largura inicial da fissura (SNOECK e DE BELIE, 2012) e a dispersão das fibras devido a diferentes idades de pré-fissuração e diferentes exposições ambientais. Especificamente, embora amostras mais jovens tenham mais partículas de cimento não hidratado e, portanto, uma capacidade de autorregeneração maior seja esperada em comparação com amostras mais antigas, foi observado que os concretos mais maduros têm uma ligação interfacial entre fibras e matriz aprimorada. Portanto, esses concretos mais antigos apresentaram uma fissuração mais bem distribuída com fissuras mais finas, o que facilita a autorregeneração (KAN *et al.*, 2010).

Zhang *et al.* (2023), realizou um estudo utilizando a colaboração de granulados autorregenerativos, combinado em diferentes dosagens a fibras de PVA - Poliacetato de vinila - para analisar os efeitos de autorregeneração de fissuras em amostras de concreto convencional, utilizando ensaios de resistência à compressão, tração e à flexão, analisando a eficiência de autorreparo nas diferentes amostras, estudo da cura com água potável e água do mar, com e sem CO₂ e os mecanismos utilizados para obter os resultados esperados.

A inclusão de GARs - Granulados autorregenerativos - afetou negativamente as resistências à compressão e à flexão. O aumento do teor de GARs teve um impacto gradual nas resistências, mas após um ponto crítico, a diminuição foi mais acentuada. A adição das fibras de PVA diminuiu a resistência à compressão, mas aumentou a resistência à flexão. (ZHANG *et al.*, 2023).

A Figura 17 demonstra o processo de fissuração e autorregeneração sem e com fibras de PVA.

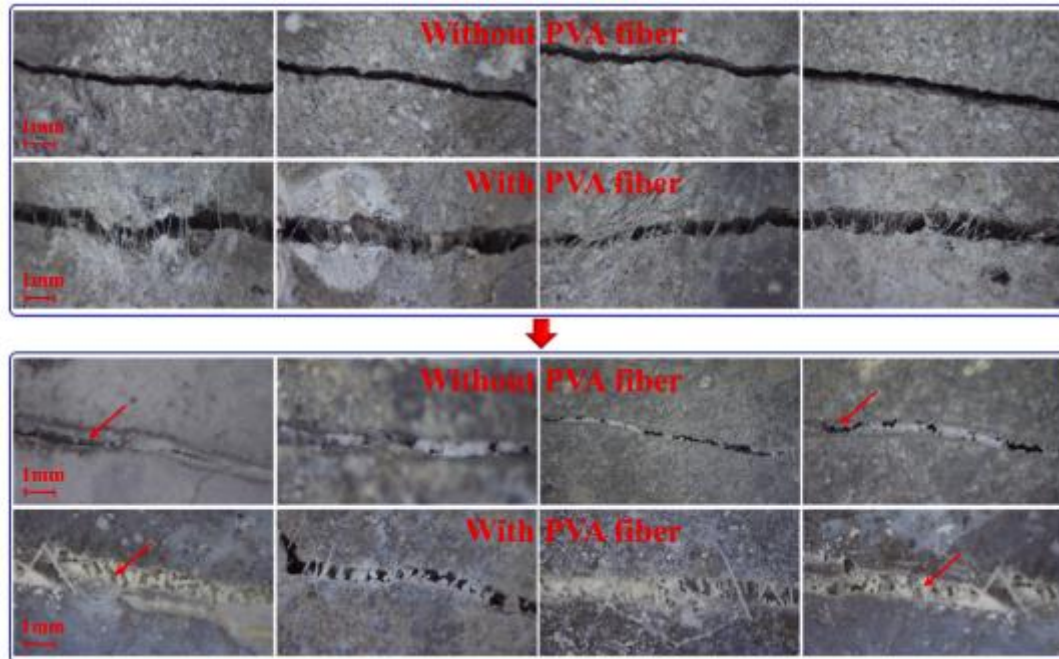


Figura 17 – Processo de fissuração e autorregeneração com e sem fibras de PVA
 Fonte: ZHANG *et al.* (2023, p.5).

Os resultados obtidos foram que sem a fibra PVA, os corpos de prova fissuraram, e após sua adição, as fissuras deixaram de estar completamente rachadas, e iniciaram um processo de conexão com as fibras. Isto aumentou os pontos de deposição para os agentes autocurativos. Isto não só poderia acelerar a taxa de deposição dos produtos autocurativos na rachadura, mas também evitaria o desperdício e perda, inibiria a propagação das fissuras e aumentaria a eficiência dos agentes regeneradores. Os corpos de prova autocurativos produziram produtos autocurativos nas fissuras após a cura em diferentes condições. (ZHANG *et al.*, 2023)

Segundo Zhang *et al.* (2023), sob diferentes níveis de pré-dano, a taxa de recuperação da resistência à compressão aumentou em comparação com o grupo de controle. A combinação de GARs e fibra de PVA mostrou resultados promissores na melhoria da eficiência de autorreparo. A eficiência de autorregeneração foi influenciada pela intensidade do pré-dano, com melhores resultados para diferentes aditivos em diferentes condições.

A cura com água deionizada alimentada com CO₂ superou a cura com água deionizada, e a cura com água do mar superou a cura com água deionizada.

A combinação de água ionizada e CO₂ apresentou os melhores resultados na taxa de recuperação da resistência à compressão e permeabilidade. (ZHANG *et al.*, 2023).

As complexas interações químicas e a alcalinidade da cura em água ionizada contribuíram para uma eficiência de autorreparo melhorada. As curas nos diferentes estados estão representadas nas Figuras 18, 19, 20 e 21, respectivamente: (ZHANG *et al.*, 2023).

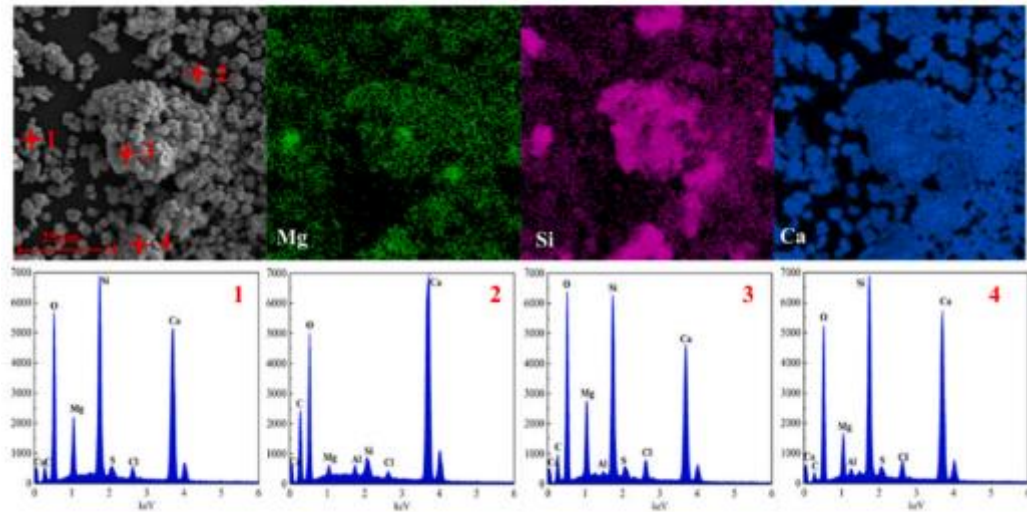


Figura 18 – Cura com água deionizada
Fonte: ZHANG *et al.* (2023, p.17).

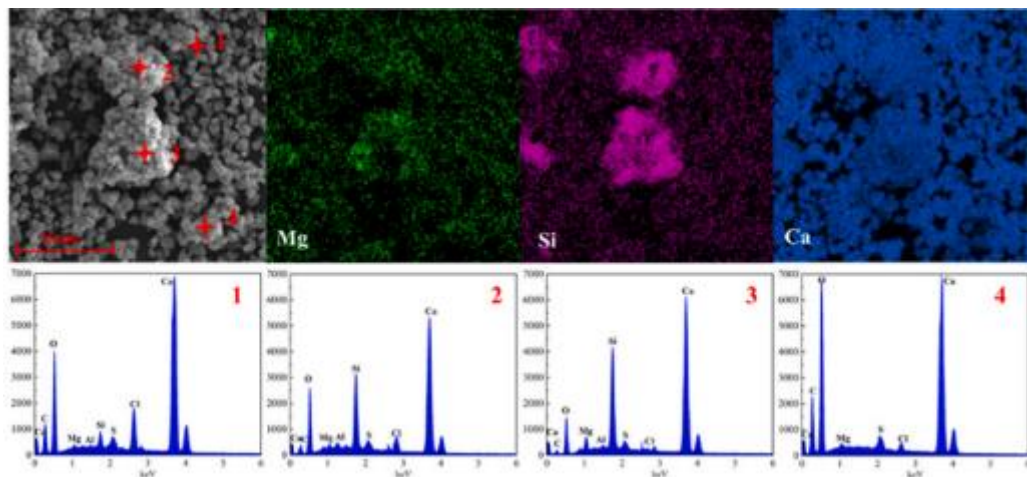


Figura 19 – Cura com água deionizada e CO₂
Fonte: ZHANG *et al.* (2023, p.17).

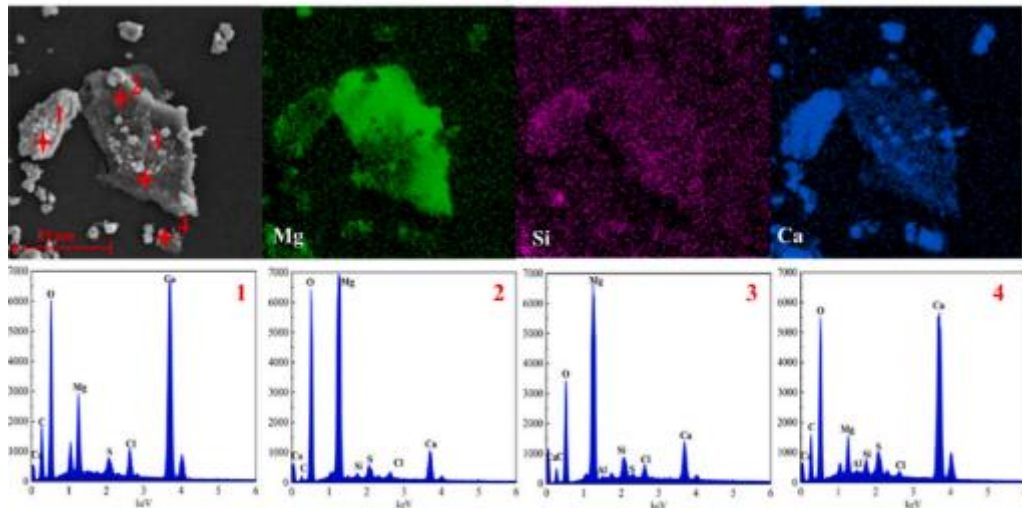


Figura 20 – Cura em água ionizada

Fonte: ZHANG *et al.* (2023, p.17).

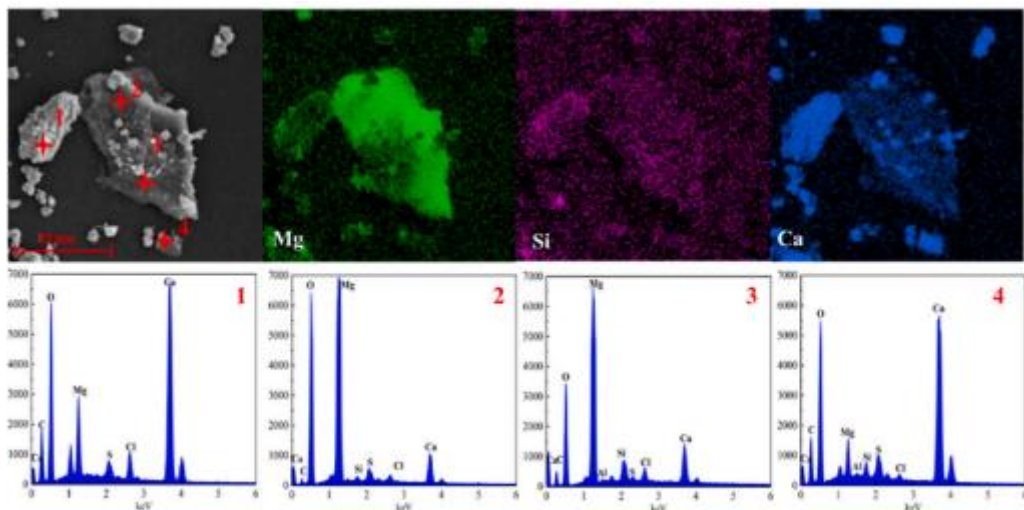


Figura 21 – Cura com água ionizada e CO₂

Fonte: ZHANG *et al.* (2023, p.17).

Ainda segundo Zhang *et al.* (2023), as fibras de PVA desempenharam um papel de ponte na inibição da propagação de fissuras. Os GARs liberaram agentes de autorreparo que preencheram microfissuras, reduziram a porosidade e contribuíram para a recuperação da resistência. A interação entre as fibras de PVA e os produtos de autorreparo melhorou a eficiência geral do autorreparo.

Os agentes de autorreparo liberados pelos GARs resultaram na formação de produtos de autorreparo, principalmente CaCO₃ e gel C-S-H. A cura em água ionizada

promoveu reações químicas adicionais, formando íons complexos e $Mg(OH)_2$ para aprimorar a eficiência de autorreparo (ZHANG *et al.*, 2023).

Em resumo, os resultados indicam que a combinação cuidadosa de aditivos como GARs e fibras PVA, juntamente com a escolha adequada de métodos de cura, pode melhorar significativamente a eficiência de autorreparo em concreto, contribuindo para sua durabilidade e resistência (ZHANG *et al.*, 2023).

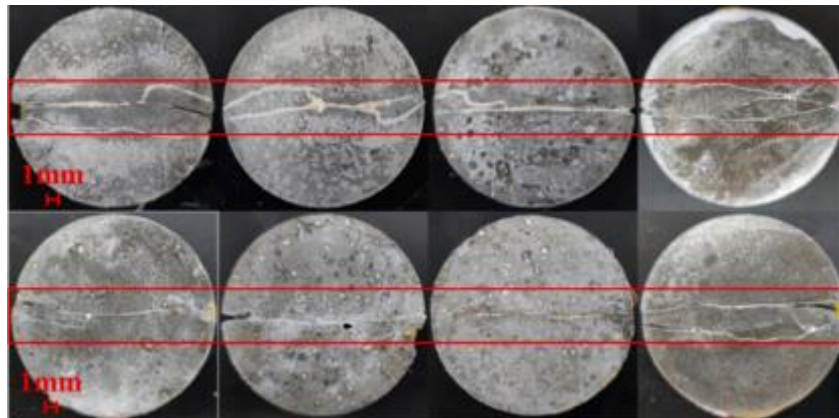


Figura 22 – Amostra de concreto autorregenerativo com ação dos GARs

Fonte: ZHANG *et al.* (2023, p.10).

De acordo com Zhang *et al.* (2023), os GARs foram quebrados para fornecer agentes de autorreparo e melhorar a utilização de CO_2 e íons de água do mar no ambiente. As fibras de PVA inibiram a propagação de fissuras durante o processo de fissuração e forneceram pontos de fixação durante o processo de reparo, melhorando a taxa de utilização dos produtos de autorreparo. O efeito sinérgico dos GARs e das fibras de PVA melhorou a eficiência de autorreparo, melhorando assim as propriedades macroscópicas e microscópicas dos materiais à base de cimento.

A Figura 23 mostra o processo de autorregeneração utilizando as fibras de PVA em conjunto com os GARs, em que há num primeiro momento o corpo de prova em ruptura com aditivo regenerador; em segundo momento, com a adição das fibras de PVA que auxiliam no alojamento dos aditivos, que em seguida gera a substância autorregenerativa e atinge o produto final do corpo de prova com a fissura já reparada, resultando em $CaCO_3$, C-S-H gel e $Mg(OH)_2$ (ZHANG *et al.*, 2023).

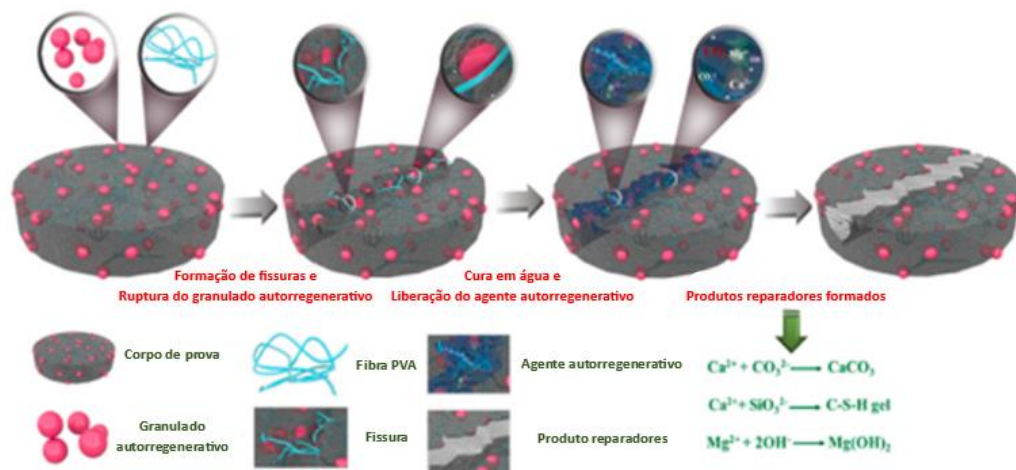


Figura 23 – Esquemática do processo de autorregeneração
 Fonte: Adaptado de ZHANG *et al.* (2023, p.18).

Ao analisar a pesquisa de Zhang et al. (2023) sobre Concretos Reforçados com Fibras (CRFs) e Concreto Reforçado com Fibras de Alto Desempenho (CRFAD) nota-se uma visão detalhada e técnica da eficácia de diferentes tipos de fibras na autorregeneração do concreto. Os resultados obtidos na pesquisa indicam que a combinação de fibras de PVA e GARs, aliada a métodos de cura apropriados, como o uso de água ionizada e CO₂, pode aumentar significativamente a eficiência da autocura em concreto. Isso não apenas contribui para a durabilidade e resistência do material, mas também melhora suas propriedades macroscópicas e microscópicas.

5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CONCRETO AUTORREGENERATIVO

Neste capítulo, é feita uma análise criteriosa das vantagens e desvantagens associadas ao uso do concreto autorregenerativo, fornecendo uma visão equilibrada e abrangente deste material revolucionário, apresentando uma série de características que podem ser vistas tanto como benefícios quanto como limitações.

5.1 Durabilidade

A durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir a condições climáticas adversas, ataques químicos, abrasão e outros processos de degradação. O concreto mantém sua forma, qualidade e capacidade de uso original quando exposto ao ambiente para o qual foi projetado. No entanto, é importante observar que nenhum material é verdadeiramente durável devido à influência das condições ambientais. A microestrutura do material se altera ao longo do tempo, resultando em mudanças nas suas propriedades e, conseqüentemente, limitando sua vida útil. Um material atinge o fim de sua vida útil quando suas propriedades, sob as condições de uso, se deterioraram a ponto de tornar sua utilização insegura e muito dispendiosa para ser recuperada (DE AMORIM, 2010).

Em comparação com o concreto convencional, a capacidade do concreto autorregenerativo em realizar o preenchimento das próprias fissuras, contribui de forma a aumentar a durabilidade da estrutura uma vez que selar estas aberturas contribui para reforçar a resistência do composto de concreto contra a penetração de água e gases, o que, por sua vez, resulta em uma prolongada vida útil (MERAZ *et al.*, 2023). No entanto, há outras vantagens oferecidas pelo concreto autorregenerativo que ajuda a aumentar a durabilidade da estrutura.

Os aditivos cristalinos são aditivos redutores da permeabilidade do concreto (ROIG-FLORES *et al.*, 2015). Os aditivos cristalizantes possuem natureza hidrofílica: esses elementos interagem com a água, partículas de cimento e até mesmo com os produtos solúveis resultantes da hidratação do cimento, e formam silicato de cálcio hidratado e outros precipitados que obstruem os poros (ROIG-FLORES *et al.*, 2015). Após realizar diversos ensaios, Ziegler (2020) constatou que o uso de aditivos

cristalizantes resultou em uma diminuição na penetração de cloretos nos concretos que apresentavam fissuras durante o teste de difusão. Isso levou a um aumento no período de tempo necessário para que esses íons alcançassem a armadura e iniciassem o processo de corrosão.

O polímero superabsorvente – PSA – pode vedar fissuras ao absorver água e inchar, no entanto, sua eficácia é influenciada pela acidez e pelo conteúdo aniônico da solução. Quando o PSA encolhe durante a secagem, cria vazios na pasta de cimento. Em seu estado não inchado, o PSA não pode formar uma barreira (LEE, WONG e BUENFELD, 2010).

5.2 Resistência mecânica

Estudos realizados mostram que a adição de bactérias no concreto para promover sua autorregeneração tem um impacto positivo nas propriedades do concreto quando comparado ao concreto comum. Após ensaios de deformação por tração, o concreto autorregenerativo apresentou resistência até cinco vezes maior que o concreto convencional. Além disso, os ensaios realizados também mostraram aumento de 30,76% de resistência à compressão em três dias, 46,15% após 7 dias e 32,21% de resistência aos 28 dias (DE LEÓN ECHEGARAY, ROJAS e ACAPANA, 2015).

Em comparação ao concreto convencional, o concreto autorregenerativo não é tão afetado pela composição química das chuvas, por conta de os espaços vazios do concreto em questão serem preenchidos pelo resultado da ação das bactérias, que geram precipitado de carbonato de cálcio, fazendo com que diminua a sua permeabilidade (SILVA, PASSARINI e SANTOS, 2017).

O concreto tradicional possui uma fragilidade inerente, sendo suscetível a fissuras e degradação ao longo do tempo, seja devido ao uso contínuo ou a situações como recalques nas fundações de edifícios. No entanto, uma inovação envolve a incorporação de microrganismos bacterianos, resultando em um novo tipo de concreto que exibe uma notável capacidade de flexão, chegando até a se curvar em forma de U sem quebrar. Quando esse material sofre deformações, ele forma fissuras finas que, com o tempo, se fecham, especialmente após períodos de chuvas leves (CLAUDINO *et. al*, 2017).

Em ensaios de Marques da Silva (2018), referente à compressão em corpos de prova de concreto convencional e bioconcreto, nos ensaios realizados, o bioconcreto apresentou uma resistência a compressão aproximadamente 30% maior que o concreto convencional, aos 7 e 28 dias, conforme apresentado no Quadro 1:

Quadro 1 – Resistência à compressão concreto convencional vs. bioconcreto

Ensaio	Dias	Concreto convencional N/mm ² (Mpa)	Bioconcreto N/mm ² (Mpa)
1	7	20,84	27,09
2	28	29,99	38,98

Fonte: adaptado de Marques da Silva (2018, p. 15)

No entanto, Medeiros, Andrade e Helene (2011) constataram uma queda de resistência à compressão expressiva ao realizar um experimento com corpos de provas com a adição de bactérias do gênero *Bacillus subtilis*. As amostras de controle conseguiram resistir a forças de cerca de 1000 kg no ensaio à compressão axial, enquanto as amostras que receberam a adição de bactérias começaram a fissurar quando submetidas a cargas entre 50 e 60 kg (KOGA e SANTOS, 2020). Ainda, segundo Koga e Santos (2020) em pesquisas anteriores, foi relatada uma queda da resistência à compressão no bioconcreto após realizar ensaios com corpos de prova utilizando a adição de bactérias do gênero *Bacillus pseudo firmus*, comparando os corpos de prova com a adição de argila expandida em substituição de parte dos agregados na mistura do concreto. Os resultados destes testes apontaram para uma queda de 50% da resistência à compressão após 28 dias.

5.3 Custos

A manutenção de uma estrutura é essencial para prolongar a sua vida útil, e os custos associados à manutenção corretiva têm aumentado de forma cada vez mais acentuada do que os custos iniciais de construção (POSSAN e DEMOLINER, 2013).

Uma considerável quantia de recursos é alocada para a reabilitação de estruturas de concreto existentes em todo o mundo anualmente. Estima-se que sejam

necessários \$147 por metro cúbico para manutenção e reparos (MERAZ, 2023). Segundo Echegaray, Rojas e Acapana (2015), por ano é calculado um gasto de 20 milhões de dólares para manutenção de estruturas de concreto.

Apesar de o concreto autorregenerativo ser três vezes mais caro de produzir em comparação com o concreto convencional, seu uso reduz substancialmente os gastos associados a reparos decorrentes do surgimento de fissuras ao longo da vida útil do material (CLAUDINO *et al.*, 2017). O concreto autocicatrizante supera o concreto tradicional em termos de durabilidade, proporcionando uma extensão de vida útil da estrutura de 20 a 30 anos a mais (ARAUJO, GODINHO e TANAKA 2018).

No entanto, ao utilizar os mecanismos de autorreparação com base em adições minerais, os custos adicionais não serão significativos, especialmente quando essas adições minerais são empregadas como substitutos parciais do cimento no concreto, uma vez que o valor delas é semelhante ao do cimento (IRRIGARAY e BRAZ-CÉSAR, 2019).

5.4 Redução de impacto ambiental

A construção civil é uma das principais geradoras de resíduos no país. No ano de 2022, a quantidade total de entulho produzida foi estimada em cerca de 120 milhões de toneladas (TORRES, 2023). Ainda, o setor da construção civil é responsável por 15 a 50% do consumo dos recursos naturais, e com certeza é o maior gerador de resíduos de toda a sociedade (JOHN e AGOPYAN, 2013).

As atividades de construção requerem uma quantidade significativa de materiais inertes, como areia e cascalho, que normalmente são obtidos através da extração de sedimentos aluviais. Essa prática pode alterar o perfil e o equilíbrio dos rios, causando problemas ambientais, como mudanças em sua estrutura hidrológica e hidrogeológica. Além disso, a extração de materiais inertes de formações rochosas em áreas montanhosas e acidentadas também representa uma ameaça ao meio ambiente, pois provoca alterações e instabilidade na paisagem (BIANCHINI *et al.*, 2005).

Conforme afirmado por John (2000), a fabricação de cimento e cal envolve um processo que inclui a calcinação do calcário, resultando na significativa emissão de dióxido de carbono CO₂ na atmosfera. Isso se traduz em aproximadamente 785 kg de

CO₂ liberados para cada tonelada de cal virgem produzida, ou mais de 590 kg de CO₂ por tonelada de cal hidratada. No contexto brasileiro, a indústria de cimento é responsável por mais de 6% do total das emissões de CO₂ no país. É crucial destacar que o CO₂ é o principal gás de efeito estufa.

No processo de fabricação do bioconcreto, não há diferenças relevantes quanto ao consumo de energia, no entanto, uma vez que a utilização do bioconcreto em uma estrutura aumenta sua durabilidade, isso resultará na redução dos resíduos gerados por reparos e manutenção nas estruturas irá diminuir. Com isso a utilização do bioconcreto tem o potencial de diminuir em cerca de 30% a quantidade total de resíduos produzidos anualmente no Brasil, o que equivale a uma redução de aproximadamente 1.266.540,71 toneladas por ano (DIAS, 2022).

Ao revisar os estudos de Torres (2023), John e Agopyan (2013), Bianchini et al. (2005), John (2000), e Dias (2022), comparando o concreto convencional com o concreto autorregenerativo, é evidente que embora ambos possuam a mesma matéria-prima, este último, ao evitar eventuais gastos com manutenção devido à autorreparação das próprias fissuras, é portanto mais benéfico em relação ao concreto convencional, contribuindo para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e resíduos sólidos, uma vez que exige uma menor preocupação quanto à remediação das estruturas pré-existentes, e conseqüentemente, resulta num sistema com maior durabilidade e menos solicitação da intervenção humana.

5.5 Sensibilidade ao ambiente

Os estudos mostram que os fatores ambientais também podem influenciar no desempenho do concreto autorregenerativo, uma vez que as condições em que o agente cicatrizante está exposto influenciam em sua ação, podendo aumentar ou diminuir sua capacidade autorregenerativa (IRRIGARAI, BRAZ-CÉSAR, 2019).

Pesquisas realizadas por diversos autores mostram que a disponibilidade de água e a sua composição influenciam de forma significativa no comportamento do concreto autorregenerativo. Os pesquisadores Ter Heide e Schlangen (2007) realizaram testes de cura em ambientes com diferentes níveis de umidade, variando de 60% a 95%, bem como em concretos submersos em água. Os resultados indicaram

que apenas os concretos submersos na água conseguiram uma completa recuperação de sua resistência.

No Brasil a média de precipitação de chuva varia de forma significativa, de forma que há regiões com médias pluviométricas muito altas e por outro lado, regiões em que a chuva é escassa, conforme é possível observar na Figura 24. Dessa forma, uma vez que a disponibilidade de água e umidade é um fator que influencia o comportamento do autorregenerativo, há a possibilidade que esse material se comporte de forma diferente de acordo com a região em que está sendo usado. Sendo assim, pode apresentar viabilidade de sua aplicação em determinados locais e em outros não.

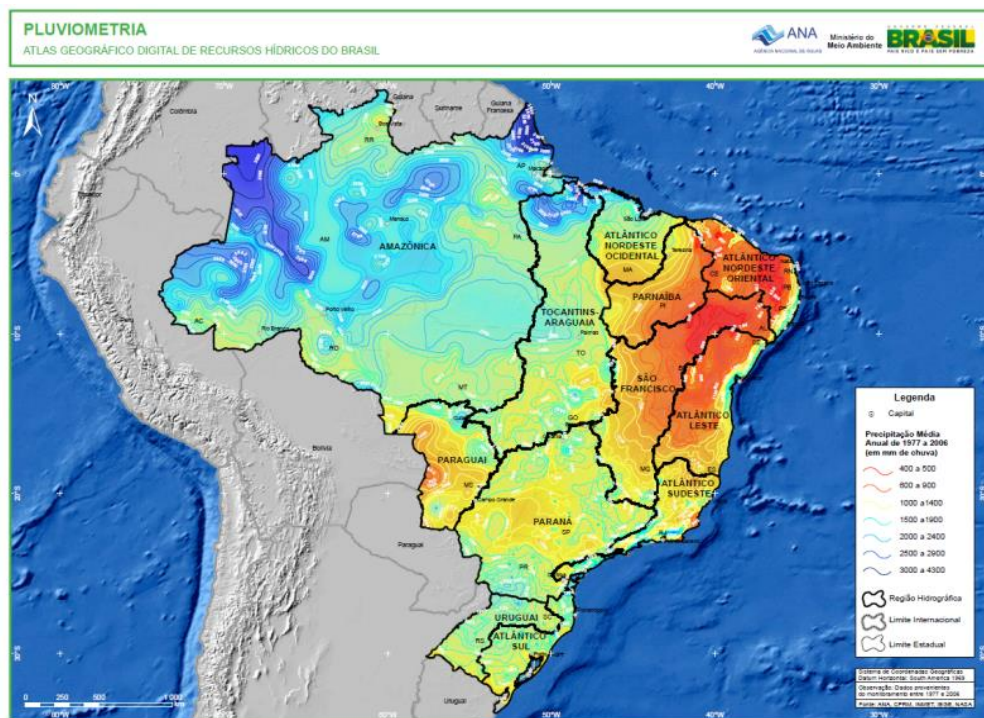


Figura 24 – Mapa da média pluviométrica no Brasil entre 1977 e 2006
Fonte: Catálogo de Metadados da Agência Nacional de Águas (ANA), [s.d.].

Além da disponibilidade da água há outros fatores que podem influenciar no potencial de autorregeneração do bioconcreto. De acordo com Lee, Wong e Buenfeld (2010), no caso dos polímeros superabsorventes a concentração iônica da água que entra em contato com o concreto irá influenciar na taxa de expansão do PSA. Sendo que se o líquido externo apresentar uma baixa concentração iônica o PSA se expandirá de forma mais significativa.

No entanto, em comparação com o concreto convencional, o concreto autorregenerativo possui a característica de constituir estruturas com menor índice de permeabilidade de água devido à ação dos agentes de preencherem as fissuras. Esse fator contribui para que as estruturas sofram menos com as intempéries decorrentes de alterações químicas podendo ocorrer com a interferência de chuvas (SILVA, PASSARINI e SANTOS 2017).

Em resumo, a análise dos estudos de Irrigarai e Braz-César (2019), Ter Heide e Schlangen (2007), Lee, Wong e Buenfeld (2010), e Silva, Passarini e Santos (2017) coletivamente sublinham que, embora o concreto autorregenerativo ofereça vantagens significativas em termos de durabilidade e resistência, sua eficácia está intrinsecamente ligada às condições ambientais, como a disponibilidade e a composição da água. Portanto, a aplicação eficiente desse material exige uma compreensão detalhada dos fatores ambientais específicos de cada região, garantindo que suas propriedades de autorregeneração sejam otimizadas para as condições locais.

6 ESTUDOS DE CASO

Este capítulo é dedicado à análise de estudos de caso selecionados, que foram escolhidos com o propósito de elucidar aspectos específicos relacionados ao tema central deste trabalho de conclusão de curso. Busca-se examinar cada caso em detalhes, suas particularidades, desafios e soluções encontradas, a fim de enriquecer a compreensão do tema em questão.

6.1 Aplicação de bioconcreto em uma obra subterrânea

Segundo Du, Qian e Xie (2023), a transição da pesquisa em laboratório para a aplicação real em projetos de engenharia é um passo fundamental. O caso realizado na China aborda um estudo prático de uso do bioconcreto em uma parede de construção subterrânea, servindo como uma experiência para entender sua aplicabilidade em projetos de maior escala, demonstrando como o uso do bioconcreto, é especialmente relevante em estruturas onde as fissuras são difíceis de prevenir e que demandam altos padrões de impermeabilização.

Em projetos de engenharia subterrânea, as estruturas podem ser categorizadas em três principais segmentos: placa inferior, as paredes laterais e placa superior, exemplificado na Figura 25.



Figura 25 – Esquema da estrutura de obra subterrânea
Fonte: Adaptado de DU, QIAN e XIE (2023, p. 2).

Dentre elas, as paredes laterais são as maiores, amplas em área e restringidas pelo fundo e pelos lados, resultando no maior risco de fissuração, tornando-as mais suscetíveis a rachaduras. A identificação e correção manual de fissuras pode não apenas encarecer o projeto, mas também corre o risco de não detectar todas as rachaduras existentes, conforme destacado por Du, Qian e Xie (2023).

De acordo com os autores supramencionados, no projeto de estudo, a parede lateral possui dimensões de 33,6 m de comprimento, 3,3 m de altura e 0,8 m de espessura, uma parte dela foi concretada utilizando bioconcreto, outra parte com concreto comum, e o agente de cura usado possui uma estrutura do tipo núcleo-casca, ou seja, são encapsulados com diâmetro de 3,2–4,2 mm com microrganismo do gênero *bacillus*, como mostra a Figura 26.

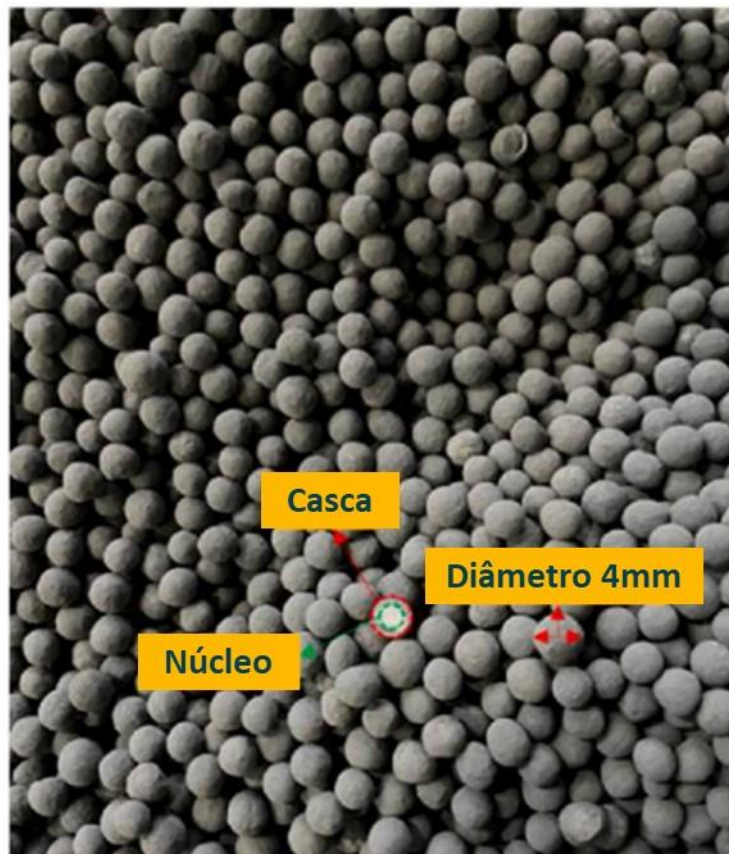


Figura 26 – Morfologia do bioconcreto
Fonte: Adaptado de DU, QIAN e XIE (2023, p. 3).

Segundo Du, Qian e Xie (2023), para evidenciar visualmente a capacidade de cura do bioconcreto, foram comparadas fissuras de uma parede lateral de bioconcreto com aquelas de uma parede lateral de concreto tradicional. Ao término de 28 dias, a

fissura na parede de bioconcreto mostrou-se completamente regenerada, enquanto a do concreto tradicional permaneceu visível, como nas Figuras 27 e 28.

Além disso, conforme os autores, análises composicionais dos materiais formados durante a regeneração indicaram a predominância do carbonato de cálcio. Este composto, oriundo da atividade química das bactérias presentes no bioconcreto, desempenhou um papel crucial na selagem e recuperação da fissura, destacando a eficácia deste tipo de concreto.

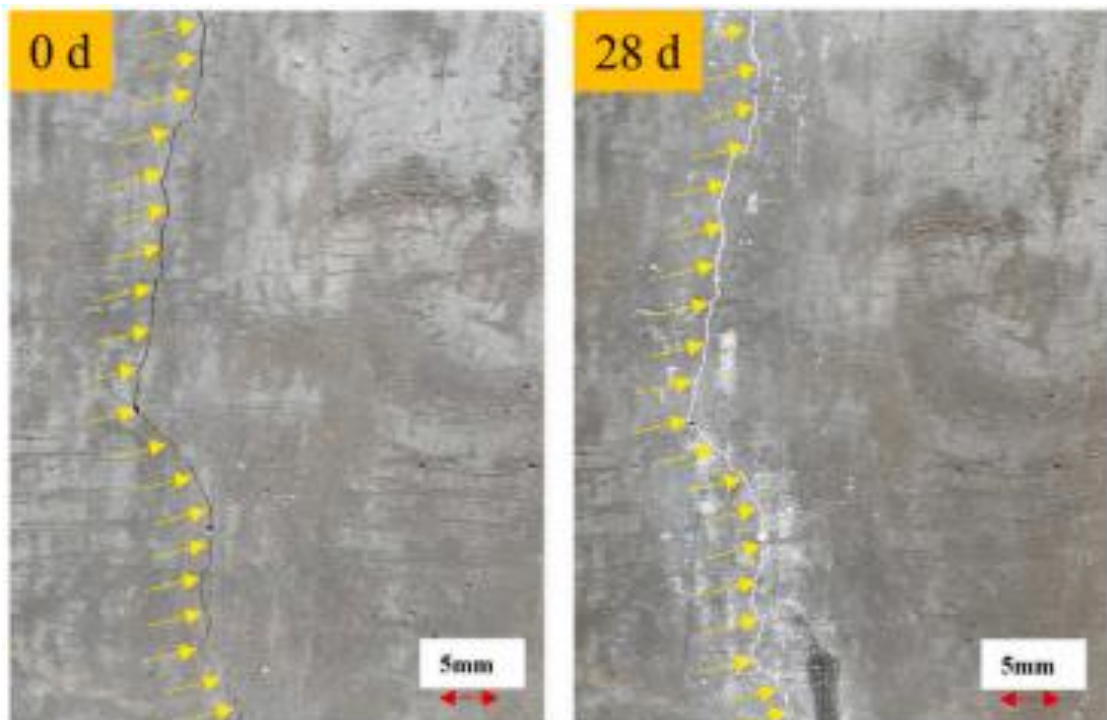


Figura 27 – Fissura da amostra do bioconcreto
Fonte: DU, QIAN e XIE (2023, p. 3).

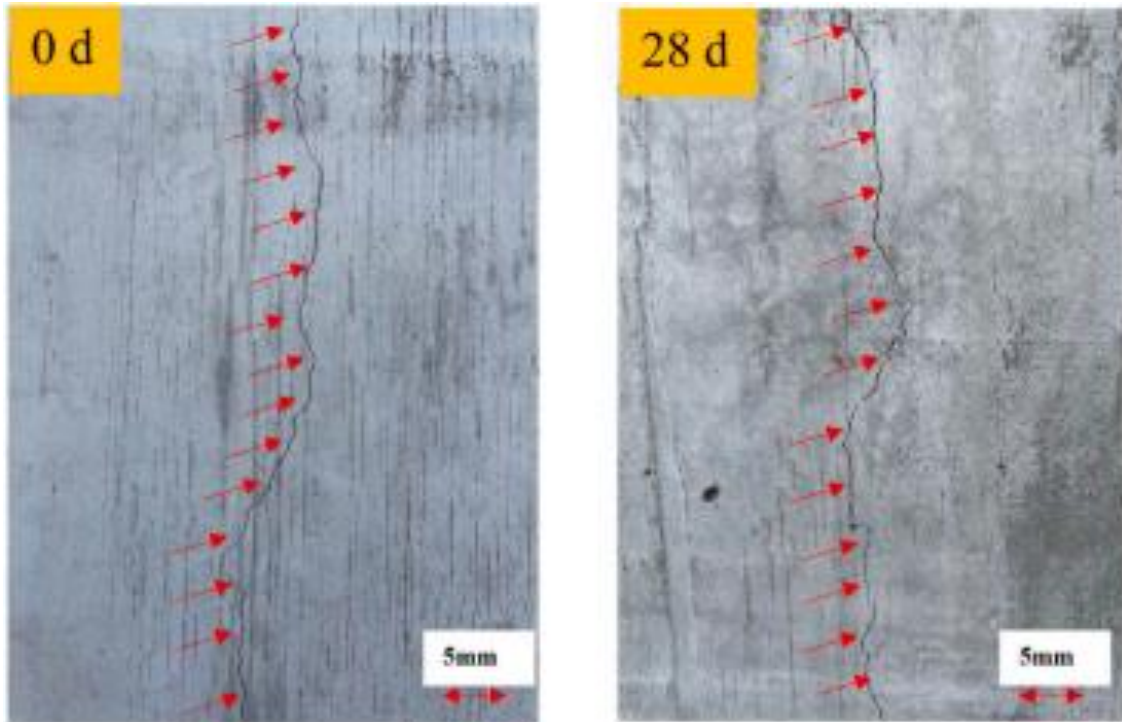


Figura 28 – Fissura da amostra do concreto comum
 Fonte: DU, QIAN e XIE (2023, p. 3).

A aplicação do bioconcreto apresenta benefícios significativos para a engenharia, especialmente no que se refere à prevenção e controle de fissuras. Observou-se que o bioconcreto estudado não compromete atributos essenciais do concreto, como sua trabalhabilidade, resistência à compressão e retração por secagem. Além disso, sua incorporação no concreto é direta, sem interferir na sua aplicabilidade em projetos de engenharia. Desse modo, ressalta-se o potencial desta abordagem como uma solução inovadora no tratamento e prevenção de fissuras em contextos de estruturas (DU, QIAN e XIE, 2023).

6.2 Primeira grande aplicação de concreto autorregenerativo no Reino Unido

Segundo Al-Tabbaa *et al.* (2019), ativos de infraestrutura, como pontes, túneis e barragens, desempenham um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico de um país. Em particular, compostos à base de cimento, como o concreto, constituem a maioria desses ativos, e aproximadamente metade do orçamento da construção é direcionada para sua reparação e manutenção. A degradação desses materiais muitas vezes é vista como uma consequência inevitável, levando à necessidade de intervenções caras de inspeção, manutenção, reparo e substituição.

Estudos recentes indicam uma crescente ênfase na adoção de materiais de infraestrutura avançados. Porém, os progressos relacionados ao concreto de autorregeneração autônoma têm se concentrado majoritariamente em estudos laboratoriais. A introdução dessas inovações tecnológicas em estruturas de grande escala em campo apresenta restrições. Tais limitações surgem devido à complexidade em escalar essa tecnologia, assim como desafios específicos ligados à sua implantação prática no ambiente alvo (AL-TABBAA *et al.*, 2019).

O caso analisado, conforme Al-Tabbaa *et al.* (2019), relaciona-se ao uso de microcápsulas para autorregeneração autônoma em estruturas de concreto. Estas microcápsulas, pequenas partículas dotadas de uma casca protetora que encapsula diferentes substâncias, ao serem integradas aos materiais, oferecem uma resposta localizada a danos por meio de sua ruptura, resultando na liberação e ativação do agente restaurador. Quando a estrutura apresenta fissuras, ocorre a ruptura das microcápsulas, e a eficácia da autorregeneração é determinada pela composição do material encapsulado, gerando produtos que atuam no preenchimento, vedação ou cura da fissura. Como mostra o processo na Figura 29.

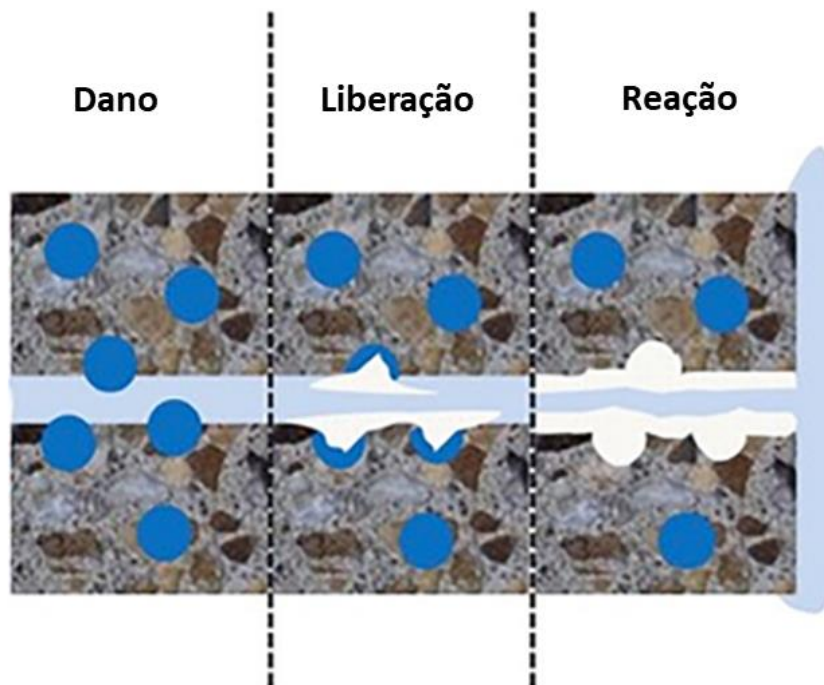


Figura 29 – Processo de autorregeneração por microcápsulas
Fonte: Adaptado de AL-TABBAA *et al.* (2019, p. 671).

Segundo Al-Tabbaa *et al.* (2019), o caso envolveu a construção de dois tipos de painéis no complexo do projeto de atualização da rodovia A465 *Heads of the*

Valleys, localizada no Reino Unido. Um dos painéis foi composto por concreto autorregenerativo, enquanto o outro, usado para fins de comparação, foi produzido com concreto convencional. Ao serem submetidos a carga aplicada por um dispositivo hidráulico, estes painéis foram projetados para apresentar fissuras a 500 mm de sua base. Adicionalmente, uma viga de apoio foi acoplada à parte frontal do painel, assegurando uma distribuição uniforme da carga. Detalhes construtivos destes painéis podem ser visualizados nas Figuras correspondentes a 30 e 31.

O destaque no painel autorregenerativo foi o uso de microcápsulas de casca composta por gelatina arábica, tendo silicato de sódio como conteúdo interno e agente de cura. Estas microcápsulas apresentavam um diâmetro médio de 290 μm e foram incorporadas na proporção de 8% em relação ao volume do cimento. Isso se traduz em aproximadamente 2,67% em relação ao peso do cimento e cerca de 0,47% da composição total da mistura de concreto (AL-TABBAA *et al.*, 2019).

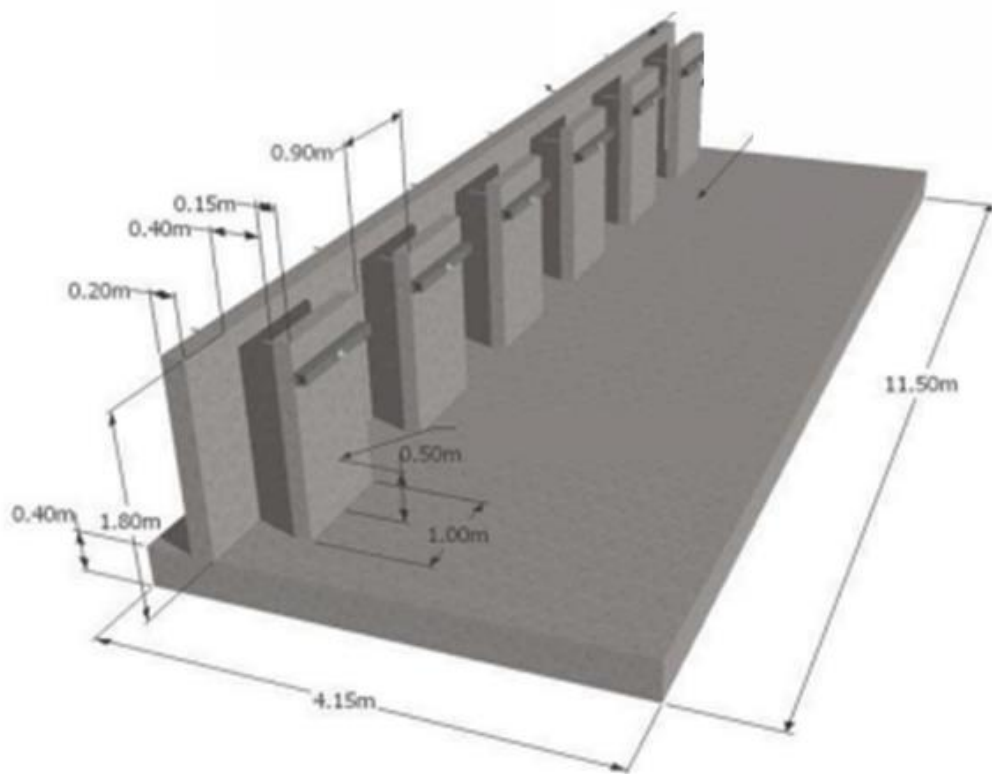


Figura 30 – Modelo digital da estrutura do painel de ensaio
Fonte: Adaptado de DAVIES *et al.* (2018, p. 2).

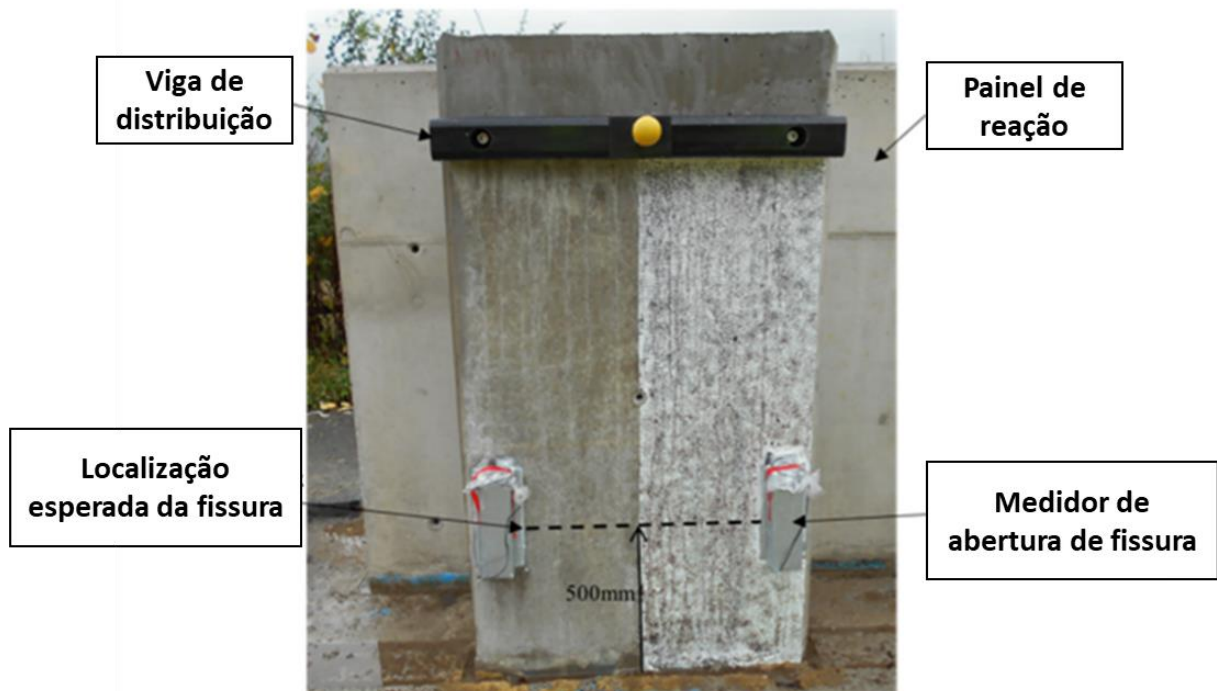


Figura 31 – Modelo real da estrutura do painel de ensaio
 Fonte: Adaptado de AL-TABBAA *et al.* (2019, p. 673).

Conforme Al-Tabbaa *et al.* (2019), após um período de cura de 35 dias, essas paredes sofreram fissuras mecânicas. Posteriormente, ocorreu um novo carregamento e iniciou-se um monitoramento de autocura durante seis meses. Durante esse período, foram realizadas avaliações utilizando-se de métricas como permeabilidade do ar, profundidade e medições microscópicas da largura das rachaduras.

Ao adicionar 8% de microcápsulas em relação ao volume do cimento, notou-se uma leve redução na resistência mecânica. As cargas de pico iniciais foram de 23,9 kN para os painéis de controle e 21,9 kN para os painéis com microcápsulas. As cargas residuais também seguiram essa tendência, com 17,4 kN para o controle e 16,2 kN para os painéis com microcápsulas, indicando um impacto na resistência mecânica causado pela presença das microcápsulas. Contudo, os painéis com microcápsulas exibiram avanços significativos em aspectos como redução na largura e profundidade das fissuras, além de apresentar uma notável recuperação na permeabilidade (AL-TABBAA *et al.*, 2019).

Os resultados atestam a eficácia e viabilidade da autorregeneração proporcionada pelo silicato de sódio microencapsulado; de acordo com Al-Tabbaa *et*

al. (2019), em 14 e 28 dias, houve uma cura acelerada de 49% e 63% na parede da microcápsula, em contraste com os 14% e 36% observados nos painéis de controle. Além disso, a redução na profundidade média da fissura nos painéis de microcápsula foi de 39% após 14 dias, chegando a 58% ao final do período, enquanto os painéis de controle apresentaram reduções de 8% e 20%, respectivamente. A eficácia das microcápsulas de silicato de sódio também foi evidenciada pela expressiva recuperação da permeabilidade e por um aumento de resistência após a cura de 25%, superando em 10% a performance dos painéis de controle.

6.3 Aplicação de concreto autorregenerativo em uma cortina de contenção

Produzido pela Votorantim, o Cristalmix é um concreto próprio para estruturas sujeitas à pressão hidrostática. Ele contém cristais em sua formulação, que reagem em contato com a água e regeneram fissuras de até 0,4 mm, aumentando a durabilidade da estrutura (VOTORANTIM, 2018).

Segundo a empresa Votorantim (2018), esse concreto é indicado para aplicações em caixas d'água, fundações em contato com água ou solos agressivos, cisternas, construções em áreas litorâneas, lajes de subpressão, estações de tratamento de água, parede diafragma, lajes de cobertura e estruturas em contato com água.

Para demonstração do produto, foi realizado um comparativo de desempenho entre a utilização do concreto convencional e do concreto Cristalmix. No caso do concreto convencional, foi aplicado sistema de manta drenante e tubo de dreno revestido com camisa de geotêxtil, enquanto no concreto Cristalmix foi utilizada fita hidroexpansiva, composto de selamento que evita problemas de infiltração em juntas de construção (SOARES, 2019).

Ambos foram aplicados em uma cortina de contenção numa obra com presença de lençol freático acima do nível do subsolo na região de Pinheiros em São Paulo/SP. A Figura 32 esquematiza as regiões A e B onde foram aplicados o concreto convencional e o concreto Cristalmix, respectivamente (VOTORANTIM, 2018).

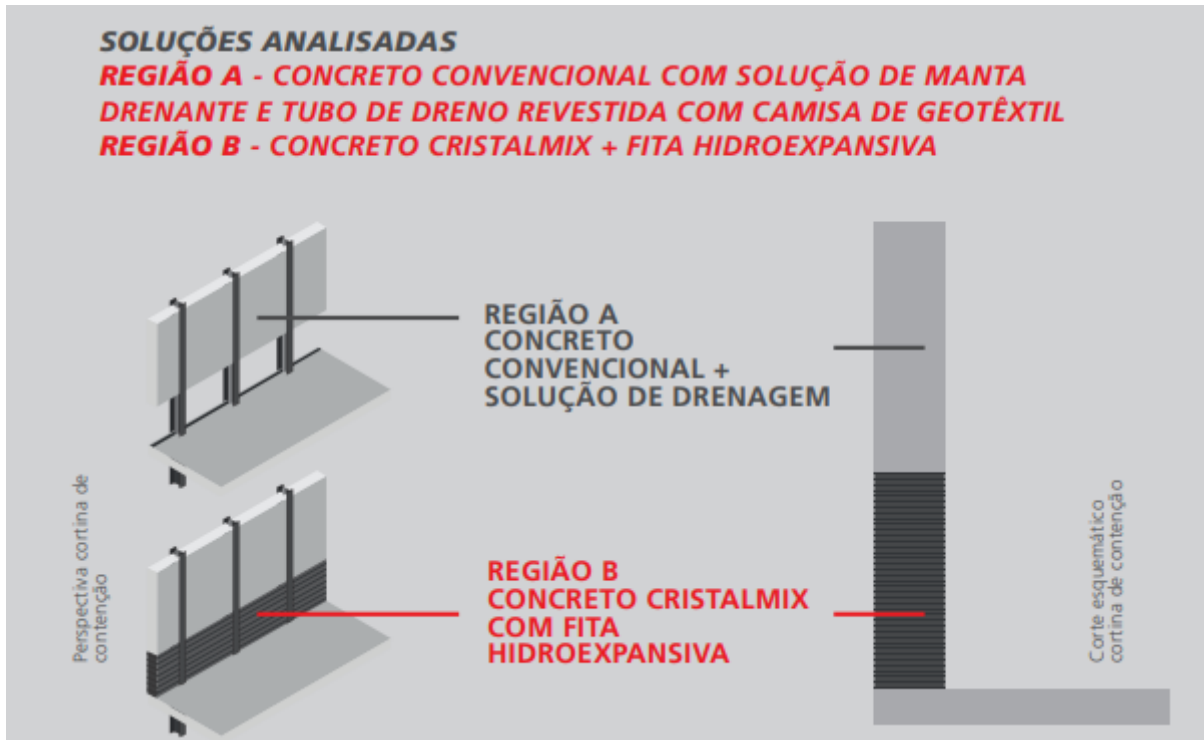


Figura 32 – Esquema da aplicação dos dois tipos de concreto
 Fonte: Adaptado de VOTORANTIM (2018).

A Figura 33 mostra a montagem e aplicação da combinação com corte esquemático da cortina de contenção na região A, enquanto a Figura 34 ilustra a execução na região B.

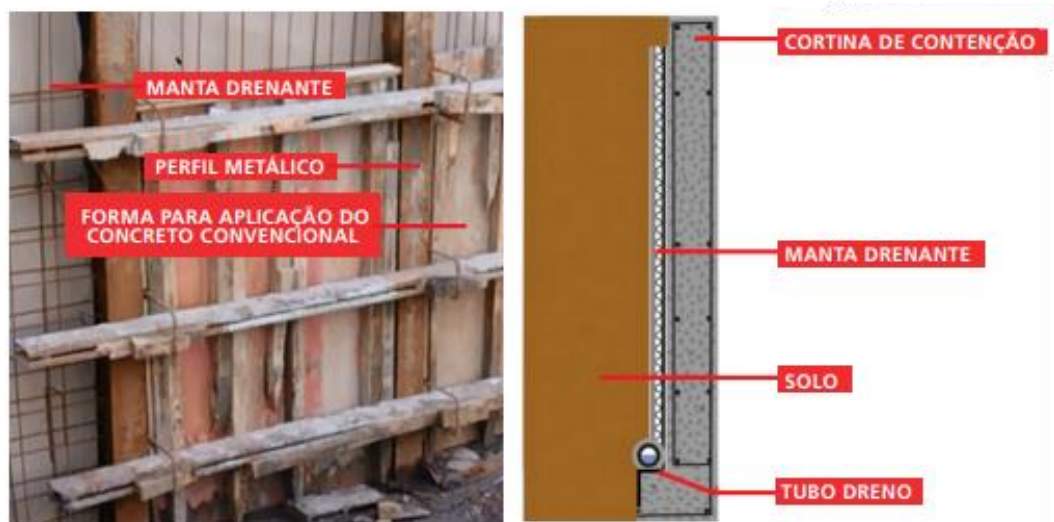


Figura 33 – Aplicação na região A
 Fonte: VOTORANTIM (2018).



Figura 34 – Aplicação na região B
Fonte: VOTORANTIM (2018).

Após seis meses da concretagem de ambas as regiões, foi feita a análise dos resultados. Na região A, executada com concreto convencional, verificaram-se pontos de falhas na impermeabilização, apresentando eflorescência e manchas por umidade. Contudo, a região B permaneceu íntegra e sem sinais de umidade e eflorescência. Os resultados obtidos pela Votorantim (2018) podem ser observados na Figura 35.

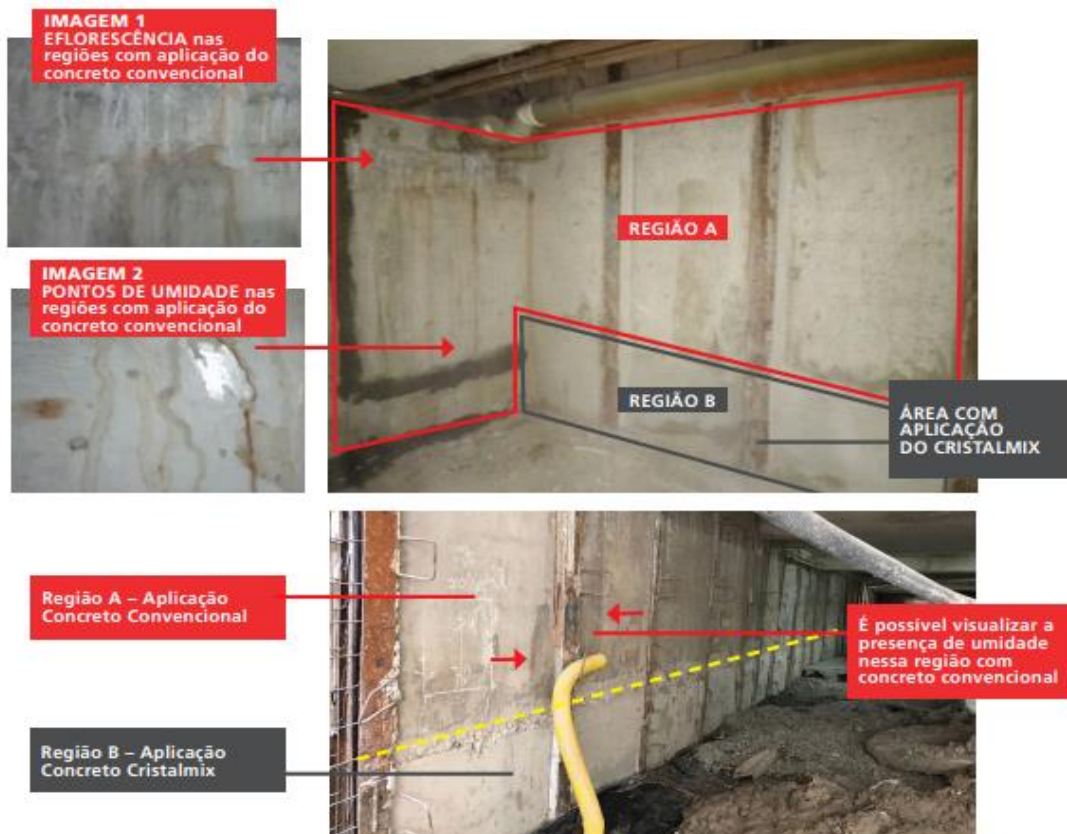


Figura 35 – Resultados após seis meses
Fonte: VOTORANTIM (2018).

O concreto estudado apresentou capacidade de impermeabilidade a água na análise apresentada. Paralelamente, a propriedade de autorregeneração de fissuras é possível na presença de umidade. As reações químicas que proporcionam a autorregeneração do concreto contendo catalisadores cristalinos ocorrem quando há um nível adequado de umidade, que geralmente é fornecido pelo transporte de água por meio das fissuras. (BIANCHIN, 2018).

6.4 Aplicação de concreto com aditivo cristalizante no Museu da Imagem e do Som – RJ

Uma obra notável no Brasil que empregou aditivos cristalizantes no concreto é a laje de subpressão na nova sede do Museu da Imagem e do Som, situada na área de Copacabana, no Rio de Janeiro, substituindo as instalações do museu anteriormente inaugurado em 1965 (BRITEZ *et al.*, 2014).

De acordo com Britez *et al.* (2014), por se situar a 50 m da orla marítima, a construção requereu procedimentos e engenhosidades específicas para a concepção de uma laje de subpressão estanque com elevado volume de 1200 m³ e espessura de 1 m em altura.

Britez *et al.* (2014) contam que na composição do concreto foi utilizada adição de sílica ativa de pelo menos 5%, e aditivo impermeabilizante por cristalização integral, com propriedade de autorregeneração de fissura, dosado conforme especificações técnicas do fabricante.

A execução da laje de subpressão ocorreu entre os meses de novembro de 2012 e janeiro de 2013 numa cota de aproximadamente 10 metros abaixo do nível do mar. A Figura 36 apresenta a laje de subpressão já concluída com as fôrmas dos pilares do 2º subsolo já lançados (BRITEZ *et al.*, 2014).



Figura 36 – Laje de subpressão concluída.
Fonte: adaptado de BRITEZ *et al.* (2014).

Conforme Britez *et al.* (2014), as condições estabelecidas pelo projeto foram atendidas, e foi possível constatar que não foram identificadas fissuras de nenhuma natureza por onde a água pudesse penetrar, tanto durante o processo como após a conclusão das etapas.

Os resultados mostraram que a composição do concreto, o plano de concretagem e os métodos de execução empregados desempenharam um papel crucial na promoção de uma estrutura íntegra e com propriedades estanques. Com isso foi possível dispensar alternativas convencionais de impermeabilização, além de aplicar técnicas inovadoras na construção dessa laje do M.I.S. (TAKAGI *et al.*, 2013).

6.5 Aplicação de concreto com aditivo cristalizante no Museu de Arte do Rio – RJ

Dentre as construções inovadoras no Rio de Janeiro, destaca-se a execução da Cobertura Fluida do Museu de Arte do Rio (M.A.R.) no centro da cidade, um projeto que utilizou concreto com adição de sílica ativa e agente cristalizante. (TAKAGI *et al.*, 2013).

Segundo Takagi *et al.* (2013), a cobertura possui 66 metros de comprimento e 25 m de largura, totalizando 1650 m² de área. Possui a forma de uma onda com desníveis de até 1,75 m, o que causa impressão de fluidez com diferentes espessuras de aproximadamente 15 cm, parecendo flutuar a cerca de 30 m de altura apoiada em 37 tubos de aço galvanizado, segundo o autor. A cobertura fluida do Museu de Arte do Rio – RJ, ainda em construção, pode ser observada na Figura 37, a seguir:

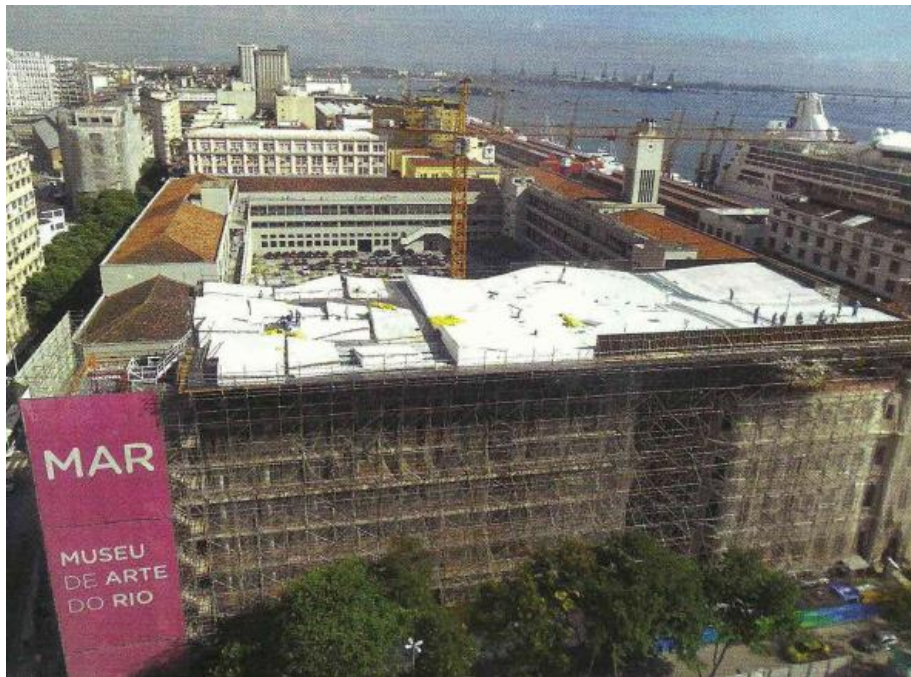


Figura 37 – Cobertura fluida de concreto autorregenerativo do Museu de Arte do Rio - M.A.R. - RJ
Fonte: ROCHA (2013).

O projeto e execução da cobertura foram feitas a fim de prevenir a formação de fissuras na estrutura. Takagi *et al.* (2013) explica que a laje foi concretada em um único dia, com um processo contínuo de 13 horas, a fim de evitar qualquer junta de concretagem na cobertura. Durante a concretagem dos 320 m³ de concreto, uma parte da água foi substituída por gelo, e todos os lotes de concreto dos caminhões foram lançados a temperaturas variando entre 16°C e 21°C. Isso foi feito para assegurar a adequada trabalhabilidade do material, retardar a pega e evitar a formação de fissuras.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste trabalho, foi possível analisar a complexidade dos concretos autorregenerativos, uma inovação que tem o potencial de redefinir as práticas construtivas em estruturas de concreto. Através da análise detalhada das diversas tipologias disponíveis tanto na literatura quanto no mercado, pôde-se observar a amplitude e diversidade de soluções que essa tecnologia apresenta.

Sistemas encapsulados apresentam vantagens como uma eficácia localizada, pois o agente de cura é liberado precisamente onde a cápsula é rompida. Isso resulta em uma resposta de cura previsível e eficiente, devido à consistência na quantidade e concentração do agente por cápsula. Por outro lado, os sistemas vasculares, com sua capacidade de promover múltiplos eventos de regeneração na mesma área, oferecem uma distribuição mais ampla do agente de cura, abrangendo vastas regiões do concreto devido à sua interconexão. Contudo, sua implementação é mais desafiadora, dada a complexidade de incorporar uma rede vascular eficiente no concreto, e existe uma vulnerabilidade inerente à possível danificação dessa rede durante o processo construtivo.

A premissa dos estudos apresentados traz um ideal de aumento da durabilidade e longevidade das estruturas, que mesmo possuindo investimento inicial maior quando em comparação com o concreto convencional, o autorregenerativo não necessita de uma disposição de custos de manutenção tão frequente quanto o primeiro, uma vez que os defeitos, sejam falhas ou fissuras, seriam facilmente remediados pela ação dos agentes nele inseridos. Ao mimetizar a capacidade de autorregeneração encontrada na natureza, o concreto autorregenerativo representa um avanço significativo no que tange a construção civil e seus métodos construtivos.

Os estudos de casos apresentados serviram como testemunhos tangíveis das potencialidades desses concretos, mostrando que, quando empregados de forma adequada, eles podem não apenas atender, mas superar as expectativas iniciais. Os corpos de prova de concretos autorregenerativos demonstram resistências mecânicas comparáveis ou, frequentemente, superiores ao concreto convencional. Adicionalmente, eles exibem uma recuperação de fissuras notavelmente mais ágil e eficaz.

Ressalta-se a necessidade de aprofundamento dos estudos sobre o tema no contexto brasileiro. Enquanto o país já detém uma rica literatura sobre bioconcreto, há

lacunas no entendimento de outras variantes do concreto autorregenerativo. Além disso, muito do que se conhece baseia-se em estudos laboratoriais, havendo um vazio evidente em estudos de caso e aplicações práticas no Brasil. Diante disso, torna-se imperativo que futuras pesquisas no país ampliem o escopo de investigação, indo além dos laboratórios e buscando validações em cenários reais. Dessa forma, o Brasil poderá alinhar-se às vanguardas internacionais no uso otimizado do concreto autorregenerativo, combinando inovação, durabilidade e eficiência.

Outra sugestão de estudo futuro consistiria em realizar uma análise comparativa detalhada entre os custos associados ao uso de concretos autorregenerativos e os gastos tradicionais com manutenção de estruturas de concreto, buscando compreender as barreiras econômicas e de mercado que limitam sua adoção e delineando estratégias para mitigá-las e promover sua aplicação mais ampla.

Em suma, diante dos resultados obtidos e da análise crítica realizada, é possível afirmar que os concretos autorregenerativos representam mais do que uma mera tendência no campo da engenharia civil. Eles são a materialização da intersecção entre inovação, redução de impacto ambiental e eficiência. Assim, espera-se que este trabalho sirva como ponto de partida para profissionais e pesquisadores, encorajando a adoção, aplicação e aprimoramento contínuo dessa tecnologia, visando um futuro mais resiliente para as construções.

8 REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Básico sobre cimento**. 2019. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/>. Acesso em: 05 abr 2023.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 8953: Concreto para Fins Estruturais** – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Catálogo de Metadados da ANA**: Atlas Geográfico de Recursos Hídricos do Brasil. Brasília. [s.d.] Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>>. Acesso em 09 out. 2023.

AL-TABBAA, A. *et al.* **First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 208, p. 669-685. Cambridge: ed. Elsevier, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819304714>>. Acesso em: 29 set 2023

ALVES, L. *et al.* **Characterization of bioconcrete and the properties for self-healing**. *Proceedings* 38, nº 1: 4. 9 p. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-3900/38/1/4>>. Acesso em: 30 ago 2023.

ARAUJO, D. T.; GODINHO, P. F.; TANAKA, Y. G. **Desenvolvimento de metodologia para verificação de selamento de fissuras e incremento de resistência em concreto autocicatrizante**. 2018. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, São Paulo. Disponível em: <https://engenhariacompartilhada.com.br/Download/Trabalhos/DESENVOLVIMENTO-DE-METODOLOGIA-PARA-VERIFICACAO-DE-SELAMENTO-DE-FISSURAS.pdf>>. Acesso em: 09 out. 2023.

ARIVABENE, Antonio Cesar. **Patologias em estruturas de concreto armado: Estudo de caso**. Revista Especialize On-line IPOG, Goiânia, v. 3, n. 10, p. 1-22, 2015. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/50485637/antonio-cesar-arivabene-14121142.pdf>>. Acesso em: 06 mar. 2023.

BIANCHIN, F. H. **Avaliação da auto cicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS. 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/188442>>. Acesso em: 04 set. 2023.

BIANCHINI G.; MARROCCHINO E.; TASSINARI R.; VACCARO C. **Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal**. *Waste Management*. V. 25 (2), p. 149-159. Department of Earth Sciences, University of Ferrara, Corso Ercole I D'Este: ed. Elsevier, 2005. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X04001576?via%3Dihub> Acesso em: 25 set. 2023

BLAISZIK, B. J. *et al.* **Self-healing polymers and composites.** *Annual Review of Materials Research*, v. 40, p. 179-211, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Sharlotte-Kramer/publication/228660410_Self-Healing_Polymers_and_Composites/links/56322f8708ae13bc6c381ab5/Self-Healing-Polymers-and-Composites.pdf>. Acesso em: 22 jul 2023.

BRITEZ, C. *et al.* **Estanqueidade de lajes de subpressão. Caso MIS-RJ.** *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 7, n. 6, p. 913–921, dez. 2014. Disponível em: <[55CBC0130_ibraccon.pdf \(exemplo.eng.br\)](https://www.ibraccon.org.br/revista/55CBC0130_ibraccon.pdf)> Acesso em: 07 out 2023

CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos.** 2018. 295 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: construção e infraestrutura) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/202446>>. Acesso em 01 abr. 2023.

CARMONA F. A. **Curso prático de diagnóstico, reparo, reforço e proteção de edificações em concreto.** São Paulo: Abece, 2005.

CENTRO PAULA SOUZA. **Etec de Americana cria bioconcreto capaz de se autorregenerar.** São Paulo, 9 mar 2023. Disponível em: <https://www.cps.sp.gov.br/etec-de-americana-cria-bioconcreto-capaz-de-se-autorregenerar/> Acesso em: 20 mar. 2023

CHAHAL, N. K.; SIDDIQUE, R. **Effect of ureolytic bacteria on concrete properties.** *Construction and Building Materials*, v. 25, pp. 3791-3801. Ed. Elsevier, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811001504>>. Acesso em: 19 maio 2023.

CHEUNG, J.; JEKNAVORIAN, A.; ROBERTS. L. SILVA. D. **Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement.** *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1289–1309. Ed. Elsevier, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611000664>>. Acesso em: 04 set. 2023.

CORSINI, R. **Trinca ou fissura?** São Paulo: Técnica, v. 160, 2010. Disponível em: https://www.academia.edu/29245558/Trinca_ou_fissura_T%C3%A9cnica?auto=download Acesso em: 27 mar. 2023.

DAVIES, R. *et al.* **Large scale application of self-healing concrete: Design, construction, and testing.** *Frontiers in Materials*, v. 5, p. 51, 2018. <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2018.00051/full>>. Acesso em: 29 set 2023

DAVIES, R. *et al.* **Multi-scale cementitious self-healing systems and their application in concrete structures.** p. 12. 2016. Disponível em:

<<https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/93656/1/DundeeM4Lpaper.pdf>>. Acesso em: 28 ago 2023.

DE ABREU CLAUDINO, C. M. *et al.* **Presença de bactérias no concreto: uma análise da biodeterioração e biodegradação.** CONPAR POLI/UPE, v. 1 n. 1, 2017. Disponível em: <<http://revistas.poli.br/~anais/index.php/CONPAR/article/view/612>>. Acesso em: 03 out. 2023.

DE AMORIM, A. A. **Durabilidade das estruturas de concreto armado aparentes.** 2010. 74 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte/MG. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9A4GDM/1/durabilidade_das_estruturas_de_concreto_armado_aparentes.pdf>. Acesso em: 03 out. 2023.

DE BELIE, N. *et al.* **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures.** *Advanced Materials Interfaces*, v. 5, n. 17, 2018. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/admi.201800074>>. Acesso em: 08 set. 2023.

DE FREITAS, A. A. *et al.* **Bioconcreto: uma revisão de sua aplicação na construção civil.** *Research, Society and Development*, v. 10, n. 4, p. 2-3, 2021. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14270>>. Acesso em: 22 maio 2023

DE LEÓN ECHEGARAY, C. F. P.; ROJAS, S. K. H.; ACAPANA, E. S. **Los beneficios del uso de bacterias en el concreto autorregenerante.** *Civilizate*, n. 7, p. 36-38, 2015. Disponível em: <<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/16153>>. Acesso em 03 out. 2023.

DE MEDEIROS, M. H. F.; DE OLIVEIRA ANDRADE, J. J.; DO LAGO HELENE, P. R. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.** In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo: IBRACON, 2011. Disponível em: <https://meriva.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/12947/2/Durabilidade_e_vida_util_d_as_estruturas_de_concreto.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

DE ROOIJ, M.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; SCHLANGEN, E. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials.** *State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC – Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials.* V. 11. Springer: 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-6624-2>>. Acesso em: 12 jul. 2023.

DIAS, L. J. F. C. **Avaliação da viabilidade técnica e ambiental do uso do bioconcreto em substituição ao concreto comum.** 2022. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/32097>>. Acesso em: 04 out. 2023.

DRY, C. M. **Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices.** *Smart Materials and Structures*. v. 3, n. 2, dez. 1994. pp. 118-123. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/3/2/006>>. Acesso em: 25 maio 2023.

DU, W.; QIAN, C.; XIE, Y. **Demonstration application of microbial self-healing concrete in sidewall of underground engineering: a case study.** *Journal of Building Engineering*, v. 63, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222015182>>. Acesso em: 29 set 2023

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados.** 1ª ed. São Paulo: PINI, 2008.

GHOSH, S. K. **Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications.** Weinheim: WILEY-VCH, 2009. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527625376>>. Acesso em: 19 maio 2023.

GILKEY, H. J. **Water-cement ratio versus strength-another look.** *Journal Proceedings*. 1961. p. 1287-1312. Disponível em: <<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/8063>> Acesso em: 09 mar. 2023.

HUANG, H. *et al.* **Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions.** *Materials & Design*, v. 92, p. 499–511, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/287508148_Self-healing_in_cementitious_materials_Materials_methods_and_service_conditions>. Acesso em: 08 set. 2023.

IRRIGARAY, M.; BRAZ-CÉSAR, M. **Mecanismos de autoreparo em materiais cimentícios: uma visão geral.** 2019. 144 f. Estudo de Pós-doutoramento em Self-Healing vinculado à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-PB) em cooperação com a Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, Portugal (ESTiG-IPB). Disponível em: <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/22577>>. Acesso em: 10 set 2023.

JAROENRATANAPIROM, D.; SAHAMITMONGKOL, R. **Effects of Different Mineral Additives and Cracking Ages on Self-Healing Performance of Mortar.** 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267261976_Effects_of_Different_Mineral_Additives_and_Cracking_Ages_on_Self-Healing_Performance_of_Mortar>. Acesso em: 15 out 2023.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. 120f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. In: *Seminário Reciclagem de Resíduos Domiciliares*, São Paulo, [s.d.]. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7661132/mod_resource/content/0/16%20Reciclagem%20de%20res%C3%ADduos%20da%20constru%C3%A7%C3%A3o_CETE_SB.pdf

JONKERS, H. M., THIJSEN, A., MUYZER, G. COPUROGLU, O., SCHLANGEN, E. **Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete**. *Ecological Engineering*, v. 36, p. 230-235, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857409000202>. Acesso em: 15 out. 2023.

JONKERS, H. M.; SCHLANGEN, E. **Development of a bacteria-based self healing concrete**. London: *Taylor & Francis Group*, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Erik-Schlangen/publication/267716612_Development_of_a_bacteria-based_self_healing_concrete/links/54983d0a0cf2519f5a1dda63/Development-of-a-bacteria-based-self-healing-concrete.pdf. Acesso em: 05 out. 2023.

JONKERS, H. M. **Self healing concrete: a biological approach**. *Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science*. Dordrecht: Springer, 2007. p. 195-204. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-6250-6_9. Acesso em: 28 ago 2023.

KAN, Li-Li *et al.* Self-Healing Characterization of Engineered Cementitious Composite Materials. **ACI Materials Journal**, v. 107, n. 6, 2010. Disponível em: <https://acemrl.engin.umich.edu/wp-content/uploads/sites/412/2018/10/Self-Healing-Characterization-of-Engineered-Cementitious-Composites-ECC.pdf>. Acesso em 07 out 2023.

KHATTAB, I. M. A.; SHEKHA, H.; MOHAMMED, A. A. **Study on self-healing concrete types – a review**. *Sustainable Structures and Materials, An International Journal*, v. 2, n. 1, 2019. Disponível em: <https://ssmij.org/index.php/ssm/article/view/SSM.2019.02.01.076>. Acesso em: 23 maio 2023.

KOGA, D. S.; SANTOS, L. M. **Bioconcreto: autocicatrização do concreto pelo processo de biomineralização realizado por bactérias**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás). Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/895>. Acesso em: 05 out. 2023.

KURTZ, C.; HOFFMANN, J. C. **Aditivos químicos redutores de água para concreto de cimento Portland**. *Revista Caminhos*, 23, p. 9-29, 2016.

LEE, H. X. D.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. **Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete**. *Advances in Applied Ceramics*, v. 109, n. 5, p. 296-302, 2010. Disponível

em:<https://www.researchgate.net/publication/281938396_The_potential_of_superabsorbent_polymer_for_self-sealing_cracks_in_concrete>. Acesso em: 05 set. 2023.

LEE, H. X. D.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. *Cement and concrete Research*, v. 79, p. 194-208, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884615002458>>. Acesso em: 10 set. 2023.

LI, H. *et al.* **Microstructure of cement mortar with nano-particles**. *Composites Part B: Engineering*, v. 35, n. 2, p. 185–189, 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836803000520>>. Acesso em: 08 set. 2023.

LI, L.; ZHENG, Q.; LI, Z.; ASHOUR, A.; HAN, B. **Bacterial technology-enabled cementitious composites: a review**. *Composite Structures*, v. 225. Elsevier, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111170>> Acesso em: 22 mai. 2023.

LIMA, M. S. **Estudo comparativo sobre os tipos de autocicatrização do concreto**. 2021. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus/AM. Disponível em: <https://rii.ufam.edu.br/bitstream/prefix/5995/3/TCC_MateusLima.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2023.

LUHAR, S.; GOURAV, S. **A review paper on self healing concrete**. *Journal of Civil Engineering Research*, v. 5, n. 3, p. 53-58, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Gourav-Suthar/publication/303172092_A_review_paper_on_self_healing_concrete/links/5a71baf8a6fdcc33daab1e5a/A-review-paper-on-self-healing-concrete.pdf> Acesso em: 22 mai. 2023

LUO, M.; QIAN, C.; LI, R. **Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based selfhealing concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 87, p. 1-7. Elsevier, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.117>> Acesso em: 22 maio 2023.

MARQUES DA SILVA, A. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica do uso do bioconcreto em substituição ao concreto comum**. 2018. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências Humanas e Sociais da Fundação Carmelitana Mário Palmério – FUCAMP, Monte Carmelo/MG. Disponível em: <<http://repositorio.fucamp.com.br/handle/FUCAMP/396>> . Acesso em: 05 out. 2023.

MARTINS, M. G. A. *et al.* **Bioconcreto: bactérias gram-positivas retiradas do solo no autorreparo de fissuras, trincas e rachaduras no concreto**. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 5. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/15215/13534/196279> Acesso em: 28 ago. 2023.

MERAZ, M. M. *et al.* **Self-healing concrete**: Fabrication, advancement, and effectiveness for long-term integrity of concrete infrastructures. *Alexandria Engineering Journal*, v. 73, p. 665-694. Elsevier, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S111001682300368X>>. Acesso em 04 out. 2023.

MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. **Development of engineered self-healing and self-repairing concrete-state-of-the-art report**. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 10, n. 5, p. 170-184, 2012. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/10/5/10_170/article/-char/ja/>. Acesso em: 07 out. 2023.

MOLIN, D. C. C. V. **Fissuras em estruturas de concreto armado**: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul. 1988. 238 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/15655/000011437.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 27 abr. 2023.

MONTEIRO, P. J. M.; MORRISON, F.; FRANGOS, W. **Non-destructive measurement of corrosion state of reinforcing steel in concrete**. *Materials Journal*, v. 95, n. 6, p. 704-709, 1998. Disponível em <<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=414>>. Acesso em: 03 out. 2023.

MONTEIRO, P. J. M. *et al.* **Pesquisas sobre a Durabilidade do Concreto Realizadas em Berkeley**. In: XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Punta del Este, 2000. Acesso em: 03 out. 2023.

MOREIRA, M. M. **Efeito do Aditivo Redutor de Permeabilidade em Concretos com Diferentes Tipos de Cimento Portland**: Contribuição aos Processos de Autocicatrização. 2016. 167 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília/GO. 2017. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/22278>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

NEVILLE, Adam M. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013. Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=cqY5AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR4&dq=NEVILLE+2013+CONCRETO&ots=RXwKzIAvT0&sig=fVZbrO1gNQ6eoTxcSOYhDUUsBGfI>>. Acesso em 15 mar. 2023.

NEVILLE, Adam. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2015. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582603666/>> Acesso em : 12 abr. 2023.

NEVILLE, Adam. **There is more to concrete than cement**. *Concrete International*, v. 22, n. 1, p. 73-74, 2000. Disponível em: <<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/759>>. Acesso em: 03 out. 2023.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A. **Biotech cementitious materials: some aspects of an innovative approach for concrete with enhanced durability.** *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 1136-1141. Elsevier, 2013. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812007581>> Acesso em: 28 ago 2023.

PIANCASTELLI, E. M. **Comportamento e Desempenho do Reforço a Flexão de Vigas de Concreto Armado, Solicitado a Baixa Idade e Executado Inclusive Sob Carga.** 1997. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUDB-8AFMAL/1/comportamento_e_desempenho_do_refor_o..._elvio_mosci_piancastelli.pdf>. Acesso em: 03 out. 2023.

PINHEIRO, L. M., MUZARDO, C., SANTOS, S. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios.** Universidade de São Paulo. 2007. Capítulo 2. Disponível em: <<https://arquitetonica.files.wordpress.com/2011/11/fundamentos-do-concreto-eesc-usp.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2023.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. **Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral.** *Revista técnico-científica*, n. 1, 2013. Disponível em: <<https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/14>> Acesso em: 03 out. 2023.

RAO, S.; REDDY, S.; SASIKALA, C. **Performance of Microbial Concrete Developed Using Bacillus Subtilus JC3.** *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. v. 98, p. 501-510. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40030-017-0227-x>> Acesso em: 20 maio 2023.

REDDY, T. C. S.; RAVITHEJA, A. **Macro mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments.** *Ain Shams Engineering Journal*, v. 10, n. 1, p. 23–32. Elsevier, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447918300789> Acesso em: 18 set. 2023.

ROCHA, A. P. **Cobertura fluida.** *Revista Técnica*. Edição 193. 2013. Disponível em: <https://exemplo.eng.br/wp-content/uploads/2017/04/MAR-na-T%C3%A9cnica-de-abril-de-2013.pdf> Acesso em: 23 out 2023.

ROIG-FLORES, M. *et al.* **Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments.** *Construction and Building Materials*, v. 86, p. 1-11. Elsevier, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815003700?via%3Dihub>>. Acesso em: 04 out. 2023.

SAHMARAN, M.; YILDIRIM, G.; ERDEM, T. K. **Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials.** *Cement and Concrete Composites*, v. 35, n. 1, p. 89–101. Elsevier, 2013. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946512001771?via%3Dihub> Acesso em: 08 set. 2023.

SANTOS, L. O. S. **A autorregeneração do concreto – uma revisão bibliográfica.** 2022. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/50143/1/AAutocuradoConcreto_Santos_2022.pdf Acesso em: 28 ago 2023.

SEIFAN, M.; SAMANI, A. K.; BERENJIAN, A. **Bioconcrete:** next generation of self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 100, p. 2591-2602, 2016. Disponível em <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-016-7316-zf>>. Acesso em: 28 ago 2023.

SILVA, F.; PASSARINI, V.; SANTOS, F. C. S. **Bioconcreto:** tecnologia para construção sustentável. *INOVAE - Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation*, v. 5, n.2, pág. 41-58, 2017. Disponível em: <<http://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/inovae/article/view/1678>>. Acesso em: 05 out. 2023.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. **Construction and Building Materials.** v. 42, p. 217-224. Elsevier, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813000755> Acesso em: 04 set. 2023.

SNOECK, D.; DE BELIE, N. **Mechanical and self-healing properties of cementitious composites reinforced with flax and cottonised flax, and compared with polyvinyl alcohol fibres.** *Biosystems Engineering*, v. 111, n. 4, p. 325-335. Elsevier, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511011002261?casa_token=oySMmAibRhAAAAAA:1W619sFWPnvYc3pZ6iuljtMwOgAAFd9VUgqBZW_QZasCPIYijjGFkyouF2JKaHCxAH45ZDH5sFE> Acesso em: 07 out. 2023.

TAKAGI, E. M.; LIMA, M. G.; HELENE, P. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos/SP. Disponível em:< https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7661135/mod_resource/content/1/19%20Concreto%20auto_cicatrizante.pdf >. Acesso em: 04 set. 2023.

TALAEKHOZANI, A., MAJID, M. Z. A. **A Review of Self-healing Concrete Research Development.** *Journal of Environmental Treatment Techniques*, v. 2, n. 1, p. 1-11, 2014. Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=3725735>> Acesso em: 10 mar. 2023

TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. **Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials– a review.** *Construction and Building Materials*, v. 81, p. 233-247. Elsevier, 2015. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815002019>>. Acesso em: 17 ago 2023.

TER HEIDE, N.; SCHLANGEN, E. **Self-healing of early age cracks in concrete**. In: Proceedings of the first international conference on self-healing materials. Noordwijk aan Zee: Springer, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Erik-Schlangen/publication/226980522_Crack_healing_of_early_age_cracks_in_concrete/links/55f71e2408aeba1d9ef1b57f/Crack-healing-of-early-age-cracks-in-concrete.pdf Acesso em: 12 abr. 2023

TORRES, L. **70% do entulho no Brasil é descartado incorretamente**. ABERCON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. [s.l.]. 03 jun. 2023. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/artigos/70-do-entulho-no-brasil-e-descartado-incorretamente>>. Acesso em: 12 out. 2023

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. **Self-healing in cementitious materials – a review**. *Materials*, v. 6, n. 6, p. 2182-2217, 2013. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/6/6/2182>>. Acesso em: 10 mar. 2023

VOTORANTIM. **Cristalmix - Comparativo de soluções de impermeabilização para cortinas de contenção em solos abaixo do lençol freático**. 2018. Disponível em: <<Folder-Cristalmix-Tecnum-A4-V3.pdf> (engemix.com.br)>. Acesso em: 07 out 2023

WANG, J.; DEWANCKELE, J.; CNUUDE, V.; VLIERBERGHE, S. V.; VERSTRAETE, W., DE BELIE, N. **X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete**. *Cement and Concrete Composites*. v. 53, p. 289-304. Elsevier, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946514001322?via%3Dihub> Acesso em: 21 mai 2023.

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. **Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete**. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 7, p. 763-770. Elsevier, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946511000618> Acesso em: 17 ago 2023.

WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. **A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material**. *Construction and Building Materials*, v. 28, n. 1, p. 571–583, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811005198> Acesso em: 08 set 2023.

ZAGO, A. F. **Estudo comparativo entre métodos de recuperação de estruturas com processos de autocura: Bioconcreto e Concreto Autocicatrizante**. 2021. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL), Tubarão/SC. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/19419/1/TCC%20Final%20-%20Alan%20Zago.pdf> Acesso em: 11 mar 2023.

ZHANG, C; WANG, M.; LIU, R.; LI, X.; YAN, J. DU, H. **Enhancing self-healing efficiency of concrete using multifunctional granules and PVA fibers.** *Journal of Building Engineering*, v. 76, p. 9–18. Elsevier, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223014948?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=803b54378b400129> . Acesso em: 08 set. 2023.

ZHANG, Y. R.; KONG, X. M.; LU, Z. B.; LU, Z. C.; HOU, S. S. **Effects of the charge characteristics of polycarboxylate superplasticizers on the adsorption and the retardation in cement pastes.** *Cement and Concrete Research*, v. 67, p. 184–196. Elsevier, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884614001987?via%3Dihub> Acesso em: 04 set. 2023.

ZIEGLER, F. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes.** 2020. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/218239/001122060.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 05 out 2023.