

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL

CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS EM
MISTURAS CIMENTÍCIAS**

MARIANA KARLA GUEDES DA SILVA LOZ

Maceió - AL

2024

MARIANA KARLA GUEDES DA SILVA LOZ

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS EM
MISTURAS CIMENTÍCIAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Karoline Alves de Melo Moraes

Coorientador: Dr. José Roberto Tenório Filho

Maceió - AL

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB-4/ 661

- L915a Loz, Mariana Karla Guedes da Silva.
Análise do potencial de autocicatrização de fissuras em misturas cimentícias /
Mariana Karla Guedes da Silva Loz. – 2024.
59 f. : il.
- Orientadora: Karoline Alves de Melo Moraes.
Coorientador: José Roberto Tenório Filho.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil) – Universidade
Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia, Maceió, 2024.
- Bibliografia: f. 55-59.
1. Autocicatrização. 2. Fissuras. 3. Misturas cimentícias. 4. Materiais de construção.
I. Título.

CDU: 620.19:691

Folha de Aprovação

MARIANA KARLA GUEDES DA SILVA LOZ

ANÁLISE DO POTENCIAL DE AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS EM MISTURAS CIMENTÍCIAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof.^a. Dr.^a. Karoline Alves de Melo Moraes

Coorientador: Dr. José Roberto Tenório Filho

Aprovado em:

Orientadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br KAROLINE ALVES DE MELO MORAES
Data: 05/04/2024 09:47:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Karoline Alves Melo Moraes (Orientadora)
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

Coorientador:

Dr. José Roberto Tenório Filho
Universitei Gent

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br CASSIA VANESSA ALBUQUERQUE DE MELO
Data: 05/04/2024 11:16:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Cássia Vanessa Albuquerque de Melo
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

Documento assinado digitalmente
gov.br FLAVIO BARBOZA DE LIMA
Data: 05/04/2024 10:00:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela concretização desse sonho. Tenho plena certeza que foi Ele quem me guiou em muitos momentos de incertezas, e quem me deu forças para seguir em frente e chegar até aqui.

Agradeço a toda minha família, mas em especial aos meus avós Risalva e Manoel, por terem sido os maiores acreditadores e incentivadores desse sonho, como também aos meus pais, Missilene e Edmilson e a minha irmã Marina, por apoiarem as minhas escolhas e compreenderem minhas ausências. Obrigada por sempre proporcionarem o melhor para mim e por terem sido colo e conforto para aliviar o fardo da graduação quando muitas vezes eu não retornava tão bem para casa depois de um dia inteiro na UFAL.

Agradeço a todos os amigos que fiz ao decorrer da graduação, em especial ao grupo “Engatas” (Rayanne, Alana, Hítilla, Hilleana e Marianni), e ao Luis. Foi com eles que descobri o mundo que é a Universidade, e que por muitas vezes dividi minhas angústias. Obrigada por terem tornado essa caminhada mais leve.

Agradeço ao PET Engenharia Civil, que foi sem dúvidas, a minha melhor escolha, o melhor presente e acontecimento de toda a minha graduação. Obrigada por ter sido minha “segunda casa” por mais de três anos. No grupo PET eu não só pude amadurecer e crescer profissionalmente, como também pessoalmente. Além disso, saber que lá eu tinha verdadeiros “parceiros” que estariam comigo compartilhando tantos momentos, me dava um ânimo a mais. Deixo aqui a minha eterna gratidão a todas as gerações com quem pude partilhar experiências e colecionar tantas histórias. Vocês foram imprescindíveis nessa jornada.

No grupo PET tive a oportunidade de ser tutorada pela Prof. Karoline Melo, minha orientadora e a quem devo uma parte dessa graduação. Agradeço a Prof. Karol, primeiro pelo ser humano que ela é. Agradeço também pelos conselhos, pela paciência e por todas as vezes que em meio ao caos ela fez eu me sentir acolhida e amada como uma filha. Obrigada por todo cuidado e direcionamento, para mim, a senhora sempre será um exemplo de pessoa e profissional.

No mais, agradeço a Universidade Federal de Alagoas por seu ensino de extrema qualidade e a todos os professores que estiveram presentes ao longo do caminho. Sou grata por todos os ensinamentos que colhi e por toda contribuição para com a minha formação.

RESUMO

LOZ, M. K. G. S. **Análise do potencial de autocicatrização de fissuras em misturas cimentícias**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024.

Inúmeros problemas que ocorrem na construção civil estão associados à formação de fissuras nas estruturas, pois estas causam a redução do desempenho das edificações e demandam reparos e manutenção. Entretanto, a manutenção das estruturas requer recursos financeiros elevados e, em casos de estruturas continuamente em serviço, essa tarefa pode ser ainda mais desafiadora. A autocicatrização surge como uma alternativa para reduzir essa problemática, pois é uma área de pesquisa da engenharia civil e materiais de construção que busca desenvolver materiais e técnicas capazes de reparar automaticamente fissuras que podem ocorrer em estruturas de concreto e outros materiais cimentícios ao longo do tempo. Apesar de já possuir estudos e uma ampla compreensão referentes à autocicatrização, ainda existem desafios como por exemplo na limitação e caracterização de materiais para esta. Este trabalho propõe uma revisão bibliográfica e sistemática, a fim de identificar as principais técnicas utilizadas atualmente nessa área e assim, fazer um panorama sobre os materiais que mais têm-se utilizado. Através da revisão sistemática, buscou-se por arquivos que continham a palavra “autocicatrização” em duas bases de dados (Scopus e Web of Science), definindo-se alguns critérios, para um melhor filtro nos arquivos. Com o auxílio do VOSviewer, *software* que possibilitou o mapeamento desses arquivos, foram criados mapas com as palavras mais recorrentes se tratando das técnicas da autocicatrização. Foram abordados os processos realizados por bactérias, a autocicatrização por meio de aditivos cristalizantes e a autocicatrização com adição de polímeros superabsorventes, onde pode-se concluir que ainda existem obstáculos a serem superados, como a otimização das formulações dos agentes de cicatrização e a compatibilidade com diferentes tipos de materiais e ambientes.

Palavras-chave: autocicatrização; fissuras; misturas cimentícias.

ABSTRACT

Numerous problems that occur in civil construction are associated with the formation of cracks in structures, as these cause a reduction in the performance of buildings and require repairs and maintenance. However, maintaining structures requires high financial resources and, in cases of structures that are continually in service, this task can be even more challenging. Self-healing appears as an alternative to reduce this problem, as it is an area of research in civil engineering and construction materials that seeks to develop materials and techniques capable of automatically repairing cracks that may occur in concrete structures and other cementitious materials over time. Despite already having studies and a broad understanding regarding self-healing, there are still challenges, such as the limitation and characterization of materials for this. This work proposes a bibliographical and systematic review, to identify the main techniques currently used in this area and thus provide an overview of the materials that have been most used. Through the systematic review, we searched for files that contained the word “self-healing” in two databases (Scopus and Web of Science), defining some criteria for a better filter in the files. With the help of VOSviewer, software that made it possible to map these files, maps were created with the most recurring words regarding self-healing techniques. Processes carried out by bacteria, self-healing through crystallizing additives, and self-healing with the addition of superabsorbent polymers were addressed, where it can be concluded that there are still obstacles to be overcome, such as the optimization of healing agent formulations and compatibility with different types of materials and environments.

Keywords: Self-healing; cracks; cement mixtures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fissura horizontal causada por movimentação térmica da laje	21
Figura 2: Fissura vertical em parede por expansão da alvenaria	21
Figura 3: Fissuras verticais induzidas por sobrecarga	22
Figura 4: Fissuras horizontais induzidas por sobrecarga	22
Figura 5: Fissuras em parede causadas pela deformação da estrutura.....	23
Figura 6: Fissuras causadas por recalques de fundação	24
Figura 7: Fissuras causadas por alterações químicas.....	24
Figura 8: Tipos de autocicatrização em materiais cimentícios.....	25
Figura 9: Métodos de exportação de arquivos na base de dados Scopus.....	29
Figura 10: Métodos de exportação de arquivos na base de dados Web of Science	30
Figura 11: Tela de iniciação do VOSviewer	30
Figura 12: Escolha da fonte de dados	31
Figura 13: Mapa de visualização de rede obtido na revisão sistemática com os dados da Scopus	35
Figura 14: Mapa de visualização de rede obtido na revisão sistemática com os dados da Scopus após excluir 29 palavras	36
Figura 15: Mapa de visualização de rede obtido na revisão sistemática com os dados da Web of Science	36
Figura 16: Mapa de visualização de rede obtido na revisão sistemática com os dados da Web of Science após excluir 25 palavras	37
Figura 17: Análise microscópica com 200x de aumento da selagem da fissura com presença de cristais indicando a formação de carbonato de cálcio	40
Figura 18: Resistência à compressão aos 7 dias dos três diferentes traços de concreto	41
Figura 19: Análise microscópica de produtos de cicatrização ao longo de uma fissura aos 7, 14 e 28 dias.....	42
Figura 20: Resistência à compressão desenvolvida pelas argamassas.....	43
Figura 21: Ação do aditivo cristalizante no bloqueio e revestimento hidrofóbico em fissuras ou capilares	44
Figura 22: Abatimento por traço.....	45
Figura 23: Absorção de água por imersão das amostras ensaiadas após 56 dias	46
Figura 24: Índice de Vazios das amostras ensaiadas após 56 dias	47
Figura 25: Resistência média à compressão axial dos concretos com diferentes.....	48

Figura 26: Comportamento dos concretos frente à absorção de água para as idades.....	49
Figura 27: Processo de autocicatrização com a utilização de polímeros superabsorventes (PSA).....	50
Figura 28: Retração autógena x tempo para amostras contendo teores de PSA	51
Figura 29: Resistência à compressão em cubos (MPa) dos microconcretos com relação a/c= 0,30 para 7 (tracejado) e 28 dias de idade	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Critérios adotados para realizar a revisão sistemática.....	28
Quadro 2: Palavras excluídas manualmente no software	33
Quadro 3: Relação de Clusters referente aos dados da base Scopus.....	37
Quadro 4: Relação de Clusters referente aos dados da base Web of Science.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Considerações iniciais.....	11
1.2	Objetivos	12
1.3	Justificativa.....	12
1.4	Estrutura do trabalho.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Misturas cimentícias	15
2.1.1	Cimento.....	15
2.1.2	Água	15
2.1.3	Agregados	16
2.1.4	Adições minerais.....	16
2.1.5	Aditivos Químicos.....	17
2.1.6	Processo de hidratação das misturas cimentícias	18
2.2	Fissuras	19
2.3	O processo de Autocicatrização de fissuras	25
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	Revisão bibliográfica	27
3.2	Revisão sistemática	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1	Mapeamento dos dados	35
4.2	As técnicas da autocicatrização	38
4.2.1	Autocicatrização por processos realizados por bactérias	38
4.2.2	Autocicatrização por meio de aditivos cristalizantes.....	43
4.2.3	Autocicatrização com adição de polímeros superabsorventes.....	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
5.1	Sugestão para trabalhos futuros.....	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Os componentes à base de cimento Portland são materiais bastante utilizados na construção civil. Segundo Gomes *et al.* (2013), o ligante mais utilizado na indústria da construção em todo o mundo industrializado é o cimento Portland.

O cimento possui em sua composição calcário e argila como matérias-primas principais. As pastas de cimento, por sua vez, são compostas por cimento, água, podendo ser utilizados adições e aditivos. Dentre as adições minerais mais comuns para uso nos componentes cimentícios, estão: escória de alto forno, sílica ativa, pozolana natural, pozolana calcinada, cinza volante, xisto cozido e filer calcário. Essas adições têm o propósito de melhorar algumas características das misturas como a trabalhabilidade e o tempo de pega no estado fresco, como também a resistência e a durabilidade no estado endurecido (Gomes *et al.*, 2013). Com relação aos aditivos químicos, os mais utilizados nas misturas são os incorporadores de ar, os plastificantes ou redutores de água, os superplastificantes e os modificadores de pega. A finalidade desses, varia de acordo com o tipo, mas todos possuem a finalidade de modificar as propriedades das misturas (Grillo, 2014).

Nas obras civis, as misturas cimentícias possuem inúmeras utilidades. Quando adicionado agregado miúdo, elas formam as argamassas, que são usadas para assentamento de blocos de alvenaria de vedação, revestimento de tetos e parede de alvenaria, execução de contrapiso, acabamento de superfícies ou até para assentamento de piso e rejuntamento. Acrescentando-se à argamassa o agregado graúdo, tem-se o concreto, que é usado em elementos estruturais, especialmente associado ao aço, formando o concreto armado.

Um dos problemas que as misturas cimentícias podem apresentar é o surgimento de fissuras, que podem ser causadas por tensões nos materiais, retração e ação térmica, e que facilitam a entrada de agentes agressivos (Ferreira, 2016). O aparecimento de fissuras se faz presente desde idades iniciais em que as misturas ainda se apresentam no estado plástico e podem manifestar-se durante toda sua vida útil.

Os danos que essa manifestação patológica pode causar são variáveis. As fissuras colocam em risco a durabilidade das estruturas, uma vez que os líquidos e os gases agressivos são capazes de penetrar ao longo dessas rachaduras e causar maiores problemas (a exemplo da corrosão de armaduras metálicas que pode ser iniciada com o ingresso de cloretos e a carbonatação), ameaçando a integridade da estrutura e segurança da edificação. Devido a este motivo, ainda que algumas fissuras sejam admitidas pelas normas técnicas, qualquer abertura deve ser tratada e recuperada de forma a não permitir a entrada desses agentes.

No entanto, o restauro das fissuras torna-se mais difícil uma vez que elas podem não ser visíveis ou acessíveis (como em estruturas de pontes, viadutos e túneis). Além disso, os custos são bastante elevados quando estão relacionados a obras de reparo. Desse modo, uma alternativa para esses reparos seria explorar o potencial de autocicatrização intrínseco do cimento (conhecido como autocicatrização autógena), conferindo ao material cimentício a habilidade de autocicatrização autônoma, conforme a definição de materiais autocicatrizantes apresentada por De Rooij *et al.* (2013).

Por definição, a autocicatrização é a habilidade dos materiais de reparar fissuras de forma autônoma, ou seja, sem intervenções externas. Os autocicatrizantes são materiais que se enquadram na categoria de estruturas inteligentes, uma vez que uma parte deles contém agentes de cura que são encapsulados e liberados quando ocorre a fissura, aumentando a vida funcional do material. Os materiais ditos “inteligentes” são aqueles capazes de sentir mudanças nos seus ambientes e, assim, responder a essas mudanças de maneiras predeterminadas, como também ocorre com os organismos vivos (Ghosh, 2009).

Ademais, de acordo com Oliveira (2019), o emprego de tecnologias autocicatrizantes engloba três conceitos principais: custo, sustentabilidade e inovação. O prolongamento da vida útil da estrutura, especialmente em condições ambientais de elevada agressividade, implica em menores intervenções e reduções de investimentos financeiros diretos e indiretos devido à falha prematura do material cimentício além de afirmar valores sustentáveis, pois diminui a demanda por matérias-primas, e por consequência reduz também o consumo de energia e a emissão de gases do efeito estufa.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo a realização de uma revisão bibliográfica a fim de fazer uma análise acerca das técnicas de autocicatrização de fissuras em misturas cimentícias na atualidade.

1.3 Justificativa

Várias obras civis no Brasil têm apresentado prematuramente uma gama variada de anomalias e problemas patológicos, sendo as fissuras as mais relevantes. Tais manifestações, comprometem a harmonia e o bem-estar do usuário. Por consequência, ações corretivas não

planejadas têm sido constantemente requeridas, acarretando altos custos para recuperação e manutenção (Sahb, 2005).

Além do comprometimento da harmonia visual, as fissuras também contribuem para a penetração da água de chuva nas edificações, promovendo a deterioração precoce da construção, além do desconforto e de problemas de saúde a seus usuários (Lordsleem Jr., 1997). Dessa forma, torna-se essencial a pesquisa nas técnicas de reparação para que possam ser postas em prática.

Neste trabalho aborda-se a autocicatrização, tecnologia que indica uma opção para prevenir a deterioração das estruturas por fissuração que é relevante não só pela questão da minimização dos custos com reparos, mas também por permitir que a estrutura apresente um melhor desempenho e vida útil (Tambara, 2022).

Por ser um método de reparo relativamente novo, e, portanto, em desenvolvimento, são grandes os desafios de caracterização dos materiais já que a indústria da construção apresenta uma variedade de composições de materiais e tecnologias de abordagens utilizadas na técnica, fazendo com que se tenha um vasto campo de conhecimento a ser explorado pela comunidade científica (Araújo, 2020).

No Brasil, a tecnologia dos concretos autocicatrizantes só passou a ser desenvolvida em 2011, pelo laboratório de pesquisa do Departamento de Materiais do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). Assim, ainda se tem um atraso considerável no desenvolvimento de pesquisas com esse tema no país, além dos desafios da difusão da autocicatrização no mercado Brasileiro (Araújo, 2020).

Tendo conhecimento dessas informações, a escolha por esse tema se justifica pelo fato da necessidade de uma revisão bibliográfica para que haja um maior desenvolvimento de estudos acerca do tema e para que essa técnica seja mais aperfeiçoada e utilizada no nosso país. Além disso, o trabalho torna-se relevante para fornecer base aos futuros estudos sobre autocicatrização desenvolvidos por grupos da UFAL, uma vez que configura o primeiro na área.

1.4 Estrutura do trabalho

Esta monografia encontra-se organizada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas. O capítulo 1 é introdutório e nele foram abordadas as considerações iniciais, o objetivo geral, justificativas e a sua estruturação.

O capítulo 2 expõe a metodologia escolhida para o desenvolvimento do TCC.

O capítulo 3 aborda toda a fundamentação teórica utilizada para embasar e validar a temática do TCC. Neste serão apresentados os principais tópicos que dão suporte para o alcance dos objetivos do trabalho.

O capítulo 4 expõe as discussões sobre as principais técnicas da autocicatrização no mundo, os materiais mais utilizados atualmente, bem como uma comparação de custos entre a autocicatrização e outros métodos de reparos em fissuras.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados, de forma teórica, alguns tópicos e os aspectos gerais sobre os assuntos pertinentes do trabalho e que são necessários para entender alguns passos ao decorrer do desenvolvimento desta monografia.

2.1 Misturas cimentícias

Para melhor entendimento sobre o comportamento das misturas cimentícias, a seguir tem-se uma discussão com relação aos seus componentes, a fim de apresentar as definições e informações referentes ao processo de mistura.

2.1.1 Cimento

O cimento é um ligante hidráulico que pode aglomerar outros materiais, tais como os agregados graúdo e miúdo, formando uma mistura homogênea. Um ligante hidráulico é um material inorgânico firme e moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que passa pelo processo de pega e endurece devido às reações e processos de hidratação e que, depois do endurecimento, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade, mesmo debaixo de água (Gomes *et al.*, 2013).

Esta característica tornou o cimento Portland um aglomerante de elevada utilização, tendo substituído o papel que as cales tinham (Silva, 2020).

É produzido aquecendo a uma temperatura de em média 1450°C uma mistura de calcário e argila para que assim ocorra a fusão parcial e a produção dos nódulos de clínquer. O clínquer é misturado com sulfato de cálcio e finamente moído, para fazer o cimento (Taylor, 1997).

2.1.2 Água

Os ligantes hidráulicos e os agregados são componentes fundamentais na constituição das argamassas e concretos, mas a água também é um elemento indispensável para a produção das misturas cimentícias. A água tem a função de garantir a capacidade de formar a pasta de cimento, a qual tem a capacidade de aglutinar os vários constituintes das misturas no estado fresco, e assim oferecer a consistência necessária à sua aplicação. A quantidade de água de amassamento a ser utilizada tem um papel imprescindível na qualidade das misturas, mais precisamente a relação água/aglomerante, pois esta relação vai influenciar as características mecânicas e físicas das misturas (Arandigoyen *et al.*, 2005).

2.1.3 Agregados

Agregados é a denominação genérica dada aos materiais que são acrescentados ao cimento e à água para se obterem as misturas cimentícias. Eles se apresentam em forma de grãos e devem ser inertes, ou seja, não devem provocar reações indesejáveis. Os agregados constituem aproximadamente 70% do volume total dos produtos em que são utilizados, desempenhando um papel importante quando se trata do custo total deles. Além disso, atuam fortemente nas propriedades das misturas, reduzindo a retração, por exemplo, e interferindo na resistência mecânica e no módulo de elasticidade (Ribeiro *et al.*, 2013).

A NBR 7211 (ABNT, 2022) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Dessa forma, define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira com abertura de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,15 mm. Define ainda agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 75 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm.

As características dos agregados tais como porosidade, distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, também são importantes, pois influenciam de uma maneira direta as propriedades do concreto, sendo essas propriedades essenciais para o desempenho das estruturas em que são usados.

2.1.4 Adições minerais

Segundo Antolini (2015), as adições minerais são classificadas de acordo com suas propriedades e sua ação físico-química, podendo ser de três tipos: adições minerais com efeito fíler (inertes), adições minerais com efeito pozolânico e adições minerais com efeito cimentante.

As adições com efeito fíler são adições minerais com granulometria muito fina, sem atividade química e relacionam-se ao aumento da densidade da mistura pelo preenchimento dos espaços vazios do concreto por suas dimensões de partículas reduzidas (Grillo, 2014).

As adições com efeito pozolânico são adições que sozinhas possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia. Porém, quando dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com produtos de hidratação do cimento, como o hidróxido de cálcio, à formando compostos com propriedades cimentantes (Antolini, 2015).

Já as adições com efeito cimentante não dependem do hidróxido de cálcio presente no cimento portland para a formação dos produtos cimentantes com o silicato de cálcio hidratado. Entretanto, possui uma hidratação lenta e a mistura formada não é indicada para fins estruturais já que a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para este fim (Grillo, 2014; Antolini, 2015).

No geral, além dos benefícios ambientais e econômicos, as adições minerais possuem a capacidade de alterar propriedades do concreto em estado fresco ou endurecido e apesar de estarem divididas em três categorias, carregam em si objetivos fundamentais: ampliar as qualidades de uma mistura, como por exemplo o aumento na fluidez desta, uma vez que ao reduzir a quantidade de água aumenta-se a resistência à exsudação e segregação; ou de minimizar seus pontos fracos, como a resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade (Melo, 2005; Grillo, 2014).

Em contrapartida, Anjos *et al.* (2012), destaca que devido o processo da hidratação das misturas cimentícias, a substituição do cimento por adições minerais ou a grande quantidade do uso destas, necessita de um estudo maior na interação química dessas adições na hidratação conjunta, pois essa substituição ou o uso demasiado pode levar ao aumento da temperatura, provocando um alto calor de hidratação o que levará ao surgimento de fissuras.

2.1.5 Aditivos Químicos

Os aditivos químicos são largamente empregados no preparo de misturas cimentícias, sendo que a principal função do aditivo é modificar e aperfeiçoar as propriedades do concreto no estado fresco ou endurecido.

Dentre os aditivos químicos destacam-se os plastificantes que, de acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2019), são aqueles que possibilitam a redução de água nas misturas sem comprometer a consistência do concreto no estado fresco ou também modificam a consistência do concreto sem alterar a quantidade de água, aumentando o abatimento e a fluidez. Eles ainda podem produzir esses dois efeitos simultaneamente.

Eles atuam diretamente nas partículas de cimento, pois quando este entra em contato com a água, existe uma tendência muito forte à floculação, comprometendo assim a trabalhabilidade das misturas no estado fresco. Na tentativa de minimizar o problema, adiciona-se mais água à mistura; porém quando liberada no início da hidratação da pasta, ela pode se estabelecer embaixo de um agregado com dimensões maiores, causando ali uma porosidade localizada. No caso da água percorrer até a superfície, vai causar um vazio por toda a extensão

do percurso onde, na superfície, esse excesso de água, ao secar, causa uma retração superficial, podendo levar a fissuras (Grillo, 2014).

Todos estes efeitos causam um aumento de porosidade na microestrutura do concreto, diminuindo sua resistência à compressão. Para evitar tais problemas, é necessária a adição de aditivos que promovam a defloculação do sistema e como consequência, melhora-se a funcionalidade do concreto no estado fresco (Grillo, 2014).

Outro tipo de aditivo é o redutor de permeabilidade. Nesse caso, a redução da permeabilidade ocorre por meio da ação de produtos químicos hidrofóbicos que proporcionam uma camada repelente de água ao longo de poros do concreto, e produtos à base de polímeros hidrofílicos cristalinos que devido à formação cristalina provocada pelos aditivos impede a penetração de água. Tais aditivos fazem com que a permeabilidade seja reduzida gradativamente em função do tempo de exposição à água (Oliveira, 2018; Moreira, 2016).

Pode-se ainda mencionar os aditivos compensadores e redutores de retração que atuam a fim de minimizar a retração das misturas cimentícias. O aditivo compensador age induzindo o surgimento de tensões de compressão para assim compensar o surgimento de tensões de tração resultantes na restrição da retração. Os aditivos redutores são mais recentes, sendo a maior parte composta por líquidos orgânicos com base em derivados de glicol. Esses agem influenciando na tensão superficial e na viscosidade da água presente nos poros do concreto. A redução da tensão superficial da água dos poros causará a redução da pressão capilar e consequentemente na redução da retração (Melo Neto, 2008).

2.1.6 Processo de hidratação das misturas cimentícias

A hidratação das pastas cimentícias ocorre devido a reações químicas entre a água e os silicatos e aluminatos presentes no pó do cimento, sendo essas reações exotérmicas. Os mecanismos de hidratação acontecem de tal forma que primeiro ocorre uma dissolução-precipitação do material seguida por uma hidratação no estado líquido do cimento, em que as reações ocorrem diretamente na superfície dos componentes do cimento anidro, sem que nestes haja solução (Anjos *et al.*, 2012).

No processo da hidratação, os grãos de cimento, que de início se encontravam em suspensão, vão se aglutinando uns aos outros em resultado da floculação ocorrida, formando uma malha de cristais que vão promover a construção de um “esqueleto” sólido, responsável pela estabilidade estrutural da pasta. Destarte, com o decurso do processo, a pasta vai endurecendo progressivamente e adquirindo as propriedades físicas, mecânicas e químicas da pasta de cimento endurecida (Silva, 2020).

As reações químicas do processo de hidratação, por serem exotérmicas, liberam energia térmica, sendo esta a propriedade mais importante a ser considerada durante o processo, uma vez que, com a grande liberação de calor, ocorrerá dilatação e contração volumétrica do material, que na presença de limitações internas ou do meio para isto ocorrer, acarretará na fissuração do concreto. Assim, a caracterização física e química dos materiais utilizados nas misturas e a compreensão das reações envolvidas no processo de hidratação é muito importante tendo em vista minimizar o risco de fissuração do material (Gambale, 2017).

Além disso, vale destacar que a velocidade de hidratação e de precipitação dos hidratos formados é fortemente dependente da composição cristalina do material de partida, bem como da estrutura dos produtos que se formam durante a precipitação (Garcia *et al.*, 2007).

2.2 Fissuras

Eldridge (1982) define fissura como: “o resultado de solicitações maiores do que aquelas que o edifício ou parte dele pode suportar. Estas solicitações podem ser externas ou internas ao edifício ou aos seus materiais (...). Pode ser uma ou várias solicitações, resultantes de uma ou várias causas”.

Assim, se os materiais forem solicitados com um esforço maior que sua resistência, acontece a falha provocando uma abertura que pode interferir nas características estéticas, funcionais ou estruturais dos elementos construtivos, e conforme sua espessura será classificada como fissura ou trinca (Thomaz, 2020).

De uma forma mais abrangente, entende-se por fissura uma manifestação patológica resultante do alívio das tensões entre as partes de um mesmo elemento ou entre dois elementos em contato, podendo aparecer em uma fase prematura ou muitos anos após a conclusão das construções (Dal Molin, 1988).

Pode-se associar a fissuração nos materiais cimentícios diretamente com o fenômeno da retração e na maioria das vezes tais fissuras são decorrentes deste fenômeno. A retração é a redução de volume pela perda de água (exsudação) de um elemento de concreto seja no estado fresco ou no estado endurecido. Esta perda de água afetará as propriedades do elemento, fazendo com que este enfraqueça e assim surjam as fissuras (Milagres, 2019).

As misturas mais propensas à retração serão as produzidas com maior volume de pasta, sendo mais propensa à retração a pasta obtida com maior relação água/cimento e, ainda, com a maior quantidade de cimento. Além disso, quanto maior a velocidade da água em sua migração interna ou para o exterior, maior será a retração. Dessa maneira, se faz necessário conhecer bem todos os componentes da mistura cimentícia assim como o seu processo de hidratação a

fim de evitar esse tipo de manifestação recorrente (Recena, 2015), pois além do próprio risco que traz para a segurança das edificações, as fissuras podem tornar a estrutura mais suscetível a outro problema, sendo necessário observar corretamente o quadro de fissuração, já que ela pode ser provocada na maioria das vezes pelo fenômeno da retração mas também outros fatores podem implicar neste problema. Além disso, para poder entender de qual tipo de fissura se trata é necessário conhecê-las e estudá-las, só assim poderá ser aplicado o tratamento adequado (Silvia, 2011 *apud* Correia; Peres 2019).

Segundo Magalhães (2004), as fissuras podem ser classificadas de acordo com diferentes critérios: quanto à abertura, atividade, as tensões envolvidas, causas, entre outras classificações, sendo a última classificação citada um bom caminho para encontrar as soluções para este problema.

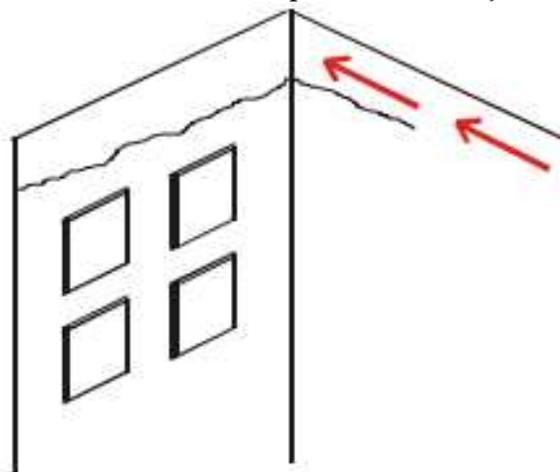
Quanto à abertura as fissuras podem ser classificadas em finas, que apresentam menos de 1,5 mm de espessura; médias que possuem espessuras entre 1,5 mm e 10,0 mm; e largas com espessuras superiores a 10,0 mm (Duarte, 1998 *apud* Magalhães, 2004).

Quanto à atividade, classifica-se as fissuras em ativas e inativas, sendo as ativas as que apresentam variações de abertura em um determinado período, e ainda admite uma nova subdivisão, em que podem ser classificadas como sazonais ou progressivas. As fissuras inativas são aquelas que não apresentam variações de abertura ou comprimento ao longo do tempo e costumam ser causadas por solicitações externas constantes (Duarte, 1998 *apud* Magalhães, 2004).

Quanto às causas, além da retração, Thomaz (2020) classifica as fissuras da seguinte forma:

- a) Fissuras causadas por movimentações térmicas: Nessa classificação de fissuras, como mostra a Figura 1, os elementos e componentes de uma construção estão sujeitos ao aquecimento durante o dia e se resfriam de noite, o que provoca nos materiais de construção a dilatação ou contração; os movimentos de dilatação e contração são restringidos pelos diversos vínculos que envolvem os elementos e componentes, podendo assim desenvolver nos materiais, tensões que poderão provocar o aparecimento de fissuras.

Figura 1: Fissura horizontal causada por movimentação térmica da laje



Fonte: Magalhães (2004)

b) Fissuras causadas por movimentações higroscópicas: Entende-se por materiais higroscópicos aqueles que possuem a característica de absorver água do ambiente. Assim, o aumento do teor de umidade produz uma expansão do material, enquanto a diminuição desse teor causa uma contração, como mostrado na Figura 2. Logo, se existir vínculos que impeçam ou restrinjam essas movimentações, poderão ocorrer fissuras nos elementos do sistema construtivo. A umidade pode ser resultante da produção de componentes, proveniente da execução da obra ou ainda decorrer devido à umidade do ar e fenômenos meteorológicos.

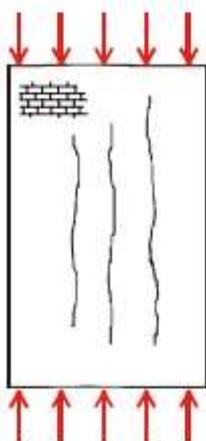
Figura 2: Fissura vertical em parede por expansão da alvenaria



Fonte: Autor (2023)

c) Fissuras causadas pela atuação de sobrecargas: a sobrecarga é uma solicitação externa, prevista ou não em projeto que é capaz de provocar a fissuração de um componente com ou sem função estrutural. Para Correia e Peres (2019), as fissuras causadas por tal motivo podem ocorrer devido ao mau dimensionamento da viga, aplicação de sobrecarga no decorrer da obra que não foi prevista em projeto, carregamento precoce da estrutura ou por erros de concepção estrutural. Na Figura 3, pode-se visualizar as fissuras verticais e na Figura 4 as horizontais, ambas induzidas por sobrecarga.

Figura 3: Fissuras verticais induzidas por sobrecarga



Fonte: Magalhães (2004)

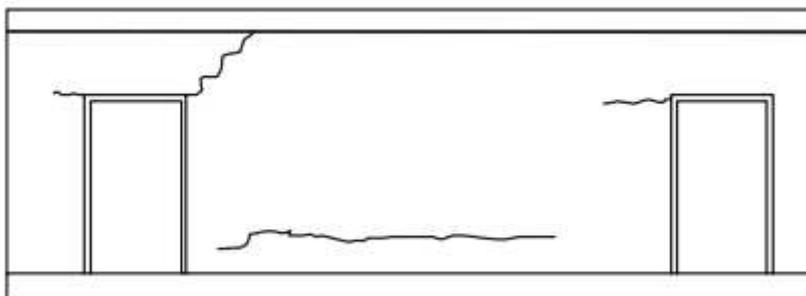
Figura 4: Fissuras horizontais induzidas por sobrecarga



Fonte: Magalhães (2004)

d) Fissuras causadas por deformabilidade excessiva: As fissuras devido ao cisalhamento são diagonais e ocorrem onde o esforço cortante é máximo. Elas surgem devido à falta de seção de concreto suficiente ou falta de armadura resistente ao cisalhamento e podem ser geradas na fase do projeto ou na fase execução da viga. Observa-se na Figura 5, que as fissuras iniciam-se onde a viga está apoiada e terminam na região onde a carga está sendo aplicada (Trindade, 2015 *apud* Correia; Peres, 2019).

Figura 5: Fissuras em parede causadas pela deformação da estrutura



Fonte: Thomaz (2020)

e) Fissuras causadas por recalques de fundação: Devido à composição dos solos ser basicamente constituída por partículas sólidas entremeadas por água e material orgânico, e devido às cargas externas, eles podem se deformar em maior ou menor proporção. Se as deformações forem diferenciadas ao longo do plano das fundações de uma obra, tensões de grande intensidade serão introduzidas na estrutura das edificações, podendo gerar o aparecimento de fissuras como apresentado na Figura 6 (Oliveira, 2012).

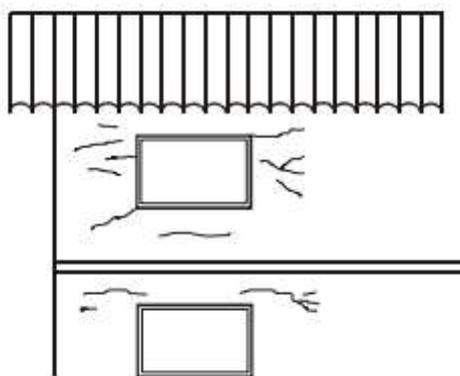
Figura 6: Fissuras causadas por recalques de fundação



Fonte: Magalhães (2004)

f) Fissuras causadas por alterações químicas dos materiais de construção: Os materiais de construção são suscetíveis de deterioração pela ação de substâncias químicas, principalmente as soluções ácidas e alguns tipos de álcool. Assim, edifícios que abrigam fábricas de laticínios, cerveja, álcool e açúcar, celulose e produtos químicos em geral podem ter seus materiais e componentes seriamente avariados por essas substâncias. Independentemente da presença de meios fortemente agressivos, como as atmosferas com alta concentração de poluentes e os ambientes industriais, os materiais de construção podem sofrer alterações químicas indesejáveis que redundam, entre outras coisas, na fissuração do componente como exposto na Figura 7.

Figura 7: Fissuras causadas por alterações químicas



Fonte: Magalhães (2004)

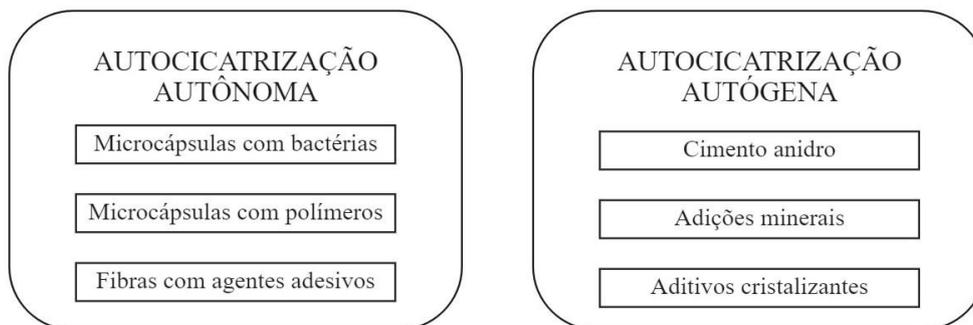
2.3 O processo de Autocicatrização de fissuras

A autocicatrização é um fenômeno natural que surge como um mecanismo de auxílio no fechamento de microfissuras com base na ocorrência de reações químicas e o envolvimento de água (Lima, 2021).

Os materiais de autocicatrização, denominados como *self-healing*, são materiais com capacidade autógena para reparar danos, ou que com ajuda mínima de algum estímulo externo desenvolvem reparação de maneira autônoma (De Rooij *et al.*, 2013). A capacidade interna de reparação é conhecida como colmatação autógena, conceito esse descrito na literatura como a capacidade natural de materiais cimentícios se autorrepararem. Devido à contínua hidratação dos compostos do clínquer ou à carbonatação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), as fissuras podem cicatrizar com o decorrer do tempo. A cicatrização autógena é limitada a pequenas fissuras, sendo eficaz somente quando a água está disponível e há presença de material cimentício não hidratado. No entanto, a autocicatrização autógena dos materiais cimentícios pode ser intensificada com o uso de adições minerais (Cappelleso, 2018).

Os tipos de autocicatrizações existentes podem ser classificados em dois grupos como mostra a Figura 8: o grupo da autocicatrização autônoma ou projetada que se refere à matriz cimentícia desenvolvida com a finalidade de ter a propriedade autocicatrizante, seja pela adição de elementos que reagem quimicamente com a matriz ou por elementos que reagem somente após a ocorrência do dano pela liberação de um produto específico para este fim, ambos inseridos na matriz no momento da confecção; e o grupo de autocicatrização autógena ou natural que se refere às condições usuais de materiais empregados em composições cimentícias ou medidas tomadas com a função de trazer outros benefícios ao compósito, mas que por fim contribuem para o fenômeno da autocicatrização (Cappelleso, 2018).

Figura 8: Tipos de autocicatrização em materiais cimentícios



Fonte: Adaptado de Ziegler (2020)

Conforme apresentado na Figura 8, a autocicatrização autônoma pode ser obtida com o uso de materiais que são produzidos artificialmente e inseridos na matriz cimentícia no momento de sua produção, por meio da utilização de microcápsulas com bactérias ou polímeros, e fibras com agentes adesivos. Nestes exemplos, a partir do surgimento de fissuras, tem-se o rompimento das cápsulas e consequente liberação dos agentes cicatrizantes, que promovem a selagem ou cicatrização da fissura ao reagirem com a água, ar ou calor (Ziegler, 2020).

A autocicatrização autógena por sua vez é desenvolvida através da utilização de diferentes cimentos, adições minerais e os aditivos cristalizantes. Os aditivos cristalizantes, também conhecidos como redutores de permeabilidade, atuam na densificação da matriz porosa dos materiais cimentícios, mas também estão sendo foco na utilização para o fechamento de fissuras (Ziegler, 2020). Para Oliveira (2019), a autocicatrização autógena favorece o fechamento total ou parcial de fissuras, sendo este fenômeno relacionado à atuação dos próprios constituintes da mistura cimentícia juntamente com a presença de água, podendo ser verificada ou não a recuperação do desempenho mecânico da estrutura.

Segundo Bianchin (2018), muitos fatores influenciam a capacidade do concreto de restabelecer sua resistência e estanqueidade, destacando-se a composição do concreto, a relação água/aglomerante, o tipo de cimento, a gravidade dos danos, a idade do concreto quando ocorreu a fissuração, as condições de umidade, o período e o tipo de cura e a largura da fissura. Em relação a autocicatrização de fissuras, existem várias hipóteses quanto à largura máxima da fissura que pode autocicatrizarse, porém, ainda não existe um entendimento integral acerca de tal mecanismo.

3 METODOLOGIA

A metodologia consistiu-se em duas etapas. A primeira foi uma revisão bibliográfica exposta no capítulo 2 trazendo uma abordagem inicial sobre o tema. Já a segunda, foi uma revisão sistemática sobre a autocicatrização de fissuras em misturas cimentícias com o auxílio das bases de dados Scopus e Web of Science, que teve o intuito de identificar os principais trabalhos, estreitando e aprimorando as pesquisas. Neste capítulo explica-se passo a passo os procedimentos para a realização dessa revisão.

3.1 Revisão bibliográfica

Para compor a revisão bibliográfica, os trabalhos foram selecionados por meio de palavras-chave que representassem cada elemento do referencial teórico, por meio do Google Acadêmico, sendo estas: misturas cimentícias, fissuras e autocicatrização. Essa etapa não teve como objetivo apresentar todos os estudos dos temas mencionados, mas apresentar os principais tópicos do trabalho além de fazer uma breve identificação da literatura. Sendo assim, os temas mencionados foram expostos nesta pesquisa.

3.2 Revisão sistemática

A revisão sistemática é um método utilizado na avaliação de um conjunto de dados provenientes de diferentes estudos e que busca coletar toda a evidência empírica, com o objetivo de responder questões específicas, apresentar os dados de pesquisa existentes e abordar o que ainda não é tão discutido sobre o tema da pesquisa. Utiliza métodos sistemáticos que são selecionados com o objetivo de minimizar vieses, assim fornecendo resultados mais confiáveis, com os quais conclusões podem ser feitas e decisões tomadas. Dessa forma é o método principal de síntese de evidências, sendo essas revisões geralmente mais utilizadas (Falavigna, 2018).

Segundo Sampaio e Mancini (2007), para a realização de uma revisão sistemática adequada se faz necessário considerar algumas etapas anteriores à revisão. São elas: definição do objetivo da revisão, identificação da literatura e uma seleção dos possíveis estudos a serem incluídos.

Após esse prévio conhecimento, foram estabelecidos e adotados uma série de critérios, apresentados no Quadro 1, para procurar os trabalhos mais relevantes sobre o tema da monografia.

Quadro 1: Critérios adotados para realizar a revisão sistemática

Etapas	Critério de seleção
Selecionar os bancos de dados para as buscas.	- Scopus® database (Elsevier) - Web of Science
Escolher palavras-chave que estejam incluídas nos títulos ou resumos dos artigos.	" <i>Self Healing</i> "
Especificar os filtros que serão utilizados.	Trabalhos científicos empíricos e de revisão. Termos pesquisados nos títulos, resumos e palavras-chave. Período de busca: 2016 a 2022.
Excluir artigos duplicados que estão presentes em mais de uma base de dados.	Sim
Solicitar que as palavras-chave definidas ocorram pelo menos uma vez no corpo inteiro do artigo.	- Scopus: Foram encontrados 3.717 trabalhos de livre acesso - Web of Science: Foram encontrados 27 trabalhos de livre acesso
Adicionar artigos não incluídos na busca, mas identificados ao longo das leituras das produções selecionadas.	Sem adições.

Fonte: Adaptado de Ruhlandt (2018)

Seguindo os critérios selecionados antecipadamente para o desenvolvimento do presente trabalho, optou-se por utilizar duas bases de dados: Scopus e Web of Science. A palavra-chave escolhida foi "*self-healing*", utilizada no idioma inglês, já que os trabalhos dessas bases de dados se encontram nesse idioma. Nas duas bases, aspas (") foram utilizadas com o intuito de garantir maior exatidão na pesquisa. Nesta busca, foram admitidos apenas trabalhos científicos empíricos e de revisão e o termo pesquisado deveria estar pelo menos nos títulos, resumos e palavras-chave.

Como em Júnior *et al.* (2020), foi escolhida a palavra central do tema do trabalho para realizar a revisão sistemática. Vale salientar que devido ao tema ser muito amplo e abranger outras áreas, poderiam ser selecionados trabalhos que não contemplasse a área deste, sendo necessário fazer filtros mais adiante.

Além disso, decidiu-se que o período de busca seria entre os anos de 2016 até o momento da pesquisa. Logo, ao final dessa primeira busca, na base de dados da Scopus foram apresentados 14.055 resultados de documentos dos quais, depois de limitados aos documentos de acesso livre, restaram 3.717 arquivos. Já na base de dados da Web of Science, a pesquisa só obteve 27 arquivos buscados.

O próximo passo foi exportar os arquivos da base de dados. Para isso, se fez necessário selecionar o método de exportação, optando-se pelo formato “RIS”, já que esse era o formato aceito pelo *software*.

Ademais, foram selecionadas as informações que se desejava exportar, sendo escolhidas as informações de citação, informações bibliográficas e resumos, e palavras-chave para a base de dados da Scopus, como apresentado na Figura 9. Para a base de dados da Web of Science as informações foram: de autor, título e fonte; resumo, palavras-chave e endereços; e referências como mostrado na Figura 10.

Figura 9: Métodos de exportação de arquivos na base de dados Scopus

Exportar configurações do documento [?](#) X

You have chosen to export 3717 documents

Selecione seu método de exportação

MENDELEY ExLibris RefWorks Formato RIS EndNote, Gerenciador de Referências CSV Excel BibTeXName Texto simples ASCII em HTML

Quais informações você deseja exportar?

<input checked="" type="checkbox"/> Informações de citação	<input checked="" type="checkbox"/> Informações bibliográficas	<input checked="" type="checkbox"/> Resumo e palavras-chave	<input type="checkbox"/> Detalhes do financiamento	<input type="checkbox"/> Outra informação
<input checked="" type="checkbox"/> Autor(es)	<input checked="" type="checkbox"/> Afiliações	<input checked="" type="checkbox"/> Resumo	<input type="checkbox"/> Número	<input type="checkbox"/> Nomes comerciais e fabricantes
<input checked="" type="checkbox"/> ID do(s) autor(es)	<input checked="" type="checkbox"/> Identificadores de série (por exemplo, ISSN)	<input checked="" type="checkbox"/> Palavras-chave do autor	<input type="checkbox"/> Acrônimo	<input type="checkbox"/> Números de adesão e produtos químicos
<input checked="" type="checkbox"/> Título do documento	<input checked="" type="checkbox"/> Código PubMed	<input checked="" type="checkbox"/> Palavras-chave do índice	<input type="checkbox"/> Patrocinador	<input type="checkbox"/> Informações da conferência
<input checked="" type="checkbox"/> Ano	<input checked="" type="checkbox"/> Editor		<input type="checkbox"/> Texto de financiamento	<input type="checkbox"/> Incluir referências
<input checked="" type="checkbox"/> IDE	<input checked="" type="checkbox"/> Editor(es)			
<input checked="" type="checkbox"/> Título da Fonte	<input checked="" type="checkbox"/> Idioma do documento original			
<input checked="" type="checkbox"/> volume, edição, páginas	<input checked="" type="checkbox"/> Endereço correspondente			
<input checked="" type="checkbox"/> Contagem de citações	<input checked="" type="checkbox"/> Título da fonte abreviado			
<input checked="" type="checkbox"/> Origem e tipo de documento				
<input checked="" type="checkbox"/> Estágio de Publicação				
<input checked="" type="checkbox"/> DOI				
<input checked="" type="checkbox"/> Acesso livre				

Fonte: Base de dados, Scopus (2022)

Figura 10: Métodos de exportação de arquivos na base de dados Web of Science

Minhas seleções de exportação personalizadas (SciELO Citation Index) ✕

<input checked="" type="checkbox"/> Autor, Título, Fonte	<input checked="" type="checkbox"/> Resumo, palavra-chave, endereços	<input checked="" type="checkbox"/> Referências Citadas e Uso	<input type="checkbox"/> Financiamento e outros
<input checked="" type="checkbox"/> Autor(es)	<input checked="" type="checkbox"/> Abstrato	<input checked="" type="checkbox"/> Referências Citadas*	<input type="checkbox"/> Informações do editor
<input checked="" type="checkbox"/> Título	<input checked="" type="checkbox"/> Endereços	<input checked="" type="checkbox"/> Contagem de referência citada	<input type="checkbox"/> Acesso livre
<input checked="" type="checkbox"/> Fonte	<input checked="" type="checkbox"/> tipo de documento	<input checked="" type="checkbox"/> Contagem de uso	<input type="checkbox"/> Linguagem
<input checked="" type="checkbox"/> Contagem de vezes citadas	<input checked="" type="checkbox"/> Palavras-chave	<input checked="" type="checkbox"/> Papel Quente	
<input checked="" type="checkbox"/> Número de acesso	<input checked="" type="checkbox"/> Áreas de Pesquisa	<input checked="" type="checkbox"/> Altamente citado	
<input checked="" type="checkbox"/> Identificadores de autores	<input checked="" type="checkbox"/> Categorias SciELO		
<input checked="" type="checkbox"/> ISSN	<input checked="" type="checkbox"/> Coleções SciELO		

Observação: a exportação do RIS ainda não oferece suporte a todos os campos listados.

Cancelar Salvar seleções

Fonte: Base de dados, Web of Science (2022)

Após as pesquisas serem exportadas, para auxiliar nessa revisão sistemática e com o objetivo de observar elementos textuais, fez-se o uso do *software* VOSviewer, exibido na Figura 11. O VOSviewer é uma ferramenta para criar mapas baseados em dados de rede e para visualizar e explorar esses mapas (VOSviewer Manual, 2021).

Figura 11: Tela de iniciação do VOSviewer

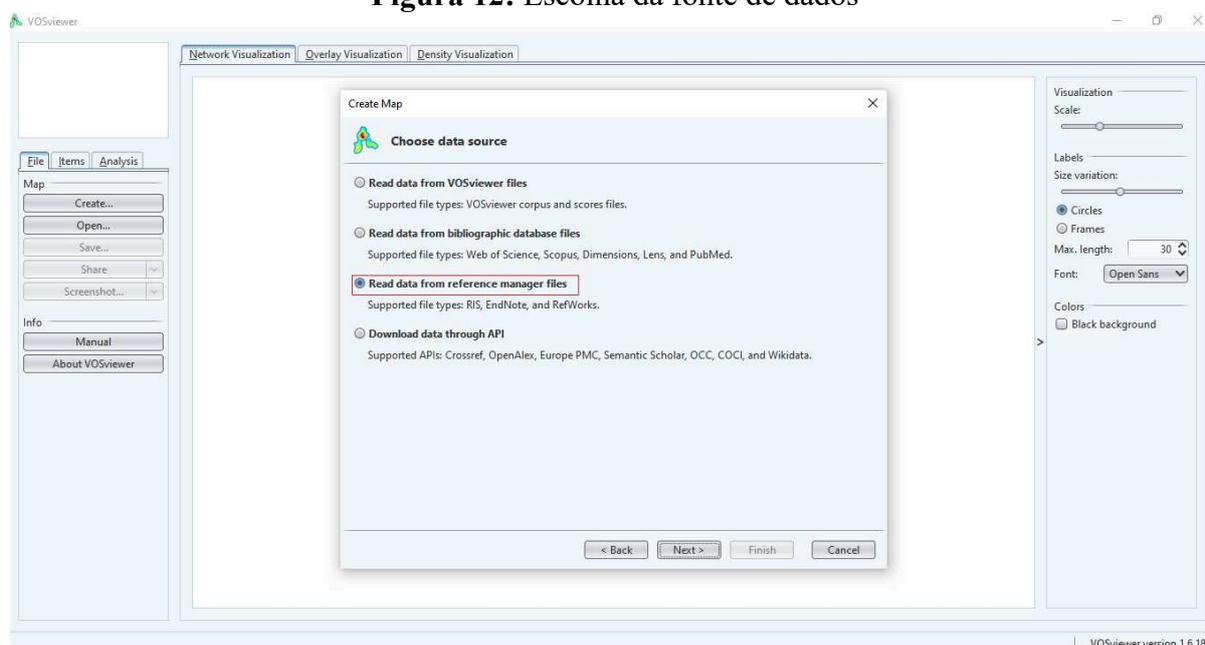


Fonte: Software, VOSviewer (2022)

Sendo assim, para que os mapas fossem criados, o *software* apresentava três opções de escolha: criar um mapa com base nos dados da rede, o qual não se aplica para a revisão sistemática; criar um mapa com base em dados bibliográficos, onde os mapas apresentam dados relacionados às palavras-chave, autores e citações bibliográficas dos trabalhos; ou criar um mapa com base em dados de texto onde os mapas exibem dados com base nas palavras-chave relacionadas a resumos e títulos dos trabalhos, sendo esta última a opção escolhida, pois acreditou-se que os dados contidos nesses eram mais relevantes para a finalidade da revisão.

Após isso, foi necessário escolher a fonte de dados que iria ser carregada no *software* para que os dados fossem lidos corretamente. Selecionou-se a terceira opção da aba, que continha dados no formato “RIS” como tipo de arquivo suportado, como mostra a Figura 12.

Figura 12: Escolha da fonte de dados



Fonte: Software, VOSviewer (2022)

Após alimentar o *software* com os arquivos das duas bases, uma por vez, foram selecionados 45.023 termos na base de dados da Scopus e 983 termos na base de dados da Web of Science. Assim, escolheu-se mais alguns filtros a fim de impossibilitar falsos positivos no resultado.

A opção escolhida foi aquela onde o *software* identifica os títulos e os resumos pois assim, se faz possível sintetizar toda a pesquisa, sendo possível obter mais informações que fossem relevantes para o trabalho. Além disso, escolheu-se contar todas as palavras dos artigos, selecionando-se as que foram repetidas no mínimo 120 vezes no mesmo artigo para a base de

dados da Scopus e apenas 4 vezes para a base de dados da Web of Science visto que o número de trabalhos encontrados foi consideravelmente menor. Esses filtros foram aplicados com a finalidade de que fosse trazido realmente aquilo que foi mais abordado. Dos 45.023 termos selecionados anteriormente na base de dados da Scopus, restaram 52 e dos 983 selecionados na base de dados da Web of Science restaram 39.

Destes, o *software* ainda propõe que sejam selecionados 60%, porém preferiu-se manter todos os termos escolhidos, visto que já tinha sido feito um filtro restritivo.

Precedente à criação dos mapas, os termos selecionados foram apresentados na tela com o número de ocorrências e seu respectivo nível de relevância para, assim, ser feita uma análise prévia. Decidiu-se por manter somente os termos que remetem especificamente aos materiais, procedimentos e aplicações referentes ao processo da autocicatrização, como visto na revisão bibliográfica feita anteriormente à revisão sistemática. Dessa forma excluiu-se vinte e nove palavras na análise feita para a base de dados da Scopus e vinte e cinco para a análise dos dados da Web of Science. Essas estão exibidas na Quadro 2.

Quadro 2: Palavras excluídas manualmente no software

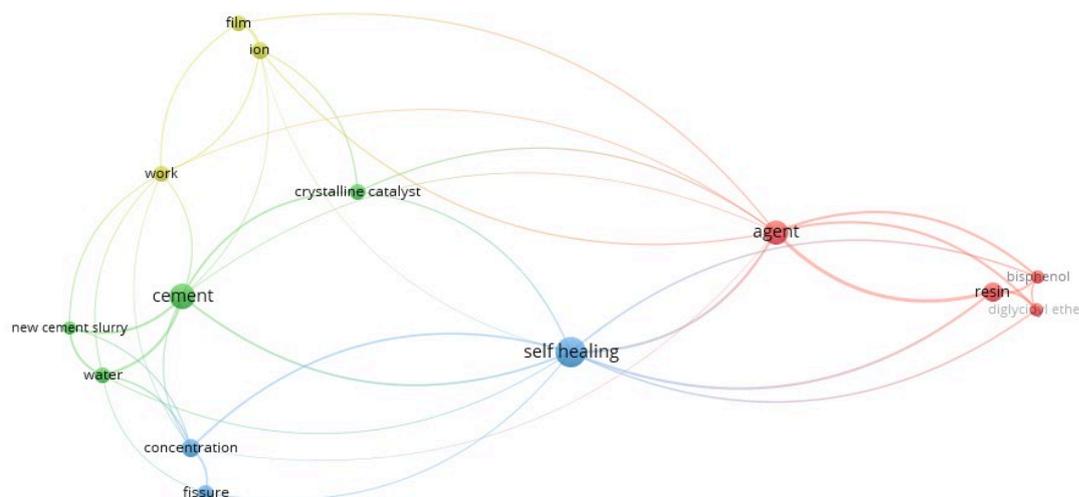
Base Scopus	Base Web of Science
Day	Effect
Network	Ethephon
Review	Cost
Approach	Group
Model	Surgery Group
Use	Abstract
Search	Algorithm
Study	Network
Efficiency	Node
Sample	Order
Water	Use
Damage	Lesion
Effect	Life
Influence	Review
Acting	Self
Presence	Type
Property	Year
Self	Presence
Application	Reiki
Challenge	Sample
Development	JXG
Field	Study
Mechanism	Day
Order	SHC
Paper	Lesion
Structure	-
System	-
Process	-
Type	-

Fonte: Autor (2022)

Finalizada essa etapa, o *software* cria automaticamente o mapa de palavras disponibilizando três tipos de mapas: Visualização de Rede, Visualização de Sobreposição e Visualização de Densidade. Neste trabalho, optou-se por utilizar o mapa de Visualização de Rede pois neste as palavras são claramente divididas em *clusters*. Os *clusters* são agrupamentos de palavras que estão mais fortemente relacionadas entre si e apresentam cores diferenciadas nas ramificações de tal forma que se torna mais simplificada a criação de tabelas e a análise das palavras, tanto das selecionadas ao final dos filtros, como também das palavras contidas em cada *cluster*.

Como já mencionado, para a análise e discussão do mapa obtido se fez necessário a criação de tabelas e a leitura dos materiais buscados, fazendo uma leitura prévia dos resumos dos trabalhos para identificar quais iam de encontro mais direto com os termos analisados no *software*.

Figura 16: Mapa de visualização de rede obtido na revisão sistemática com os dados da Web of Science após excluir 25 palavras



Fonte: VOSviewer (2022)

Ao analisar os mapas, percebe-se que eles estão divididos em *clusters* listados nos Quadros 3 e 4. Os *clusters* são agrupamentos de palavras que apresentam uma forte ligação entre si, estando aglomeradas em uma mesma discussão.

Quadro 3: Relação de Clusters referente aos dados da base Scopus

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Ability	Addition	Agent
Hydrogel	Bacterium	Coating
Mechanical property	Concrete	Composite
Poly	Crack	Microcapsule
Polymer	Formation	Self Healing Material
Self Healing	Healing	Surface
Self healing Ability	-	-
Self Healing property	-	-
Temperature	-	-
Time	-	-
Work	-	-

Fonte: VOSviewer (2022)

Quadro 4: Relação de Clusters referente aos dados da base Web of Science

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
Agent	Cement	Concentration	Film
Bisphenol	Crystalline catalyst	Fissure	Ion
Diglycidyl ether	New Cement Slurry	Self Healing	Work
Resin	Water	-	

Fonte: VOSviewer (2022)

Assim, como o objetivo desta pesquisa é a abordagem sobre as principais técnicas da autocicatrização (*self-healing*), foi observado que as palavras que mais se destacaram nesse sentido levando em consideração o embasamento da revisão bibliográfica foram: bactérias, adição ou aditivo e polímero.

4.2 As técnicas da autocicatrização

No sentido de abordar sobre as técnicas que mais vem sendo utilizadas atualmente para a autocicatrização das fissuras, serão destacadas as que aparecem nos mapas e discorre-se sobre essas ao longo deste tópico.

4.2.1 Autocicatrização por processos realizados por bactérias

O processo de autocicatrização que ocorre através da inserção de bactérias que produzem carbonato de cálcio nas misturas cimentícias é um tipo recente de autocicatrização autônoma, mas que já apresenta resultados positivos e pode ser considerada como uma técnica promissora. Jonkers (2008) publicou os primeiros estudos sobre o assunto, quando observou que o corpo humano, incluindo a estrutura óssea, possui a capacidade de autocura no caso de pequenas lesões. Essa observação serviu como inspiração para dar início ao desenvolvimento de pesquisas que se referem à autocicatrização do concreto (Alves, 2019 *apud* Koga, 2020; Santos, 2020).

Segundo Costa e Rodrigues (2018), o processo ocorre de forma que as fissuras são preenchidas pelo carbonato de cálcio (CaCO_3) precipitado. Esse processo, chamado de biomineralização, consiste na formação de minerais a partir de uma seleção de elementos que são retirados do meio e incorporados na sua estrutura funcional, através de organismos como as bactérias.

Quando essas bactérias são adicionadas ao concreto, permanecem dormentes até que ocorra a primeira fissura do material que deverá expô-las à água e ao oxigênio. Após ativadas, elas começam a produzir esporos do carbonato de cálcio que irão com o tempo selar a fissura.

Para que isso aconteça é importante o uso de bactérias locais, pois estas se adaptam melhor às condições do ambiente onde já vivem. Outras características que devem ser levadas em consideração são se as bactérias apresentam resistência a pH alcalino (comum em materiais cimentícios) e a altas concentrações de íons de cálcio, se são tolerantes à presença de oxigênio e se possuem a capacidade de suportar condições de alta pressão por estarem embutidas na matriz cimentícia. Além disso, as bactérias não podem ser patogênicas pois estas causam riscos à saúde das pessoas e do meio ambiente (Bianchin, 2018; Zakrzewski, 2022).

Tendo em vista que cada espécie de bactéria possui características próprias e que podem influenciar diretamente nos aspectos de autocicatrização, é essencial antes de utilizá-las para a autocicatrização, um estudo mais variado e aprofundado sobre a escolha de quais espécies são mais eficazes (Bianchin, 2018).

Devido às bactérias do gênero *Bacillus* possuírem características tais como a resistência à substância química “álcalis”, e por ser um gênero formador de esporos, essas são as mais indicadas para serem usadas na técnica de autocicatrização. Os esporos bacterianos são adicionados diretamente ao concreto em estado fresco, antes ainda da cura, e isso pode comprometer a durabilidade da estrutura limitando-a em aproximadamente 4 meses (Jonkers *et al.*, 2008). Isto ocorre pois quando as bactérias são inseridas diretamente na mistura, o cimento apresenta contínua hidratação, causando uma redução no diâmetro dos poros de modo que seja inferior ao dos esporos (Euzébio; Alves; Fernandes, 2017). Como forma de sanar esses problemas, estudaram-se soluções encontrando-se duas possíveis: a primeira seria o encapsulamento ou paralisação dos esporos em uma matriz protetora, previamente adicionada à mistura de concreto e a outra, o acréscimo de agentes de retenção de ar para criar microporos no concreto, garantindo que os esporos permaneçam vivos (Soltmann *et al.*, 2003 *apud* Koga, 2020; Santos, 2020).

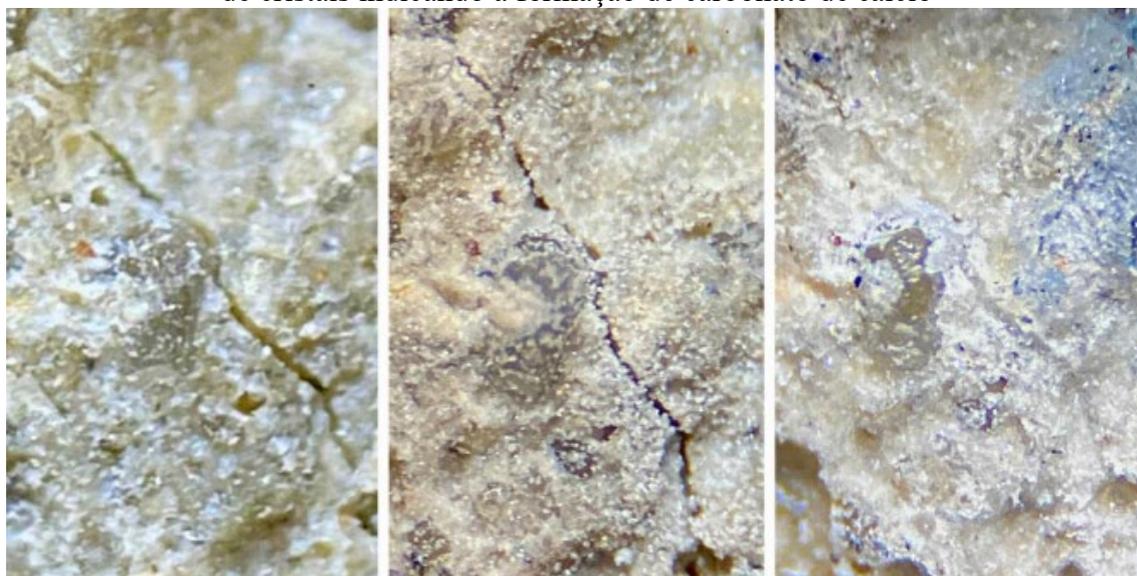
A principal justificativa e a que impulsiona a técnica da autocicatrização autônoma pelo encapsulamento é que, no momento em que ocorrem as fissuras na matriz cimentícia, as cápsulas se rompem e seu conteúdo é liberado nas fissuras promovendo assim a cicatrização (Al-Tabbaa *et al.*, 2019 *apud* Zakrzewski, 2022).

Em um trabalho mais recente, Zakrzewski (2022) faz a análise da recuperação de fissuras através da bactéria do gênero *Bacillus subtilis* encapsulada em argila expandida. Esse estudo foi realizado com concreto e utilizou-se para a sua produção: cimento CPV-ARI, areia média, brita 1 e argila expandida, sendo todos os materiais caracterizados em laboratório. As bactérias foram encapsuladas na argila expandida com granulometria correspondente a brita 1, para que assim o resultado fosse mais assertivo.

Os corpos de prova moldados para os ensaios foram cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo usado três traços diferentes de concreto. Após 24 horas da moldagem dos corpos de prova, eles foram retirados dos moldes e levados para câmara úmida, onde permaneceram por sete dias para assim ser realizado o primeiro ensaio de resistência à compressão. Esse também foi o tempo destinado para a pré fissuração dos CP's. O segundo ensaio ocorreu com 90 dias após a cura dos corpos de prova juntamente com o ensaio de módulo de elasticidade.

A identificação visual da fissura foi feita inicialmente e fotografada, e a cada quinze dias o resultado da cicatrização destas era acompanhado. Por esta análise, verificou-se que o tempo necessário para a selagem completa das fissuras foi de 45 dias, como mostrado na Figura 17.

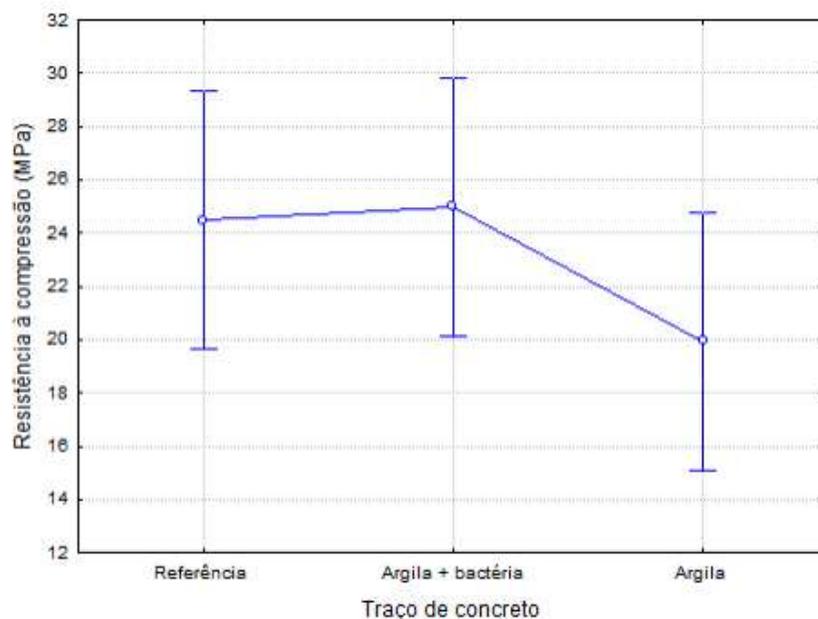
Figura 17: Análise microscópica com 200x de aumento da selagem da fissura com presença de cristais indicando a formação de carbonato de cálcio



Fonte: Zakrzewski (2022)

Neste mesmo trabalho foi possível verificar ainda que com os experimentos realizados (resistência à compressão e módulo de elasticidade) a eficiência da utilização de bactérias *Bacillus subtilis* incorporadas ao concreto vai além do auxílio na recuperação das fissuras, e consegue melhorar as suas propriedades mecânicas.

Na Figura 18 é apresentado o gráfico onde é possível comparar as resistências à compressão de acordo com o traço do concreto.

Figura 18: Resistência à compressão aos 7 dias dos três diferentes traços de concreto

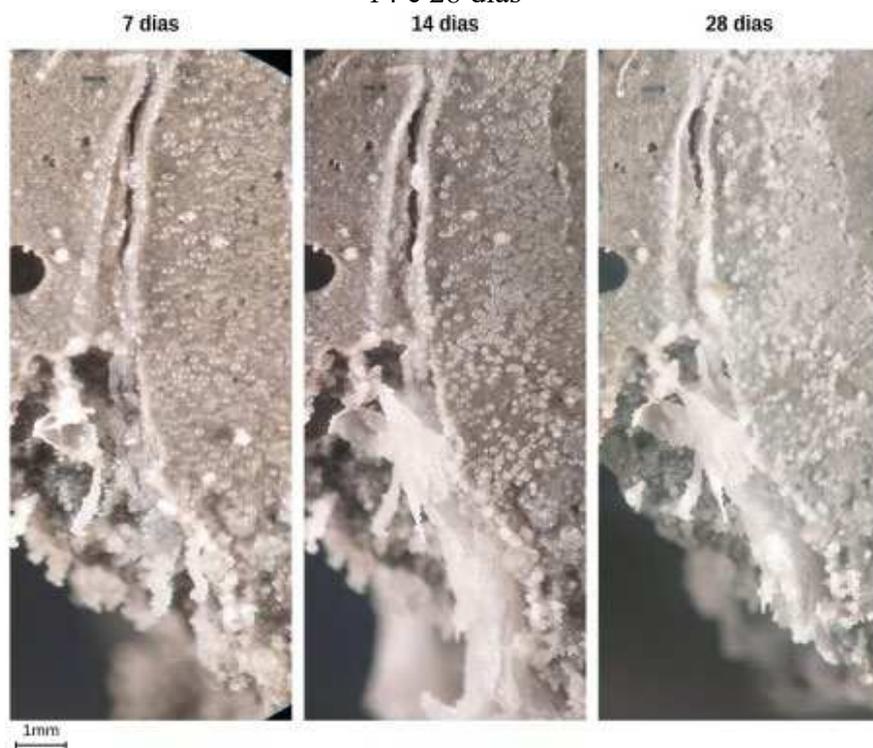
Fonte: Zakrzewski (2022)

O concreto com o traço 1 (cimento, areia média, brita 1, água, aditivo superplastificante e argila expandida) apresentou 19,94 MPa como resultado no ensaio de resistência à compressão. Já o concreto com o traço 2 (cimento, areia média, brita 1, água, aditivo superplastificante e argila expandida com bactérias encapsuladas) obteve 24,98 MPa o que indica a ação das bactérias no que diz respeito a melhoria das propriedades mecânicas.

Mello (2022), em seu trabalho, analisa a autocicatrização dos materiais cimentícios por diferentes linhagens bacterianas em uma matriz com ar incorporado. Para a produção dos corpos de prova, utilizou-se cimento tipo CP V, sem adições pozolânicas, o que evita a ocorrência de autocicatrização autônoma por reação pozolânica e a adição das bactérias é feita diretamente na matriz cimentícia e em cápsulas de perlita expandida. Os corpos de prova foram moldados em formato de prisma para a análise visual da autocicatrização. As fissuras foram executadas através do desenvolvimento de tensões de tração na argamassa por ensaio de tração na flexão por 3 pontos, conforme os procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005).

Na Figura 19 é possível observar a formação dos cristais ao longo de uma fissura de uma das faces laterais de um dos corpos de prova utilizado nos ensaios.

Figura 19: Análise microscópica de produtos de cicatrização ao longo de uma fissura aos 7, 14 e 28 dias

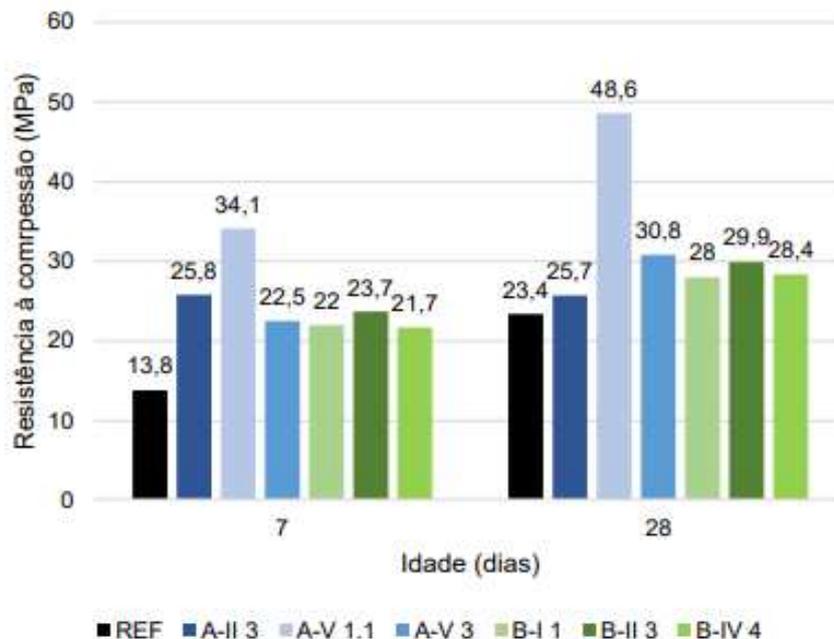


Fonte: Mello (2022)

A Figura 19 mostra que aos 7 dias de cicatrização já houve formação de cristais na fissura do corpo de prova, o que indica que o processo utilizando bactérias não é um processo que precisará de muito tempo para a visualização dos resultados. Segundo Zakrzewski (2022), a selagem em um curto espaço de tempo, como é o caso da que ocorreu na pesquisa, evita a infiltração de água em grande quantidade no interior das estruturas, o que poderia levar a danos futuros e deterioração. Além disso, essas bactérias podem se manter viáveis na matriz de concreto durante muitos anos, e por essa razão, continuar realizando a remediação de novas fissuras que poderão vir a surgir ao longo do tempo.

Na Figura 20 é exposto o gráfico comparativo do ensaio de resistência à compressão realizado nas diferentes amostras.

Figura 20: Resistência à compressão desenvolvida pelas argamassas



Fonte: Mello (2022)

Observando esses resultados, novamente fica explícito que a técnica da autocicatrização por processos realizados por bactéria além de ser assertiva traz benefícios além da autocicatrização para as misturas cimentícias, uma vez que se pode observar na Figura 20 que todas as misturas que tiveram a adição de bactérias, seja de qualquer gênero (A-II 3 - Cronobacter, A-V 1.1 - Cronobacter, B-I 1 - Bacillus, B-II 3 - Citrobacter ou B-IV 4 - Pseudomonas) apresentaram maior resistência à compressão do que a mistura de referência nas duas idades (7 e 28 dias).

Vale ressaltar ainda que em Zakrzewski (2022) as bactérias foram inseridas por encapsulamento e em Mello (2022) em algumas misturas as bactérias foram incorporadas diretamente nas misturas e mesmo assim a eficácia foi comprovada.

4.2.2 Autocicatrização por meio de aditivos cristalizantes

A autocicatrização por meio de aditivos cristalizantes também é uma técnica que vem sendo muito utilizada, pois assim como na utilização de bactérias, além do benefício no reparo das fissuras, o seu uso também auxilia na recuperação das propriedades das misturas cimentícias no estado fresco e/ou no estado endurecido (Oliveira, 2019).

Os aditivos cristalizantes são compostos cimentícios utilizados no concreto, que tem a finalidade de reduzir a sua permeabilidade. Estes podem ser utilizados nas estruturas de duas

formas: como um impermeabilizante (aplicado em forma de pintura em estruturas acabadas), ou dosado no momento da produção do concreto, onde forma uma barreira de cristais insolúveis impedindo a entrada de água e agentes agressivos na estrutura (Flores, 2021; Tambara, 2022).

Este aditivo é composto por cimento Portland, compostos químicos ativos e rastreador químico, sendo utilizado em um teor que varia de acordo com o fabricante, podendo estar entre 0,8% e 2,5% em relação a massa do cimento (Flores, 2021).

O uso desse aditivo cristalizante influencia bastante a matriz cimentícia, pois ele atua como um hidrofílico, consumindo o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e reduzindo assim a permeabilidade do concreto para selar e proteger seus poros, obtendo a capacidade de cicatrização de fissuras através da cristalização. Como o aditivo cristalizante reage com a água, à medida que ocorre a formação de fissuras, com o passar do tempo os aditivos cristalizantes continuam reagindo e sendo ativados na presença de água, assim, a formação cristalina não solúvel na microestrutura protege permanentemente o concreto contra a penetração de água e outros líquidos, resultando na redução da permeabilidade do material cimentício e em propriedades hidrofóbicas após seu endurecimento, como observa-se na Figura 21. Por esse motivo podem ser bastante utilizados em reparos onde há dificuldade para acesso, como por exemplo nas lajes de subpressão, tomada d'água de barragens e nas instalações de resíduos nucleares (Oliveira, 2019; Flores, 2021; Tambara, 2022).

Figura 21: Ação do aditivo cristalizante no bloqueio e revestimento hidrofóbico em fissuras ou capilares



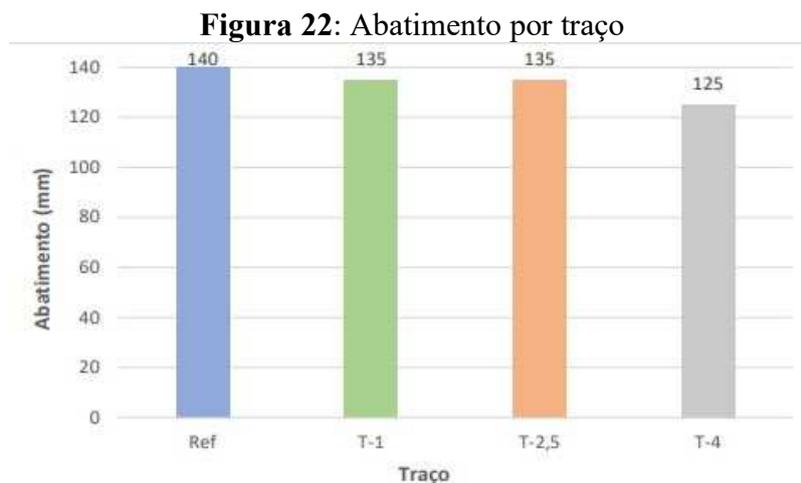
Fonte: Oliveira (2019)

O aditivo cristalizante é muito eficiente quando há bastante umidade na estrutura, sendo a água a principal fonte de ativação das reações de cristalização. As reações também ocorrem pelo transporte de água através das fissuras, sendo a água o elemento essencial para a ativação dos aditivos cristalizantes, pois só assim é possível que estes utilizem-na para reagir com as

partículas de cimento, formando depósitos cristalinos no sistema de poros e fissuras presentes (Flores, 2021).

Em Flores (2021), é feita uma análise em corpos de prova de concretos produzidos com aditivos cristalizantes, em quatro traços com teores diferentes do aditivo. Utilizou-se um traço referência, este sem aditivo, e os demais com 1%, 2,5% e 4% de aditivo cristalizante, onde foram induzidas fissuras nos corpos de prova. Inicialmente, aos 7 dias, foi aplicada uma carga de 90% da carga de ruptura nas amostras, porém essa carga foi excessiva e resultou na ruptura de alguns corpos de prova. Desse modo, foi realizada a pré-carga com 70% da carga de ruptura aos 7 dias (CP - 7 dias) e 80% aos 28 dias (CP - 28 dias) para, só assim, a técnica da autocicatrização ser analisada. Foram realizados ensaios com o concreto no estado fresco (trabalhabilidade e determinação da massa específica) e com o concreto no estado endurecido (resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água por imersão) aos 28 e 56 dias.

Nos ensaios com o concreto no estado fresco, para avaliar a trabalhabilidade dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, onde verificou-se que a adição do aditivo cristalizante na matriz cimentícia altera sua trabalhabilidade, de tal forma que quanto maior a quantidade de aditivo acrescentado ao concreto, menor a sua trabalhabilidade, como mostrado na Figura 22.



Fonte: Flores (2021)

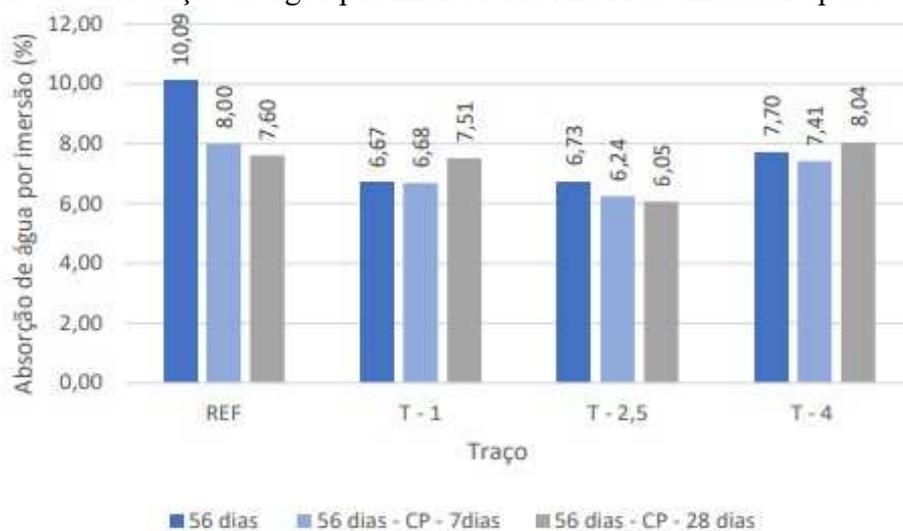
Mesmo assim, os resultados dos ensaios ficaram dentro do estabelecido inicialmente (120 ± 20 mm), o que mostra que praticamente não há diferença quando o aditivo é adicionado à mistura.

No ensaio de resistência à compressão verificou-se a tensão de ruptura nos quatro traços empregados na análise. Foi possível observar uma melhor recuperação desta propriedade nas

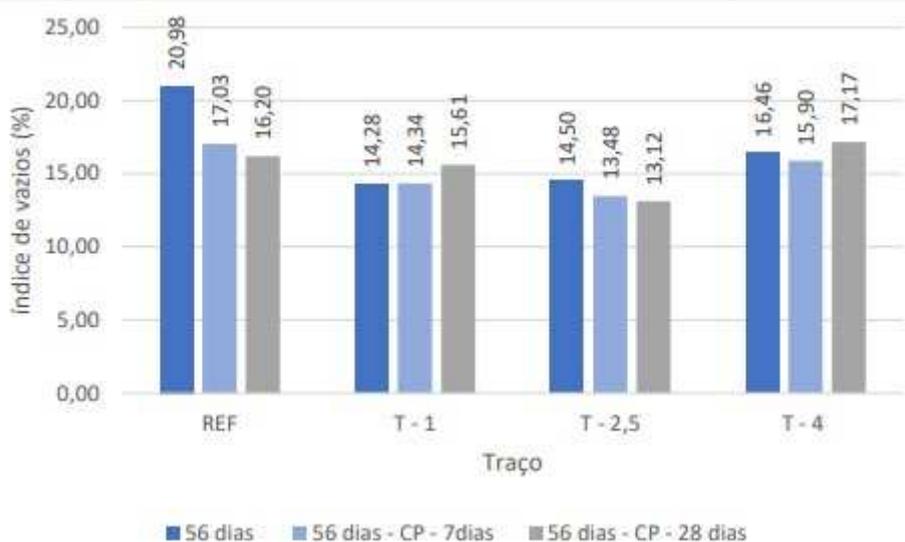
amostras fissuradas aos 7 dias, com um melhor resultado nos corpos de prova com 56 dias de cura, o que indica que a autocicatrização ocorre de forma mais efetiva em fissuras jovens, sendo mais eficaz com o passar do tempo. Pode-se explicar esse fenômeno pelo fato de fissuras encontradas em concretos jovens apresentarem maior facilidade para esse fenômeno ocorrer tendo como principal mecanismo a hidratação contínua dos grãos anidros, enquanto em fissuras em concretos com idade mais avançada a probabilidade de ocorrer essa hidratação é menor. Além disso, verificou-se que apesar da recuperação da resistência ser observada em todos os traços, comprovando a existência da autocicatrização, a técnica se deu mais efetivamente nos concretos com aditivo cristalizante.

No ensaio de absorção de água por imersão (processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso) e índice de vazios (relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra), obteve-se os resultados mostrados nas Figuras 23 e 24, respectivamente, onde é possível visualizar o índice de absorção para os diferentes traços.

Figura 23: Absorção de água por imersão das amostras ensaiadas após 56 dias



Fonte: Flores (2021)

Figura 24: Índice de Vazios das amostras ensaiadas após 56 dias

Fonte: Flores (2021)

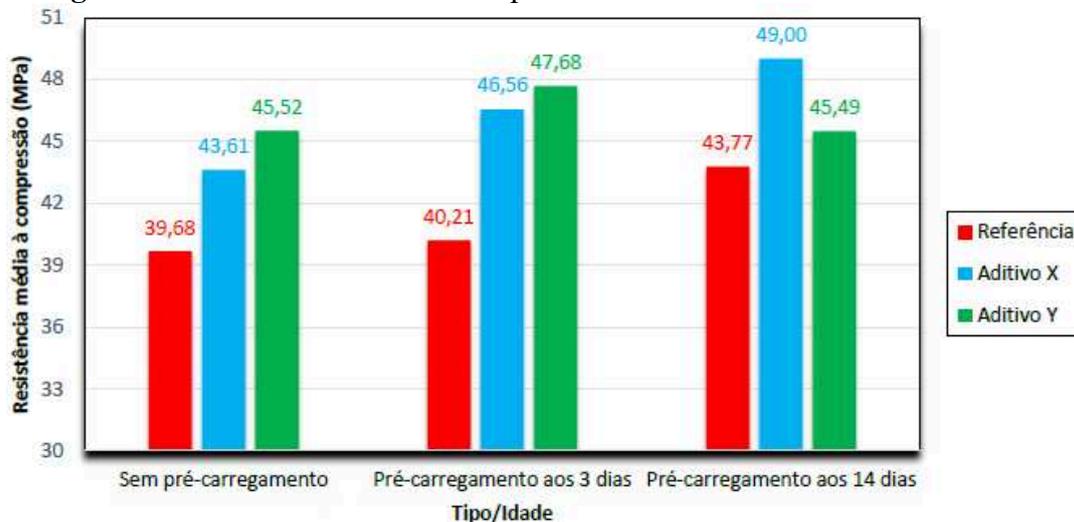
De acordo com os dados expostos nas Figuras 23 e 24, é possível verificar que o uso do aditivo cristalizante impactou diretamente e positivamente nas propriedades analisadas, pois os três traços contendo diferentes teores do aditivo apresentaram absorção de água e índice de vazios menores que o traço de referência, que não contém aditivo. Além disso, vale ressaltar que o concreto referência teve a absorção de água e o índice de vazios reduzidos mesmo com o pré-carregamento (CP - 7 dias), assim como o concreto do traço T-2,5. Esses resultados indicam a ação da autocicatrização, através do refinamento dos poros e selamento das fissuras.

Flores (2021) explica que para os outros dois traços que continham 1% e 4% de aditivo cristalizante, onde obteve-se um resultado levemente inferior nas amostras com pré-carga aos 7 dias, comparadas com as amostras sem pré-carga, não ocorreu a cicatrização das fissuras, e que tal comportamento pode ter se dado devido à insuficiência de cristais. Logo, percebe-se que para esses teores, a quantidade de aditivo não foi suficiente.

Tambara (2022) também analisa a eficácia da técnica da autocicatrização, porém utilizando dois diferentes aditivos cristalizantes em pó (X e Y), adquiridos em empresas nacionais e com dosagens seguindo as recomendações dos fabricantes: 0,8% para o aditivo X e 2,0% para o aditivo Y, ambos em relação à massa de cimento. Para os ensaios foram desenvolvidos três traços: T1 – Traço de referência (sem aditivo cristalizante); T2 – Traço com aditivo cristalizante X; T3 – Traço com aditivo cristalizante Y, sendo os três realizados com os mesmos procedimentos e equipamentos. Neste trabalho buscou-se analisar a resistência à compressão axial e a absorção de água por capilaridade.

Avaliou-se a resistência mecânica a partir do ensaio de compressão axial aos 28 dias, com a ruptura de três corpos de prova do concreto para cada tipo de carregamento, seguindo a NBR 5739 (ABNT, 2018) e obtendo-se os dados expostos na Figura 25.

Figura 25: Resistência média à compressão axial dos concretos com diferentes

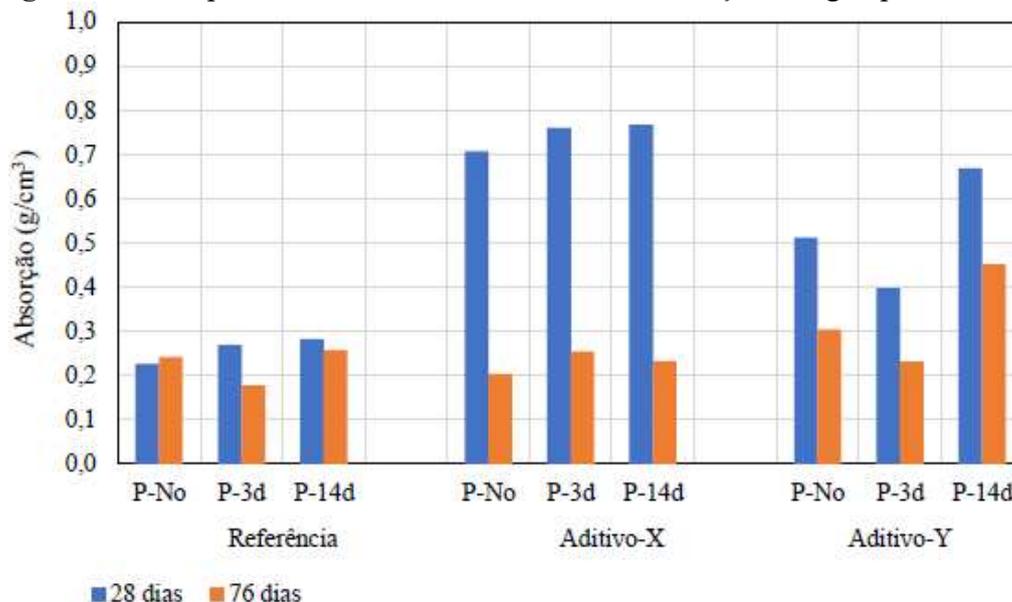


Fonte: Tambara (2022)

É possível identificar, a partir dos dados apresentados na figura acima, que houve um aumento na resistência dos corpos de prova com aditivos cristalizantes em comparação ao corpo de prova sem o uso do aditivo (traço de referência), independente da aplicação do carregamento nas primeiras idades. Esses resultados mostram que os aditivos cristalizantes X e Y atuaram positivamente no desenvolvimento da resistência mecânica dos concretos investigados através da minimização das microfissuras geradas nas primeiras idades.

Observou-se também que os traços com os dois aditivos cristalizantes sem pré-carregamento, com pré-carregamento aos 3 dias e com pré-carregamento aos 14 dias, promoveram um crescimento médio de resistência mecânica em relação ao concreto de referência (sem aditivo) que pode estar relacionado ao fechamento dos poros e vazios promovidos pela cristalização.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado nas idades de 28 e 76 dias, seguindo a NBR 9779 (ABNT, 2012). Na Figura 26 são apresentados os resultados médios obtidos no ensaio.

Figura 26: Comportamento dos concretos frente à absorção de água para as idades

Fonte: Tambara (2022)

A partir deste resultado é possível analisar que as maiores absorções foram para o traço com aditivo cristalizante X e Y, demonstrando total influência do aditivo, visto que estes podem ter alterado a associação dos poros capilares do concreto, já que quanto menores os diâmetros dos poros, maior será sua absorção de água. Além disso, percebe-se que o concreto com traço de referência não apresentou uma redução da absorção considerável dos 28 para os 76 dias, o que evidencia que a redução da absorção observada nos demais traços se dá principalmente ao efeito dos aditivos cristalizantes utilizados.

Desta forma, podemos analisar que a recuperação das propriedades mecânicas e permeabilidade, indicam uma maior autocicatrização com o uso do aditivo cristalizante, sendo que sua ação é melhor observada em fissuras jovens, com a cicatrização ocorrendo em longo prazo, havendo uma tendência de autocicatrização lenta.

4.2.3 Autocicatrização com adição de polímeros superabsorventes

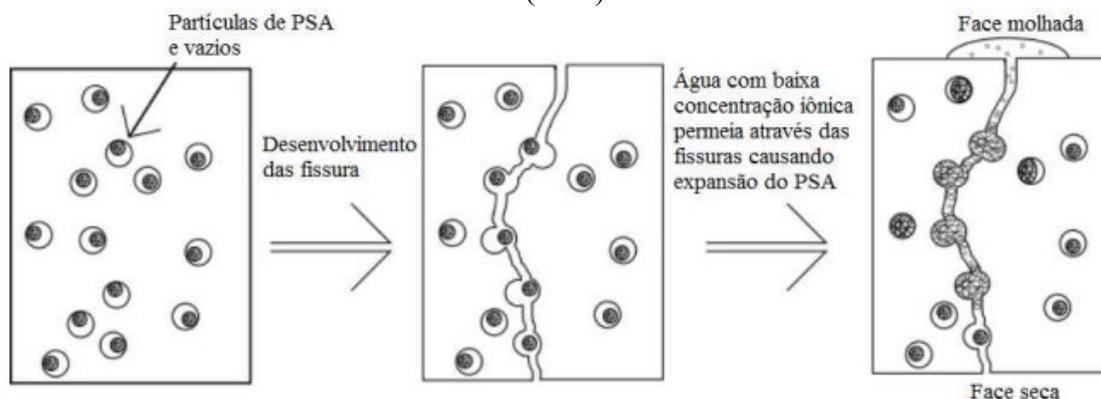
De acordo com Bianchin (2018), esse é um tipo de autocicatrização autônoma que utiliza polímeros superabsorventes (PSA), como aditivos, que possuem a habilidade de reter grande quantidade de líquido em sua estrutura, formando um hidrogel macio e insolúvel.

Os PSAs são compostos de uma rede tridimensional de cadeias poliméricas, que se interligam através de reticuladores, possuindo capacidade de absorver e reter água em até 1500 vezes que seu próprio peso. Ao entrarem em contato com a umidade externa proveniente do transporte através da fissura, esses polímeros aumentam de volume, podendo preencher toda a

extensão da fissura, sem exercerem tensões de tração durante esse processo (Tenório Filho, 2021).

O processo acontece de modo que, ao entrarem em contato com a água da mistura cimentícia, as partículas de PSA absorvem parte dessa água formando cavidades esféricas saturadas liberando essa água ao decorrer da hidratação do cimento. Quando a água é liberada, o PSA se contrai formando cavidades esféricas vazias provocando defeitos na pasta de cimento, que durante a vida útil da estrutura estão passíveis à propagação de fissuras através de tais cavidades. Logo, com o inchamento do PSA as fissuras podem ser preenchidas ou mesmo evitar-se novas infiltrações de água (Lee *et al.*, 2010). Na Figura 27 pode-se visualizar esse processo.

Figura 27: Processo de autocicatrização com a utilização de polímeros superabsorventes (PSA)



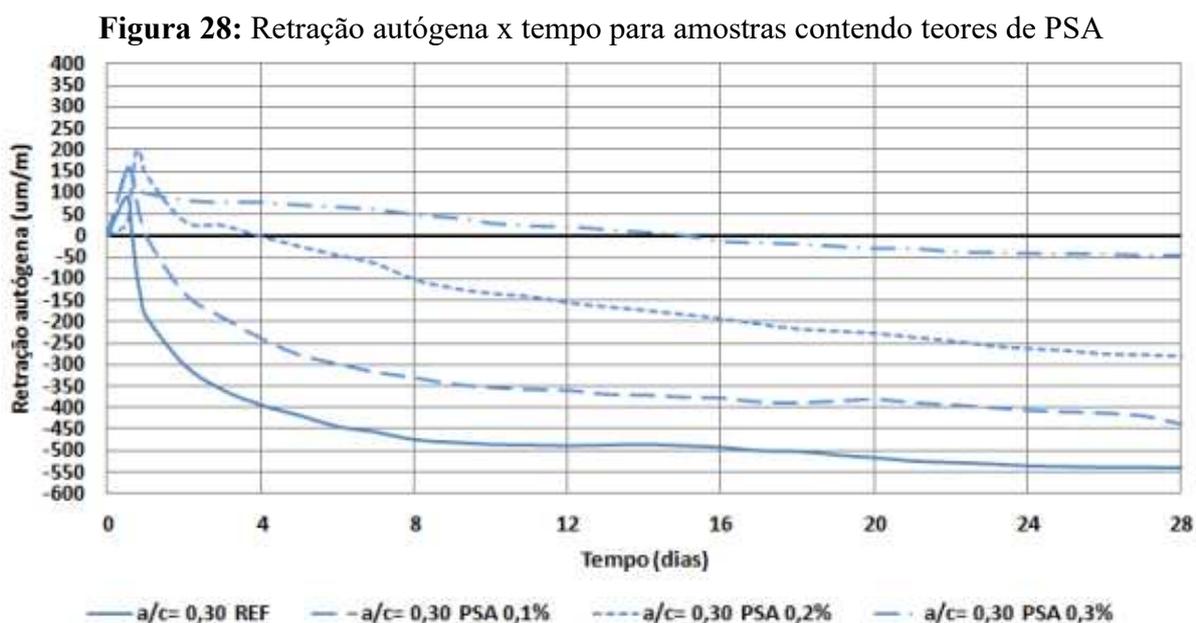
Fonte: LEE et al. (2010)

De acordo com algumas pesquisas realizadas, constatou-se que uma das características que mais influenciam no resultado da técnica é o tamanho das partículas do polímero superabsorvente que são utilizadas, pois a depender disso esses polímeros podem ter uma absorção de água de até 5.000 vezes o seu peso em meio aquoso. Já em soluções com sais diluídos, a capacidade de absorção é reduzida para entre 50 e 100 gramas de solução para cada grama de polímero (Santos, 2021). No que se refere aos tipos de polímeros superabsorventes que são mais usuais e conhecidos pode-se indicar os poliacrilatos e os poliacrilamidas copolimerizados.

Suarez (2015), para atingir os objetivos estabelecidos na sua pesquisa, fabricou oito microconcretos de alta resistência. O programa experimental consistiu em três misturas de referência com relações água/cimento diferentes, a saber; $a/c=0,30$, $a/c=0,35$ e $a/c=0,40$. Para a primeira mistura de referência foram fabricados três microconcretos adicionando teores de

PSA de 0,1%, 0,2% e 0,3% em relação à massa de cimento. Foram realizados ensaios nos estados fresco e endurecido, porém no presente trabalho foram abordados os resultados dos ensaios de retração e resistência à compressão, realizados no estado endurecido.

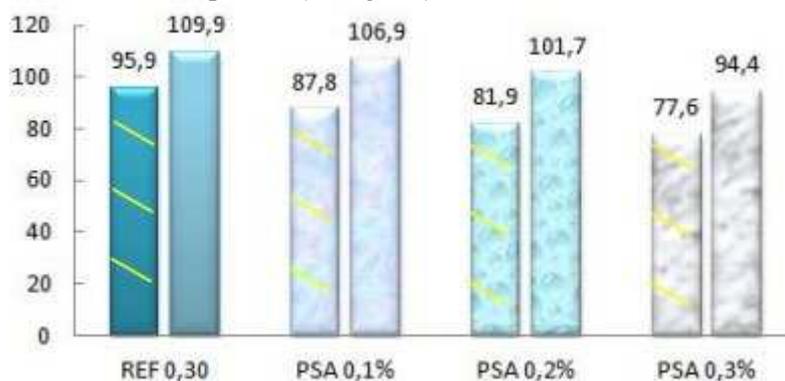
No ensaio de retração foi de fácil observação que todas as misturas contendo o PSA reduziram a retração autógena, sendo o teor de 0,3% mais eficiente, como mostrado na Figura 28. Ao comparar com os outros teores de PSA, para a idade de 7 dias, houve uma redução de 84%, enquanto para o teor de 0,2% de PSA e 0,1% de PSA a redução na retração autógena foi de 52% e de 13%, respectivamente, para essa idade.



Fonte: Suarez (2015)

No ensaio de resistência à compressão, obtiveram-se os resultados expostos na Figura 29, para 7 e 28 dias de idade. Realizou-se o ensaio nas duas idades, para uma melhor análise, já que segundo Klover (2012), o uso do PSA em algumas situações oferece uma resistência aos 28 dias de idade um pouco maior do que no concreto com cura interna.

Figura 29: Resistência à compressão em cubos (MPa) dos microconcretos com relação a/c= 0,30 para 7 (tracejado) e 28 dias de idade



Fonte: Suarez (2015)

De posse desses resultados, foi possível observar que nos microconcretos com adições de 0,1%, 0,2% e 0,3% de PSA foi observada uma redução na resistência à compressão tanto para os ensaios aos 7 dias, quanto para os com 28 dias e ainda para o maior teor de polímero foi observada uma redução maior na resistência do microconcreto. Nota-se também que tanto o microconcreto de referência como aqueles com adição de PSA apresentaram um crescimento na resistência à compressão média de 7 para 28 dias de idade, considerada satisfatória para o cimento usado na mistura (CP-V de alta resistência inicial).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do potencial de autocicatrização de fissuras em misturas cimentícias é um tema de grande relevância no campo da engenharia civil e da construção. Em resumo, neste trabalho, se fez possível analisar e explorar as principais técnicas da autocicatrização em materiais cimentícios avaliando os resultados da sua eficácia em mitigar os efeitos das fissuras. As conclusões revelam que a autocicatrização em misturas cimentícias é um fenômeno complexo, porém promissor.

Os principais pontos deste estudo incluem os mecanismos da autocicatrização, onde identificou-se os principais tipos de autocicatrização e como estes atuam, seja com a formação de produtos de hidratação adicionais, preenchimento de fissuras com partículas finas ou com a recristalização de cristais de cimento, concluindo também que esses processos, na maior parte das vezes, contribuem para a restauração parcial das propriedades mecânicas do material.

Além disso, demonstrou-se que vários fatores, como a composição da mistura cimentícia, a idade do material, o ambiente de cura e a severidade da fissura, influenciam a capacidade de autocicatrização, e que a eficácia da autocicatrização varia de acordo com a extensão e a largura das fissuras. Em fissuras estreitas e superficiais, a autocicatrização tende a ser mais eficaz, enquanto fissuras largas e profundas podem não ser completamente reparadas por esse mecanismo. Constatou-se que a autocicatrização em misturas cimentícias pode ser uma estratégia valiosa para aumentar a durabilidade e a vida útil de estruturas de concreto. Isso pode reduzir a necessidade de manutenção e reparos frequentes, economizando recursos e prolongando a vida útil das estruturas.

No entanto, é importante observar que a pesquisa sobre autocicatrização em misturas cimentícias ainda está em desenvolvimento, e há desafios a serem superados, como a otimização das formulações de agentes de cicatrização, a compatibilidade com diferentes tipos de materiais e ambientes, e a viabilidade econômica da implementação em larga escala. Com isso, é necessário continuar investigando e refinando as técnicas de autocicatrização para torná-las mais eficazes e aplicáveis em uma variedade de situações. Embora existam desafios a serem superados, as descobertas deste estudo fornecem uma base para futuras pesquisas e aplicações práticas que podem melhorar a durabilidade e a sustentabilidade das infraestruturas construídas com materiais cimentícios.

Portanto, este estudo contribui para o corpo de conhecimento sobre autocicatrização de fissuras, destacando a importância desse campo e incentivando futuras pesquisas e inovações que possam beneficiar nossa sociedade.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Vale destacar que a técnica da autocicatrização de fissuras é um tema onde existe um leque muito amplo de métodos e materiais a serem explorados, sendo necessário o preenchimento de várias lacunas associadas à área.

Com isso, sugere-se para trabalhos futuros no campo das técnicas de autocicatrização:

- A busca de trabalhos em base de patentes;
- A análise da eficiência das técnicas de autocicatrização em função da abertura das fissuras.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, M. A. S. *et al.* **Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais.** Revista Engenharia Civil, Uminho, n.44, p. 41-58, 2012.
- ANTOLINI, M. B. *et al.* **Retração total e penetração de cloretos em concretos compostos com cinza de lodo de ETA e outras adições minerais,** 2015.
- ARANDIGOYEN, M. *et al.* **Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity.** Applied Surface Science, v. 252, p. 1449-1459, 2005.
- ARAÚJO, F. A. S. *et al.* **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas em concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus com o uso de redutores de permeabilidade por cristalização.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11768: **Aditivos químicos para concreto de cimento portland.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- BIANCHIN, F. H. **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades.** Monografia (Especialização) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- COSTA, A.; RODRIGUES, F. **Desenvolvimento de concretos autocuráveis utilizando a bactéria Bacillus Megaterium.** Revista Científica UMC. UMC Universidade. [s.l.], 2018. ISSN 2525-5250.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão.** v. 1, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
- DE OLIVEIRA, C. D. **Estudo da penetração de cloretos em compósitos cimentícios produzidos com aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

DE ROOIJ, M. *et al.* **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, v. 11, 2013.

ELDRIDGE, H. J. **Common defects in buildings**. London, Crown, 1982.

EUZEBIO, L.; ALVES, T.; FERNANDES, V. **Bioconcreto. Estudo exploratório de concreto com introdução de *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, acetato de cálcio e ureia**. 2017. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

FELIX JÚNIOR, L. A. *et al.* **Governança pública nas cidades inteligentes: revisão teórica sobre seus principais elementos**. 2020. Revista do Serviço Público, Brasília, n.71, p. 119-153, 2020.

FERREIRA, C. R. A. **Análise de fissuras e trincas nas alvenarias de vedação: construção de casas em Minas Gerais**. 2016. Monografia (Curso de especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

FLORES, D. **Análise da autocicatrização de fissuras por indução em concretos produzidos com aditivos cristalizantes**. 2021. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul, Bento Gonçalves, 2021.

GAMBALE, P. G. *et al.* **Estudo do calor de hidratação do concreto massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras de retração**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, I. R.; PANDOLFELLI, V. C. **Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio**. *Cerâmica*, v. 53, p. 42-56, 2007.

GOMES, A. *et al.* **Cimento Portland e Adições**. Instituto Superior Técnico, 2013.

GHOSH, S. K. **Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications**. Weinheim WILEY-VCH. 2009.

GONZÁLEZ SUAREZ, M. L. **Polímeros superabsorventes (psa) como agente de cura interna para prevenir fissuração em concretos de alta resistência**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2015.

GRILLO, R. H. F. **Estudo da influência de aditivos redutores de água em concretos da construção civil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2014.

JONKERS, H. M.; SCHLANGEN, E. **Development of a bacteria-based self healing concrete**. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47535-8, 2008.

KOGA, D. S.; SANTOS, L. M. **Bioconcreto: autocicatrização do concreto pelo processo de biomineralização realizado por bactérias**. 2020. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2020.

LEE, H. X. D.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. **Materiais autovedantes à base de cimento utilizando polímeros superabsorventes**. In: Anais da Conferência Internacional RILEM sobre Uso de Polímeros Superabsorventes e Outros Novos Aditivos em Concreto, Lyngby, Dinamarca. 2010. pág. 15-18.

LIMA, M. S. **Estudo Comparativo sobre os tipos de autocicatrização do concreto**. 2021. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021.

LORDSLEEM JR., A. C. **Sistemas de recuperação de fissuras da alvenaria de vedação: avaliação da capacidade de deformação**. 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

MAGALHÃES, E. F. **Fissuras em Alvenarias: Configurações típicas e levantamento de incidências no estado do Rio Grande do Sul**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MELLO, V. M. **Potencial de autocicatrização de materiais cimentícios promovidos pela biomineralização de carbonato de cálcio por diferentes linhagens bacterianas em uma matriz com ar incorporado**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2022.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MELO NETO, A. A. D. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MILAGRES, E. A. **Retração e secagem do concreto: estudo da retração do concreto e o aparecimento de patologias**. 2019. Monografia (Especialização em Engenharia Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento portland: contribuição aos processos de autocicatrização**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2016.

OLIVEIRA, A. M. D. **Fissuras, trincas e rachaduras causadas por recalque diferencial de fundações**. 2012. 96f. Monografia (Especialização em Gestão em

Avaliações e Perícias) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

OLIVEIRA, A. S. **Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de autocicatrização de fissuras de matrizes cimentícias.** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

PERES, R. V.; CORREIA, S. N. A. **Patologia em Concreto Armado: Avaliação de corrosão, fissuras e manchas.** 2019. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 2019.

PORTAL DO CONCRETO. **Aditivos para concreto.**
Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/aditivo.html>>.
Acesso em: 07 fev. 2022.

RIBEIRO, C. C. **Materiais de construção civil.** Editora UFMG, 2002.

RUHLANDT, R. W. S. **The governance of smart cities: a systematic literature review.** *Cities*, v. 81, p. 1-23, 2018.

SAHB, C. A. S. **Contribuição ao estudo da interface estrutural alvenaria externa em edifícios verticais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. **Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica.** *Brazilian Journal of Physical Therapy*, v. 11, p. 83-89, 2007.

SANTOS, K. F. D. **Self-healing of high strength concrete by super absorbent polymers for autogenous shrinkage control.** 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2021.

SILVA, R. C. **Avaliação dos tempos de presa de misturas cimentícias por resistividade elétrica.** 2020. Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2020.

TAMBARA, R. F. **Autocicatrização de materiais cimentícios com aditivos cristalizantes.** 2022. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2022.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** 2.ed. London: Thomas Telford, 480p, 1997.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação.** Oficina de Textos, 2020.

TENÓRIO FILHO, J. R. **Polímeros superabsorventes inovadores para mitigação de fissuras em estruturas de concreto: do laboratório ao canteiro de obras.** 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Gante, 2021.

ZAKRZEWSKI, M. B. **Propriedades e autocicatrização do bioconcreto por meio da incorporação de bactérias do gênero *Bacillus subtilis* encapsuladas em argila expandida.** 2022. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira do Sul, Erechim, 2022.

ZIEGLER, F. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.