UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

MATEUS DOS SANTOS LIMA

ESTUDO COMPARATIVO SOBRE OS TIPOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO

Manaus, 2021

MATEUS DOS SANTOS LIMA

ESTUDO COMPARATIVO SOBRE OS TIPOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.ª Marivone Souza de Oliveira

Manaus, 2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo autor.

Lima, Mateus dos Santos
L732e Estudo comparativo sobre os tipos de autocicatrização do concreto / Mateus dos Santos Lima . 2021
57 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Marivone Souza de Oliveira
TCC de Graduação (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Autocicatrização. 2. Fissuras. 3. Durabilidade. 4. Concreto. I. Oliveira, Marivone Souza de. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

Ministério da Educação
Universidade Federal Do Amazonas
Departamento de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

MATEUS DOS SANTOS LIMA

ESTUDO COMPARATIVO SOBRE OS TIPOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 16 de novembro de 2021.

Banca examinadora:

Prof.ª Esp. Marivone Souza de Oliveira (Orientadora)

Prof. Dr. Wagner Queiroz Silva - UFAM (Membro)

Prof.ª Dr.ª Ellen Kellen Bellucio (Membro)

Documento assinado eletronicamente por **Marivone Souza de Oliveira**, **Professor do Magistério Superior**, em 01/12/2021, às 09:54, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Wagner Queiroz Silva**, **Professor do Magistério Superior**, em 01/12/2021, às 10:15, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Ellen Kellen Bellucio**, **Professor do Magistério Superior**, em 01/12/2021, às 11:09, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufam.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0780964** e o código CRC **C66F88C7**.

Av. Octávio Hamilton Botelho Mourão - Bairro Coroado 1 Campus Universitário Senador Arthur Virgílio Filho, Setor Norte - Telefone: (92) 3305-1181
CEP 69080-900, Manaus/AM, decft@ufam.edu.br

RESUMO

O concreto armado estrutural é um produto utilizado na construção civil, que apresenta resistência à compressão elevada, se comparado a outros produtos aplicados na construção. Em função disso, nesse trabalho são apresentados, estudos realizados objetivando-se o desenvolvimento de concretos estruturais mais duráveis, com maior resistência à compressão, dentre outros requisitos desejáveis. Também analisados os custos extras com manutenção do concreto, que, quando não previstos, podem chegar a valores que tornam a obra inviável financeiramente. Expõe-se que as manutenções dos edifícios, estão atreladas às fissuras que surgem oriundas de problemas nos processos de dosagem, aplicação e cura do concreto. Como forma de amenizar esses problemas de manutenções relacionados à fissuração, foram desenvolvidas tecnologias que auxiliam na autorregeneração dos concretos estruturais, e uma vez que este, possui propriedades cicatrizantes, chamadas de cicatrização autógena. Explica-se que este tipo de cicatrização ocorre devido às causas físicas, químicas e mecânicas que proporcionam o fechamento das aberturas sem que haja interferências do homem. Descreve-se também que para haver a melhoria no desempenho do concreto, no reparar das fissuras de forma acelerada, outros elementos podem ser introduzidos na mistura inicial do concreto, dando origem a chamada cicatrização autônoma. Este último, possui várias vertentes de pesquisa, onde é possível obter estudos que comprovam a eficiência de determinados métodos utilizados para auxiliar na autocura do concreto. Nesta pesquisa, três métodos de autocicatrização distintos foram apresentados e correlacionados, tendo como finalidade, mostrar as convergências e divergência entre eles, mostrando também, os benefícios e os malefícios de cada método. Os resultados oferecem algumas reflexões para estudos posteriores visando a obtenção de métodos mais acessíveis e econômicos, ou até mesmo, o aperfeiçoamento dos métodos existentes.

Palavras-chave: Autocicatrização; Fissuras; Durabilidade; Concreto.

ABSTRACT

Structural reinforced concrete is a product used in civil construction, which has high compressive strength compared to other products applied in construction. Due to this fact, it is presented in this paper studies carried out for the development of more durable structural concretes with greater compressive strength among other desirable requirements. It is also analyzed that the costs with maintenance of the concrete when not foreseen, can reach values that will possibly make the work financially impracticable. It is exposed that the maintenance of buildings is linked to cracks that arise from problems in the process of dosing, applying and curing concrete. As a way to soften the problems with maintenance related to cracks, technologies were developed that help in the self-regeneration of structural concrete since this material has healing properties called autogenous healing. It is explained that this type of healing occurs due to physical, chemical and mechanical causes that allow gaps to be closed without human interference. It is also described that in order to improve the performance of the concrete in cracks repairment more quickly, other elements were introduced into the initial concrete mix, giving rise to autonomous healing. This last one has several research streams from which it is possible to obtain studies that prove the efficiency of certain methods used to help the self-cure of the concrete. In this research three distinct self-healing methods were presented and correlated in order to show points of convergence and divergence between them, also showing the benifs and harms of each method. The results offer some reflections for further studies aiming to obtain a more accessible and economical method or even to improve existing methods.

Keywords: Self-healing; Cracks; Durability; Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Assentamento plástico do concreto impedido pela armadura 21
Figura 2: Retração da superfície causada pela rápida evaporação da água 21
Figura 3a, 3b, 3c: Movimentação das formas 22
Figura 4: Escoramento executado de forma deficiente 23
Figura 5: Fissuras devido a retração por secagem 24
Figura 6: Exemplo de flexão em viga ocasionando fissuração 24
Figura 7: Exemplo de cisalhamento em viga ocasionando fissuração 25
Figura 8: Exemplo de fissuras devido à flexão em lajes 25
Figura 9: Detalhes construtivos de uma laje em balanço 26
Figura 10: Fatores que podem levar a autocicatrização autógena no concreto 29
Figura 11: Cicatrização autônoma com uso de cápsula e sistema vasculares 30
Figura 12: Testes de compressão no concreto autocicatrizante a fim de criar fissuras 34
Figura 13: Esquema de autocura através da formação de calcário. 35
Figura 14: Andamento do processo de fechamento das fissuras 35
Figura 15: Imagens do antes e depois da superfície de um concreto autocicatrizante. 37
Figura 16: Fissuras encontras na edificação variando entre 0,15 e 0,4 mm 40
Figura 17: Autocicatrização de fissuras presentes nos primeiros dias de acompanhamento e 4 meses após o início do acompanhamento 41
Figura 18: Presença de autocicatrização em uma fissura de ECC 43
Figura 19: Eficiência de diferentes agentes biológicos utilizados no bioconcreto 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes de agressividade ambiental (CAA) 16
Tabela 2: Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto 16
Tabela 3: Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal Δc =10 mm 17
Tabela 4: Níveis de abertura no concreto (degradação) 18
Tabela 5: Resultado de diferentes tipos e concentrações de bactérias na resistência mecânica 36
Tabela 6: Análise de fechamento de fissuras com aditivos cristalizantes 41
Tabela 7: Relações entre os tipos de concreto, aditivos cristalinos, fissuração e cura 47
Tabela 8: Correlação entre o bioconcreto e o concreto com aditivos cristalizantes 49
Tabela 9: Correlação entre o bioconcreto e o concreto com materiais pozolânicos 50
Tabela 10: Correlação entre o concreto com materiais pozolânicos e o concreto com aditivos cristalizantes 51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAC: Concreto autocicatrizante

C-A-S-H: silicoaluminatos de cálcio hidratados

C-S-H: Silicatos de Cálcio Hidratados

ECC: Engineered Cimentitious Composites

SHC 221: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Material

NBR: Norma Brasileira

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11
1.1 Considerações Iniciais 11
1.2 Objetivos 13
2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DURABILIDADE DO CONCRETO 15
2.1 Manifestação de Fissuras no Concreto 18
2.2 Surgimento de fissuras nos concretos 19
2.2.1 Assentamento plástico do concreto fresco 20
2.2.2 Retração da superfície pela rápida evaporação de água no lançamento do concreto . 21
2.2.3 Movimentação das fôrmas durante o lançamento do concreto 22
2.2.4 Escoramentos executados de forma deficiente 23
2.2.5 Retração por secagem no concreto endurecido 23
2.2.6 Surgimento de fissuras oriundas de detalhes construtivos 25
3. AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO 27
3.1 Cicatrização Autógena 28
3.2 Cicatrização Autonoma 30
4. CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES 33
4.1 Bioconcreto - o concreto que se autorregenera 33
4.1.1 Resistência à compressão 36
4.1.2 Comportamento do bioconcreto a curto e longo prazo 37
4.1.3 Inconsistências possíveis no uso do bioconcreto 38
4.2 Autocicatrização do concreto com adição de cristalizantes 38
4.2.1 Resultados obtidos com o uso de aditivos cristalizantes 39
4.3 Autocicatrização utilizando materiais pozolânicos 42
5. EFICIÊNCIA DOS MÉTODOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO 45
5.1 Eficiência do Bioconcreto 45
5.2 Eficiência dos concretos com aditivos cristalizantes 46
6. CORRELAÇÕES ENTRE OS TIPOS DE CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES 49
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS 53
8. REFERÊNCIAS 55

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O concreto estrutural é um dos materiais mais utilizados na construção civil devido a sua alta resistência à compressão e a facilidade ao acesso dos seus componentes de base. Uma das adversidades que o concreto encontra é a sensibilidade à formação de fissuras como consequência de sua limitada resistência à tração. Por esta razão, o concreto é comumente combinado com armaduras de aço que suportam bens os esforços solicitantes de tração. Embora as armaduras consigam restringir a largura das fissuras, elas não previnem completamente a formação destas, de acordo com De Belie (2013).

Ao se fazer referência a estruturas de concreto, espera-se que estas, apresentem a durabilidade compatível com o investimento realizado, e também com as demais características e propriedades, sendo importante que as estruturas sejam capazes de suportar as condições para as quais foram projetadas durante sua vida útil, de acordo com Medeiros *at al*, (2011). Devido ao aumento das obras com problemas relacionados às fissuras que surgem com o tempo, segundo Silva (2007), também cresce o interesse em encontrar soluções para que possam estender a durabilidade do concreto, tendo em vista que a presença destas aberturas facilita a entrada de agentes nocivos para a estrutura.

Para Tittelboom (2013), as fissuras põem em risco a durabilidade de estruturas de concreto devido a penetração de líquidos e gases através destas causando danos. Consequentemente, as fissuras podem aumentar e as armaduras tornam-se expostas ao ambiente. Uma vez que as armaduras começam a sofrer corrosão, o colapso total da estrutura pode vir a acontecer. Portanto, parece óbvio que a inspeção, manutenção e reparo das fissuras no concreto são indispensáveis.

O reparo das fissuras no concreto pode se tornar difícil quando as mesmas não são visíveis ou acessíveis. Em determinados países, conforme Cailleux (2019), os custos relacionados à manutenção de estruturas de concreto chegam a ser metade do custo anual investido em construção. Adicionados aos custos diretos, custos indiretos relacionados a perda de produtividade e a ocorrência de imprevistos acarretam uma penalidade econômica severa. Logo, a autocicatrização do concreto é altamente benéfica no ponto de vista econômico.

De acordo com De Belie (2013), a autocicatrização do concreto é na verdade um fenômeno antigo levando em consideração que o concreto em si apresenta propriedades autocicatrizantes. Devido a hidratação dos minerais de clínquer e a carbonatação do hidróxido

de cálcio (Ca(OH)2), fissuras podem curar dentro de algum tempo. Porém essa propriedade autocicatrizante, já presente no concreto, se limita à pequenas espessuras que variam de 0,1 mm à 0,2 mm, quando há água disponível

A autocura do concreto tem sido um tópico que vem chamando bastante atenção de vários pesquisadores por ser algo em potencial. Autocura, autocicatrização, auto selagem são termos que vêm sido utilizados como sinônimos, porém autocicatrização é o mais comum entre todos Ter Heide (2005).

A propriedade do concreto de se auto recuperar de danos e degradações sofridas ao longo do tempo, colabora para o aumento de sua vida útil, de acordo com Tang e Kardani (2015) e, consequentemente, é uma solução positiva para que haja redução de custos com a manutenção e reparos de estruturas de concreto, Wang *et al* (2014).

A autocicatrização do concreto envolve todos os fenômenos de selagem das fissuras, desde que não ocorra intervenção humana para tal. O termo “recuperação”, é considerado um evento geral a partir de qualquer fenômeno de cura do concreto, para o Japan Concrete Institute (2009).

Na concepção de Ghosh (2009), as estruturas que possuem algum artifício de autocura, podem ser classificadas como ativas ou passivas dependendo da capacidade de cura de cada. Uma estrutura denominada passiva possui a capacidade de reagir com o meio sem intervenção humana, com o objetivo de realizar o processo de autocicatrização enquanto uma estrutura ativa requer uma intervenção humana para que possa ser realizada.

Os autocicatrizantes são materiais no meio de estruturas de concreto, uma vez que funcionam como mecanismo de cura que são liberados quando ocorre alguma fissura na estrutura, fazendo com que a vida útil desta se prolongue, segundo Schlangen e Joseph (2009). Estudos estão sendo realizados com diferentes métodos a fim de se detectar um de maior viabilidade, e que demonstre resultados mais positivos na relação custo/benefício. No entanto, os autocicatrizantes demandam um conhecimento prévio sobre a causa de cada fissuração na qual estão suscetíveis.

Neste estudo comparativo sobre os concretos autocicatrizantes serão apresentados três tipos de concreto sendo eles o bioconcreto, o concreto com aditivos cristalizantes e o concreto com adição de materiais pozolânicos. Será realizada a análise sobre a eficiência dos concretos autocicatrizantes. Finalmente serão analisadas convergência e divergências dos métodos estudados.

1.2 Objetivos

Objetivo Geral

- Comparar os métodos mais empregados para a autocicatrização dos concretos.

Objetivos Específicos

- Analisar os métodos mais aplicados para a autocicatrização dos concretos;
- Examinar a eficiência dos métodos de autocicatrização;
- Correlacionar os tipos de concreto autocicatrizantes.

2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DURABILIDADE DO CONCRETO

Segundo Figueiredo (2018), a durabilidade das estruturas de concreto depende de diferentes fatores ligados à fase de projeto, produção e caracterização dos insumos, preparação do concreto, execução da estrutura e manutenções preventiva e corretiva. Essa propriedade do concreto, também sofre ações do meio ambiente. O nível de agressividade na região onde a edificação será construída determinará as características do concreto e da estrutura, tais como a relação água e cimento, a espessura do cobrimento da armadura, a resistência à compressão do concreto e a abertura máxima de fissuras. Por exemplo, uma estrutura localizada em uma área rural experimentará menor risco de degradação, porém caso essa mesma estrutura esteja em área litorânea, o nível de degradação será mais elevado, visto que a estrutura estará exposta ao fenômeno da maresia.

Quanto aos procedimentos relativos à durabilidade das estruturas de concreto, deve-se nortear pelas diretrizes estabelecidas pela Norma Brasileira NBR 6118:2014 Estruturas de concreto armado - Procedimento. No que tange à durabilidade de estruturas de concreto armado, a conformidade do projeto está relacionada aos parâmetros considerados.

Em relação à qualidade do concreto de cobrimento, a NBR 6118 estabelece uma relação entre o ambiente de exposição do concreto e a sua qualidade, conforme apresentado na Tabela 1, na qual é possível observar a classe de agressividade, a classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto e o provável risco de deterioração da estrutura, se atendidas as diretrizes desta norma.

Tabela 1: Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana [a, b]	Pequeno
III	Forte	Marinha [a] Industrial [a, b]	Grande
IV	Muito forte	Industrial [a, c] Respingos de maré	Elevado

a. Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambiente internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

b. Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes de estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

c. Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

A relação máxima do fator água/ cimento e a classe de resistência do concreto são observadas na Tabela 2. Também é possível verificar outras correspondências, conforme descrito no corpo da tabela. Além disso, a classe do concreto também pode ser selecionada variando de C20 à C40 para concreto do tipo armando, e de C25 à C40 para concreto protendido.

Tabela 2: Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto [a]	Tipo [b, c]	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

a. O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

b. CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

c. CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

De forma análoga, deve-se determinar o cobrimento mínimo nominal conforme observado na Tabela 3, devendo este parâmetro ser estabelecido como critério de aceitação da construção. Para garantir o cobrimento mínimo, o projeto deve considerar o cobrimento nominal, que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução.

Tabela 3: Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal para Δc = 10 mm

Tipo de estrutura	**Componente ou elemento**	**Classe de agressividade ambiental (Tabela 1)**			
		I	**II**	**III**	**IV [c]**
		Cobrimento Nominal (mm)			
Concreto armado	Laje [b]	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo [d]	30		40	50
Concreto protendido [a]	Laje	25	30	40	50
	Viga/ pilar	30	35	45	55

a. Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

b. Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas 7.4 7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

c. Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, caneletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

d. No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

Onde: Δc é a tolerância de execução para o cobrimento.

Segundo a NBR 6118, para estruturas em execução, o valor de Δc deve ser igual ou superior a 10 mm, e, caso haja a exigência de controle qualitativo mais rigoroso, com limites rígidos de tolerância da variabilidade das medidas no processo executivo, permite-se o cobrimento nominal mínimo 5 mm, entretanto, essa exigência deve ser indicada claramente nas plantas e outros documentos do projeto. Da mesma forma, nos concretos de resistência superior ao mínimo exigido, os cobrimentos definidos na Tabela 3, também podem ser reduzidos em até 5 mm.

2.1 Manifestação de Fissuras no Concreto

De acordo com a NBR 9573 Vermicula expandida — Temperaturas inicial e final de amolecimento — Método de Ensaio, pode-se classificar as aberturas no concreto, como observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Níveis de abertura no concreto (degradação)

NÍVEL DE ABERTURA NO CONCRETO	ESPESSURA (mm)
Microfissura	≤ 0,05
Fissura	0,06 à 0,5
Trinca	0,6 à 1,0

Fonte: NBR 9573 (2012)

De acordo com Noal (2016), as fissuras podem ser categorizadas como:

a) Ativas**:** Essas são caracterizadas pela variação nas aberturas de acordo com a variação das tensões aplicadas, podendo também ser classificadas em ativas progressivas (quando a abertura tem uma tendência a aumentar seu tamanho) e ativas estacionárias (quando possuem a tendência de permanecer do mesmo tamanho).
b) Passivas: São aquelas que são provocadas por outros processos que não seja o excesso de esforços, geralmente não são muito preocupantes.

No entendimento de Noal (2016), o tratamento de fissuras engloba várias fases e difere uma das outras de acordo com a sua causa e classificação. Um tratamento comum para fissuras mapeadas é a aplicação de tintas e selantes flexíveis, capazes de absorver a abertura causada pelas tensões na parede. Já em casos onde a fissura é motivada por movimentos estruturais, o tratamento acaba se tornando mais complexo. Neste caso, a correção passa por diversas etapas e necessitam de estudos detalhados. Como exemplo de solução, é realizado o aumento proposital da trinca com um disco de corte, limpeza, preenchimento com selante e aplicação de impermeabilizante em uma faixa de 20 a 30 cm, tendo a fissura como o centro. Por fim é verificado se há a necessidade de acrescentar uma tela de poliéster também de 20 a 30 cm sobre o impermeabilizante.

Noal (2016) ainda comenta que o tratamento completo pode perdurar dias ou até semanas, de acordo com o tempo de secagem e cura dos produtos aplicados. É importante citar que a causa deve ser tratada antes da correção de certas fissuras, por exemplo, é bastante comum, o

reparo abrir-se novamente por não terem sido sanadas as movimentações das fundações. Quando essas degradações ocorrem, parte dessas, são devido a causas estruturais e sua ocorrência pode sinalizar que um pilar ou viga está na iminência de ruptura. Caso essas manifestações patológicas primárias sejam negligenciadas, isso pode resultar futuramente em patologias secundárias, tais como fissuração ou trincamento de revestimentos intermediários e de acabamento, podendo avançar para patologias terciárias como o desplacamento de peças cerâmicas, ocasionando riscos de acidentes físicos aos usuários.

Segundo Nakamura (2021), a fissuração em estruturas de concreto armado e em alvenarias pode ser motivada por fatores diversos. Durante a fase de concretagem podem ocorrer fissuras por retração, fenômeno que se caracteriza por aberturas lineares com direções variadas e que ocorre por conta da redução de volume causada pela diminuição de umidade do concreto. Na teoria, quanto maior o consumo de cimento adicionado à mistura, o fenômeno de retração também tenderá a ser superior.

De acordo com Martins (2021), as fissuras decorrentes de sobrecargas costumam ser as mais graves, exigindo um reparo urgente. Isso porque indicam que o elemento estrutural é incapaz de suportar os esforços de compressão e podem levar ao colapso das estruturas. Esse tipo de problema pode ser resultado de falha de projeto ou de execução, bem como da mudança no uso da edificação ao longo de sua vida útil. Fissuras por excesso de cargas podem ser motivadas, ainda, por mau uso da estrutura durante as obras, por exemplo, quando se depositam pilhas de materiais e entulho sobre lajes que não foram projetadas para suportar tais esforços.

2.2 Surgimento de fissuras nos concretos

O surgimento de fissuras pode ocorrer devido ao assentamento e retração plástica, retração por secagem, assentamento dos apoios, deficiências estruturais, agregados reativos, corrosão de armaduras, restrições a alongamentos e encurtamentos térmicos e ataques de cloretos e sulfatos, conforme o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT (2010). Alguns fatores podem contribuir para o aparecimento de fissuras no concreto em estado fresco e no estado endurecido. A seguir, serão apresentados alguns fatores e causas que podem ocasionar essas degradações.

2.2.1 Assentamento plástico do concreto fresco

O assentamento plástico do concreto está ligado a acomodação dos agregados sólidos devido à ação da gravidade, no momento do lançamento do concreto, causando o processo de sedimentação, e esta, pode provocar fissuras nos momentos iniciais após o lançamento, devido à presença de obstáculos tais como as armaduras ou mesmo grãos de agregados maiores, que possam dificultar a movimentação homogênea da mistura. De acordo com o Comitê Euro-Internacional Du Béton (CEB) (1990), as fissuras devido ao assentamento plástico podem ser evitadas pela correta composição do concreto e condições que eliminem a rápida evaporação da água após a execução dos elementos estruturais.

I. Causas que podem levar ao assentamento plástico do concreto:

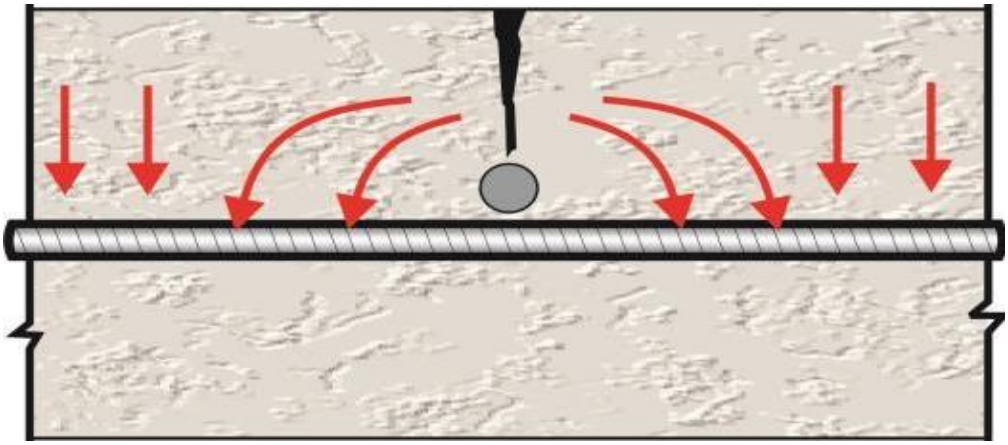
- Vibração prolongada;
- Excesso de água no amassamento;
- Falta de estanqueidade das formas;
- Barras com grandes bitolas;
- Cobrimento pequeno das armaduras;
- Malhas densas (armadura).

II. Tempo estimado para o surgimento das fissuras: de 10 minutos a 3 horas.

Observando o elenco das possíveis causas para o assentamento plástico e o tempo estimado para o aparecimento das fissuras, admite-se a possibilidade que a associação de duas ou mais causas, potencializem o processo do assentamento plástico no concreto fresco, possibilitando assim o surgimento das fissuras, inclusive durante a cura do concreto.

Na Figura 1, é possível observar como ocorre o exemplo do surgimento de fissuras após o assentamento plástico do concreto que é impedido pela armadura após o seu lançamento.

Figura 1: Assentamento plástico do concreto impedido pela armadura

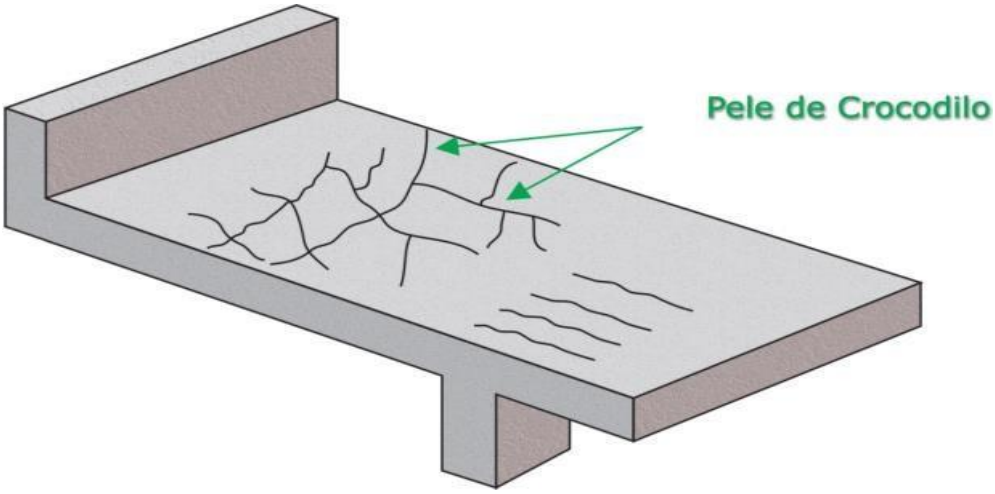


Fonte: Meneghett (2016)

2.2.2 Retração da superfície pela rápida evaporação de água no lançamento do concreto

A falta ou a perda de água no concreto, temperatura do meio elevada e uma ineficiente proteção térmica geram tensões internas, provocando retração no concreto que resulta em esforços de tração gerando as fissuras, segundo Helene (1992). Este tipo de fissura acontece pelo processo de cura mal executado. O concreto não resiste a esses esforços, e consequentemente apresenta fissuras como é observado na Figura 2. As espessuras típicas de fissuração então entre 2 a 3 mm e surgem em um intervalo entre 30 minutos a 6 horas após o lançamento do concreto.

Figura 2: Retração da superfície causada pela rápida evaporação da água



Fonte: Meneghett (2016)

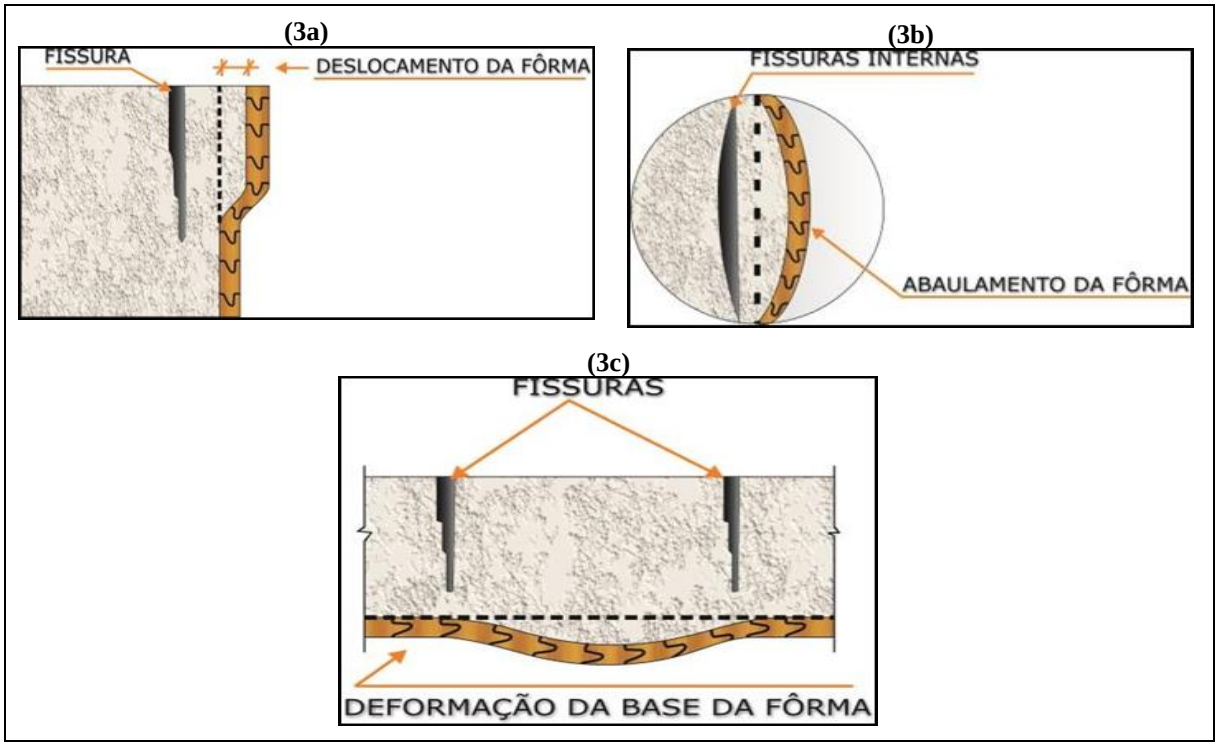
2.2.3 Movimentação das fôrmas durante o lançamento do concreto

Nas Figuras 3a, 3b e 3c, ilustram-se algumas deformações em fôrmas, mostrando a formação de fissuras no concreto devido a movimentação dessas. Essa movimentação pode ocorrer por algumas causas como:

- Sobrecargas devido à avaliação incorreta das cargas atuantes;
- Falha na interpretação dos projetos;
- Execução imperfeita;
- Lançamento do concreto;
- Velocidade de colocação da mistura;
- Volume elevado de concreto acumulado na superfície.

É notório que a movimentação das fôrmas, pode acarretar uma série de problemas no estado final da peça estrutural, entre eles, o surgimento de fissuras, indicando dessa forma, a necessidade de atenção redobrada do sistema de fôrmas no período da concretagem, e a rápida correção do procedimento de lançamento do concreto, ou mesmo a correção das fôrmas para a continuidade da execução da concretagem.

Figuras 3a, 3b e 3c: Exemplos de movimentação das fôrmas



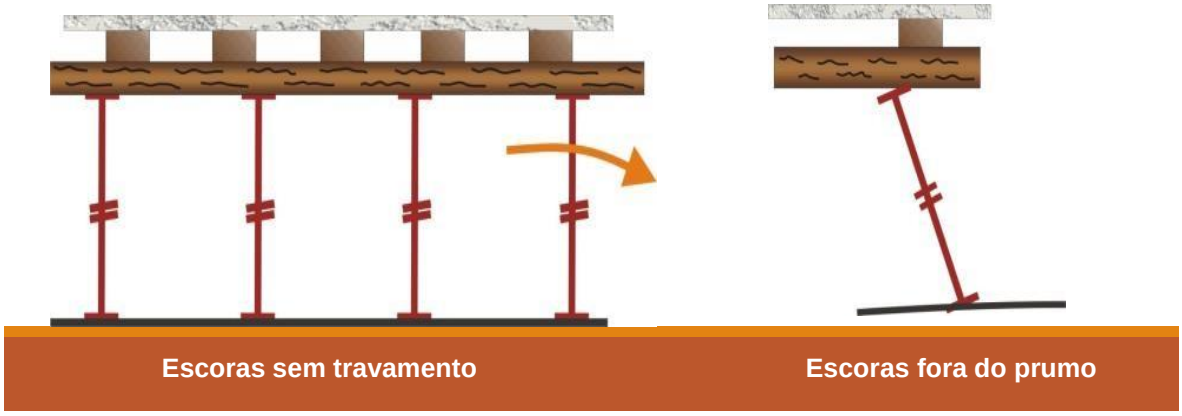
Fonte: Meneghett (2016)

2.2.4 Escoramentos executados de forma deficiente

As fissuras também podem ocorrer através de alguns detalhes construtivos que foram executados de maneira incorreta, como pode ser observado na Figura 4. No caso dos escoramentos quando há a movimentação, as fôrmas e o concreto também podem se mover ocasionando o surgimento de fissuras. Essa movimentação pode ocorrer por meio das causas:

- Deslocamento de alguma escora por impacto
- Falta de travamento
- Deslocamento das escoras por vibração excessiva
- Escoras fora de prumo
- Escoras muito esbeltas
- Apoio inadequado das escoras

Figura 4: Escoramento executado de forma deficiente



Fonte: Meneghett (2016)

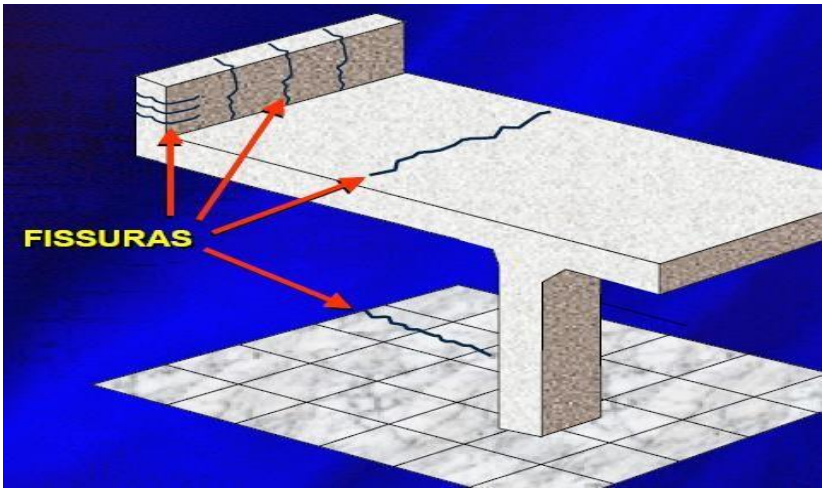
2.2.5 Retração por secagem no concreto endurecido

A retração do concreto no estado endurecido, ocorre pela instabilidade da peça quando exposta à umidade do ambiente que se apresenta abaixo da sua saturação, Furnas (1997), conforme observado na Figura 5. Essa retração pode ocorrer com maior ou menor intensidade, dependendo de onde se dê a perda de água. Nesse sentido algumas causas podem estar relacionadas, tais como:

- Grandes áreas sem contato com o ambiente;
- Variação da umidade do ar;
- Cura inadequada;

- Ações do vento;
- Variação térmica;
- Temperatura ambiente.

Figura 5: Fissuras devido a retração por secagem



Fonte: Meneghett (2016)

Nas Figuras 6 e 7, é possível observar como as fissuras podem ocorrer nas vigas que forem solicitadas pelos carregamentos. Quando houver a sobrecarga, o surgimento das fissuras ocorre primeiramente na região onde as solicitações forem mais elevadas.

Figura 6: Exemplo de flexão em viga ocasionando fissuração

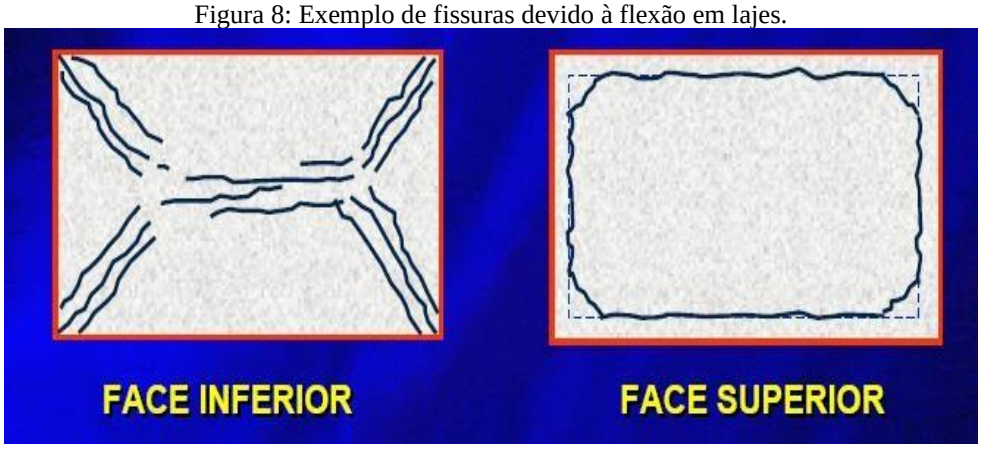
Fonte: Meneghett (2016)

Figura 7: Exemplo de cisalhamento em viga ocasionando fissuração

Fonte: Meneghett (2016)

Na Figura 8, pode-se observar num trecho de laje, que, quando estas são solicitadas além da capacidade prevista no dimensionamento estrutural, dentre outras consequências, fissuras também poderão abrir-se no plano da laje, e agravar com o tempo.

Figura 8: Exemplo de fissuras devido à flexão em lajes.

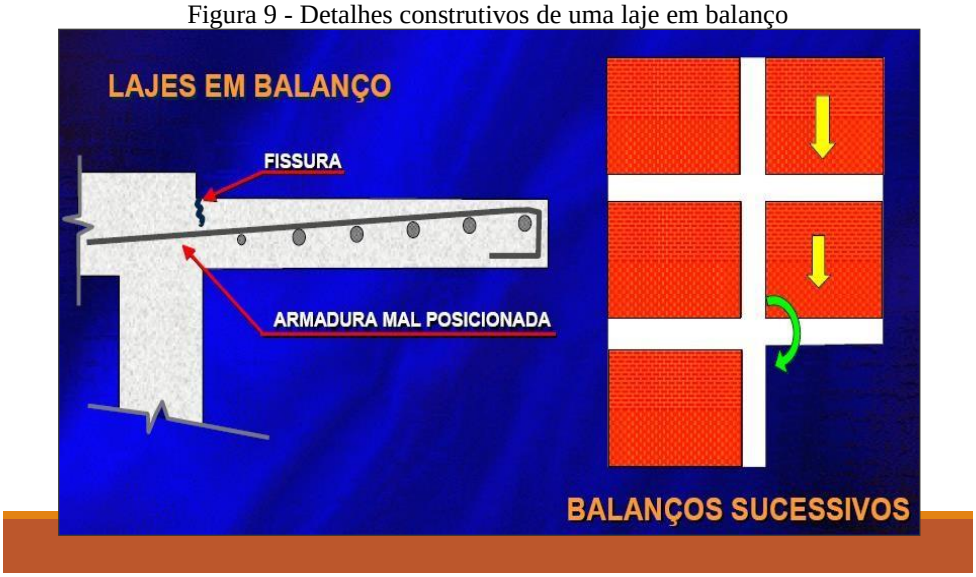


Fonte: Meneghett (2016)

2.2.6 Surgimento de fissuras oriundas de detalhes construtivos

Fissuras também podem se formar durante o processo de execução de determinado elemento estrutural não produzido de forma adequada. Em várias ocasiões, a utilização da mão de obra não qualificada para tal fim, traz como consequência a execução deficiente da concretagem. A Figura 9, mostra um exemplo de detalhe construtivo como uma das causas para o surgimento de fissuras.

Figura 9 - Detalhes construtivos de uma laje em balanço



Fonte: Meneghett (2016)

3. AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO

A autocicatrização é um fenômeno natural do fechamento de microfissuras com base na ocorrência de reações químicas e o envolvimento de água. Van Tittelboom (2013) cita o exemplo de quando uma pessoa sofre um pequeno corte, graças a diversos fatores do corpo humano, ao longo do tempo esse corte irá cicatrizar. O mesmo acontece com o concreto, porém, no lugar do corte, teremos uma fissura.

Mesmo sido constatado pela primeira vez há bastante tempo, os estudos sobre a autocicatrização voltados à prevenção dos danos e aumento da durabilidade do concreto são relativamente recentes. Reinhardt *et al.*, (2013), em revisão bibliográfica bastante completa sobre o tema, listam uma série de publicações do século passado que já documentavam indícios do fenômeno. Muitos desses trabalhos inclusive, tratam de forma ampla e satisfatória dos fatores que influenciam a autocicatrização, tais como condições ambientais, exposição à umidade, tipo de cimento, idade do concreto e o tamanho das fissuras.

Segundo Schlangen (2013) os edifícios centenários sobreviveram a esses séculos por causa da capacidade inerente de autocura dos ligantes usados para cimentar blocos de construção. Essa capacidade de autocura nunca havia sido denominada.

Em 2005, iniciaram-se os estudos do Comitê Técnico para Fenômenos de Autocura, em materiais à base de cimento SHC 221, na União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas e Estruturas de Construção (RILEM), para pesquisar uma solução capaz de reparar trincas e fissuras estáticas com até 0,4 mm, no concreto estrutural de edificações. No Brasil, contudo, o chamado concreto autocicatrizante (CAC) só passou a ser desenvolvido no ano de 2011 pelo Departamento de Materiais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

A RILEM (2013) descreve a autocicatrização como qualquer processo que envolve a recuperação do próprio material e gera aperfeiçoamento no desempenho desse, que havia sido prejudicado por algum agente nocivo ou sofrido degradações. Existem diferentes mecanismos e abordagens que originam a propriedade de autocicatrização em materiais cimentícios.

A autocicatrização está dividida em dois tipos: cicatrização autônoma e cicatrização autógena. A cicatrização autônoma ocorre devido a materiais que não estariam presentes no concreto caso não fossem adicionados na fase inicial da mistura do concreto. Enquanto a autógena, tem foco principal na matéria, sendo aquela que ocorre devido fatores presentes no próprio concreto, RILEM (2013).

A autocicatrização autógena ou intrínseca, ocorre devido diferentes fatores. Como principais, dois dos fatores foram selecionados: a hidratação contínua das partículas não

hidratadas de cimento e a precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), devido a presença de dióxido de carbono, De Belie *et al*., (2018). Destaca-se que em elemento de base cimentícia já fissurado, quando um material precisa ser substituído ou algum composto adicionado a partir de uma interferência externa, configura-se um procedimento de reparo e não é considerado autocicatrização, RILEM (2013).

3.1 Cicatrização Autógena

A cicatrização autógena é um processo natural de preenchimento e selagem de fissuras, sem quaisquer ações externas, sendo uma das razões pela qual tantos edifícios e estruturas antigas sobreviveram por tanto tempo com assistência técnica e manutenção limitada. Existem termos diferentes em uso para esse fenômeno, sendo o termo autocicatrização o mais comum, porém, autocura ou cicatrização autógena também são usados. O termo "autógena" enfatiza que a cura do concreto ocorre sem qualquer interferência externa.

De acordo com Basso (2021), mesmo a autocicatrização autógena sendo um fenômeno natural presente no concreto, existem diversos estudos que buscam "estimular" a ocorrência de tal efeito, pois o mesmo ocorre de maneira lenta. Para isto, existem diversas adições que vêm sendo estudadas.

Segundo Takagi (2013), as primeiras pesquisas com propriedades autocicatrizantes do concreto começaram em 1994. Porém, foi a partir da criação do comitê técnico SHC 221 da RILEM, em 2005, que diferentes abordagens têm sido desenvolvidas para o estudo de um novo tipo de concreto que possua a capacidade de reparar suas próprias fissuras. Dentre estas abordagens, a cicatrização autógena se baseia em melhorar o mecanismo de colmatação natural do concreto.

A autocicatrização autógena pode ocorrer devido à diferentes fatores como:

I. Causas físicas

Ocorre quando a água é absorvida pela pasta de cimento hidratado e atinge o espaço entre os constituintes da pasta cimentícia. Quando há o efeito de inchaço, verifica-se que o início ocorre nas bordas da fissura. No momento em que as superfícies da fissura se tornam mais grossas em função da saturação de água, ocorre o fechamento de pequenas fissuras ou ocorre o estímulo de outras causas para a autocicatrização de fissuras maiores, podendo haver a possibilidade do aumento da fissura após a secagem do concreto, RILEM (2013).

II. Causas químicas

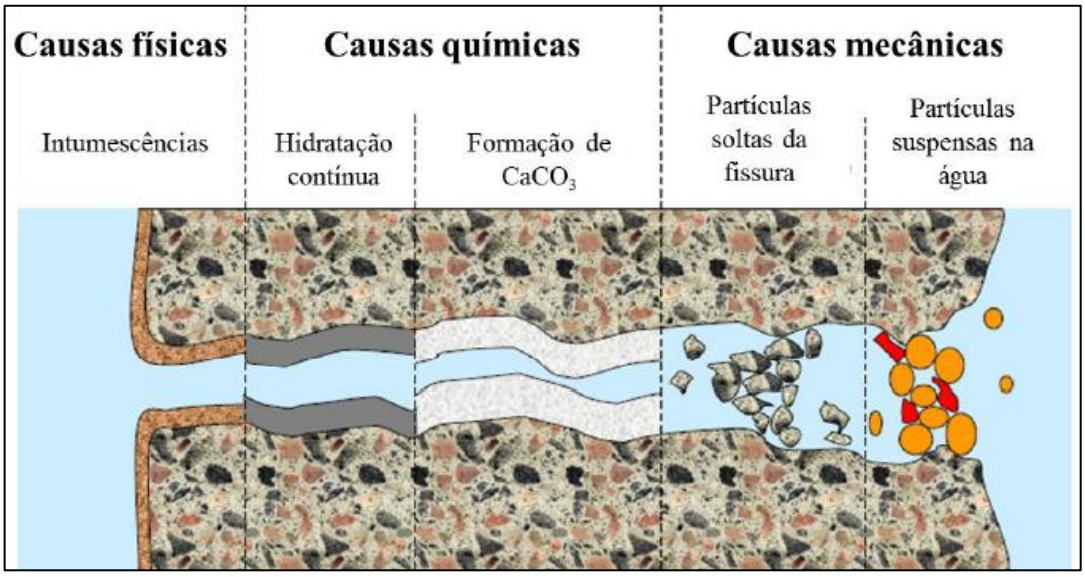
Dois dos fatores foram selecionados: a hidratação contínua das partículas não hidratadas de cimento e a precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), devido a presença de CO_2, Edvardsen (1996).

III. Causas mecânicas

Podem ser por partícula soltas na fissura ou partículas suspensas na água. Neste caso, as partículas mais finas provenientes da água que fluem através da fissura ou até mesmo partículas de cimento que se soltam ao serem transportada pelo fluxo, podem se prender nas regiões de menor espessuras das fissuras obstruindo a abertura, Ter Heide (2005).

A Figura 10 mostra esses três fatores reunidos e como cada um deles atua diferentemente no concreto.

Figura 10: Fatores que podem levar a autocicatrização autógena no concreto



Fonte: RILEM (2013)

Neste grupo de estimuladores de autocura existem métodos de contenção do tamanho da fissura por meio da incorporação de fibras através da exposição do material a água ou a ciclos seco-úmido. A água estimula o fenômeno de hidratação contínua e o ar aumenta a possibilidade das reações de produção do carbonato de cálcio, De Belie *et al*. (2018).

3.2 Cicatrização Autonoma

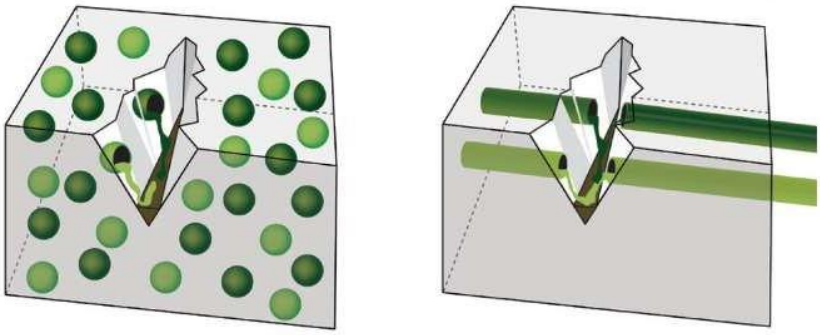
A cicatrização autônoma é realizada após a interferência de uma ação externa. Nesse caso, ocorrem introduções na composição do concreto como cinza volante e materiais expansivos na mistura inicial do concreto. Há cicatrização autônoma quando o processo utiliza materiais que não seriam encontrados na composição e foram adicionados para este fim, RILEM (2013).

Segundo Moreira (2017), a cicatrização autônoma representa a propriedade de cicatrização introduzida para agir na fissura, ou seja, o processo de cura acontece como consequência de adições realizadas no concreto. As adições são incorporadas propositalmente na matriz do cimento, com a finalidade de selar a fissura ou acelerar a sua cura, em um ambiente contendo umidade. A vista dessa definição, o uso de adições com propriedade pozolânicas, como a cinza volante, pode ser considerado uma vertente da cicatrização autônoma, pois a hidratação contínua destas tem alto potencial de cicatrização no concreto.

Tittlelboom (2013) apresenta a cicatrização autônoma baseada na inserção de cápsulas ou sistemas vasculares contendo agentes cicatrizantes, que são liberados para responder a fissuração do concreto, sendo que estes podem reagir ou não com um segundo componente na matriz cimentícia.

O sistema de autocicatrização do tipo vascular detém o agente cicatrizante em uma rede de tubos que conectam o interior da estrutura com o exterior. Quando se trata de um único composto cicatrizante, é utilizado um sistema vascular de canal único, porém à medida que mais composto de caráter cicatrizante são empregados, demanda-se uso de um número proporcional de canais no sistema. O agente cicatrizante permeia o tanque até atingir as fissuras através dos tubos por gravidade, capilaridade e, quando necessário, mediante a aplicação de pressão hidrostática, Bernabé (2014). Na figura 11 é possível observar como a cicatrização pelo uso de cápsulas e sistemas vasculares é disposta.

Figura 11: Cicatrização autônoma com uso de cápsula (esquerda); e; sistema vasculares (direita)



Fonte: Van Tittelboom, (2013)

De acordo com Takagi (2013), outra forma de obter a cicatrização autônoma é através do uso de catalisadores cristalinos como agentes cicatrizantes. Esses atuam como impermeabilizantes hidrofílicos, consumindo o Ca(OH)2 para formar produtos cristalinos que desconectam poros e preenchem fissuras no concreto. São classificados como cicatrizantes por conta de as reações ocorrerem apenas quando houver umidade suficiente, que em geral é proporcionada pelo transporte de água através das fissuras. A formação cristalina dos produtos varia entre cristais de etringita, hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio e C-S-H, sendo os dois últimos responsáveis pela recuperação das propriedades mecânicas.

O principal benefício da adição de impermeabilizante por cristalização na mistura é devido a formação de cristais insolúveis nos poros do concreto e que ficam integrados ao mesmo. Devido à propriedade de cristalização, além da capacidade de bloquear os poros e os capilares, pode ocorrer também o preenchimento de microfissuras, reduzindo a permeabilidade do concreto.

De acordo com Jokers *et al*. (2011), a utilização de bactérias extremofílicas capazes de resistirem a ambientes alcalinos por longos períodos de tempo, também podem funcionar como agentes autocicatrizantes quando adicionadas ao concreto. Essas bactérias 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 de carbonato de cálcio que irão com o tempo selar a fissura. Na literatura já existem inúmeros trabalhos sobre o uso desses microrganismos e, entre as preocupações mais frequentemente apontadas, está a escolha de quais espécies devem ser utilizadas. Isso porque, cada espécie possui características próprias de sobrevivência que poderão condicionar aspectos importantes da autocicatrização, tais como o tempo máximo até que ocorra a primeira fissura e a intensidade do mecanismo.

Lee *et al*., (2018) verificaram o uso de polímeros capazes de reter grande quantidade de líquido em sua estrutura, formando um hidrogel macio e insolúvel. 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, no entanto, exercerem tensões de tração durante esse processo.

4. CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES

4.1 Bioconcreto - o concreto que se autorregenera

Apesar de ser um material universalmente utilizado em construções, o concreto é suscetível a uma série de problemas que influem na sua durabilidade e resistência. Quando solicitado é exposto à esforços de retração, sofre variação de temperatura e logo fissuras começam a surgir. A NBR 6118 orienta para o tamanho de fissura máximo permitido, de 2 mm em edificações, que se encontram em ambientes com classe de agressividade IV. Essas pequenas fissuras, com o passar do tempo e com a presença de água do meio, conseguem ser fechadas pelo próprio concreto. Porém, aberturas maiores permitem o ingresso de substâncias nocivas presentes no meio ambiente, as quais podem degradar as armaduras e o concreto, comprometendo a durabilidade da edificação e elevando os gastos com manutenção, segundo Jokers *et al*. (2010).

De acordo com Oliveira (2012), a partir disso, em 2015 o cientista holandês Henk Jokers, pesquisador da Universidade Técnica de Delft, na Holanda, começou a estudar o chamado concreto auto cicatrizante (CAC) ou simplesmente bioconcreto, uma ideia inovadora capaz de selar as fissuras por meio de bactérias que produzem calcário.

O concreto é um ambiente muito hostil, para Oliveira (2012), contudo, foram encontradas 3 bactérias da família *Bacillus* que suportam o elevado pH alcalino e ainda produzem o calcário desejado para o processo de cicatrização. Quando na presença de cálcio e dióxido de carbono, essas bactérias precipitam o carbonato de cálcio, cicatrizando as fissuras de até 0,8 mm de largura.

A solução para a auto regeneração do concreto foi extraída diretamente da biologia, mais precisamente do estudo das bactérias. Essa auto regeneração é ocasionada através da produção biológica de calcário que posteriormente irá selar as fissuras encontradas na superfície do concreto.

É possível observar na Figura 12, o bioconcreto sendo exposto à testes de compressão controlados com o intuito de criar fissuras em sua superfície, simulando uma situação real de fissuração.

Figura 12: Testes de compressão no concreto autocicatrizante, para a verificação de fissuras

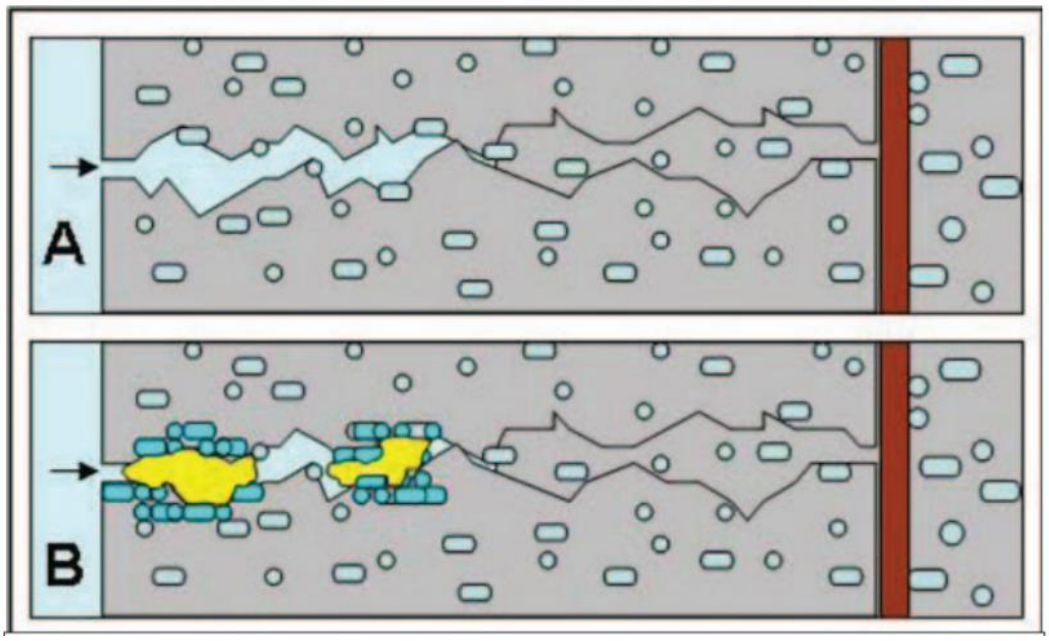
Fonte: Revista Ingenia ed.46 (2011)

Na pesquisa de Jokers (2011), tipos específicos de bactérias da família *Bacillus* foram selecionados juntamente a nutrientes a base de cálcio, como o lactato de cálcio, e com a presença de nitrogênio e fósforo foram adicionadas às pastas cimentícia. Esses agentes autocicatrizantes podem ficar dormentes por até 200 anos. Logo quando a estrutura é danificada e as fissuras aparecem, a água que se encontra no meio entra em contato com os agentes autocicatrizantes despertando-os, fazendo com as bactérias alimentem-se do lactato de cálcio produzindo assim o calcário.

Para sobreviver ao ambiente hostil, como é o alto pH do concreto, essa bactéria deveria ser capaz de formar endósporos, uma estrutura de proteção que permita que ela sobreviva em estado inativo por longos períodos. O desafio era encontrar uma espécie que atendesse a essas demandas dos pesquisadores. A bactéria só foi encontrada na Rússia, em lagos cujos pHs registrados também são altos como no concreto. A *Bacilus pseudofirmus* é normalmente encontrada em áreas de alto risco, como crateras de vulcões ativos.

A Figura13 mostra o esquema de autocura sendo realizado através das bactérias. Na Figura 13A, a água entra pela esquerda na fissura ativando as bactérias encontradas. Na Figura 13B, as bactérias ativadas selam as fissuras através da produção de calcário, protegendo a armadura.

Figura 13: Esquema de autocura através da formação de calcário

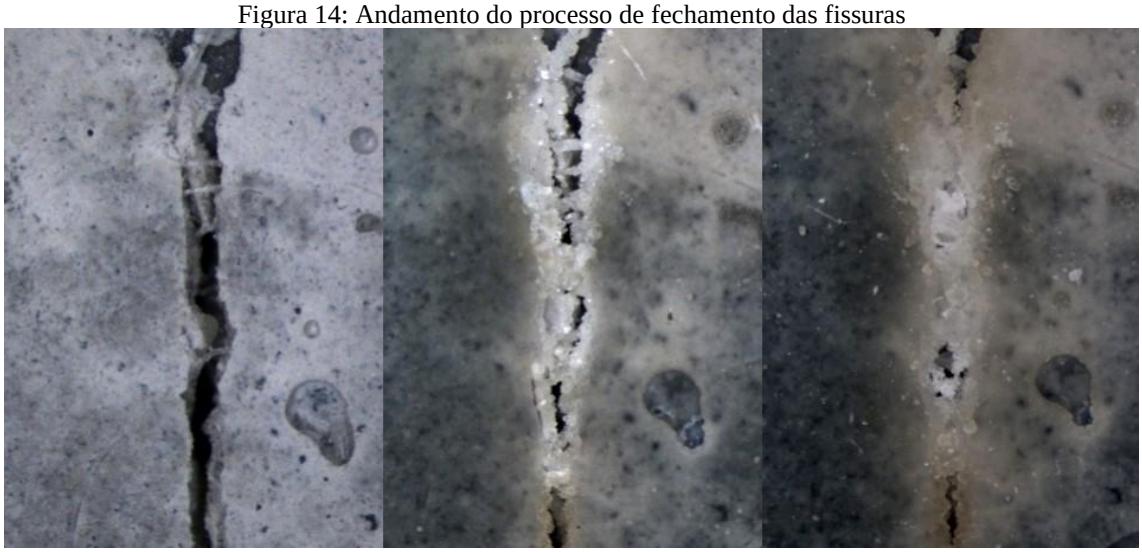


Fonte: Ingenia Edição 46 (2011)

No caso de estruturas com o concreto sem a bactéria, o bioconcreto pode ser utilizado como solução de manutenção, pulverizando um material que contenhas as bactérias e o lactato de cálcio nas fendas.

O bioconcreto pode recuperar rachaduras de qualquer comprimento, porém com a largura máxima de 0,8 milímetros como pode ser visto na Figura 14.

Figura 14: Andamento do processo de fechamento das fissuras



Fonte: Nascimento (2018)

4.1.1 Resistência à compressão

Com o uso de bactérias na mistura da argamassa, foi possível observar não apenas a selagem de fissuras, mas também algumas mudanças nas propriedades dos concretos analisados. A formação de carbonato de cálcio nas fissuras faz com o concreto fique menos poroso e consequentemente a capacidade de penetração da água diminui fazendo com que sua resistência mecânica aumente. Porém nem todas as bactérias apresentam uma mudança positiva em relação ao aumento da resistência mecânica.

Muitos autores têm feito vários experimentos com adições de diferentes bactérias. Embora a formação de calcário nas fissuras contribua com o aumento da resistência mecânica do concreto, não se pode dizer o mesmo em relação à adição de nutrientes na pasta cimentícia. Wang *et al*. (2014), observaram que a adição de microcápsulas contento nutrientes teve um efeito negativo nas propriedades mecânicas da argamassa, dentre estas, a resistência a compressão diminuiu.

A Tabela 5 a seguir, mostra diferentes resultados de diferentes autores em relação às suas pesquisas. Segundo Nguyen *et al*. (2019), o aumento de resistência à compressão é influenciado pelo tipo de bactéria e pela quantidade de células bacterianas utilizadas.

Tabela 5 - Resultado de diferentes tipos e concentrações de bactérias na resistência mecânica

Autor	Bactéria	Material	Concentração (célula/ ml)	Acréscimo ou Decréscimo de Resistência Mecânica (28 dias)
Nain *et al.* (2019)	*Bacillus subtilis*	Concreto	10^8	14,46%
	Bacillus megaterium	Concreto	10^8	22,58%
Mondal *et al.* (2017)	*Bacillus cereus*	Concreto	10^3	20%
	Bacillus subtilis	Concreto	10^5	25%
Mondal e Gosh (2018)	*Bacillus subtilis*	Argamassa	10^3	15%
			10^5	27%
			10^7	19%
Jonkers *et al.* (2010)	*Bacillus cohnii*	Pasta de cimento	$6x10^8$	-10%
Pei *et al.* (2013)	*Bacillus subtilis*	Argamassa	10^8	15%
Wang *et al.* (2014)	*Bacillus Sphaericus*	Argamassa	10^9	-15%
Chahal *et al.* (2012)	*Sporosarcina pasteurii*	Concreto	10^5	22%
		Concreto com 10% de cinza volante	10^5	20%

Fonte: CARNEIRO *et al*. (2019)

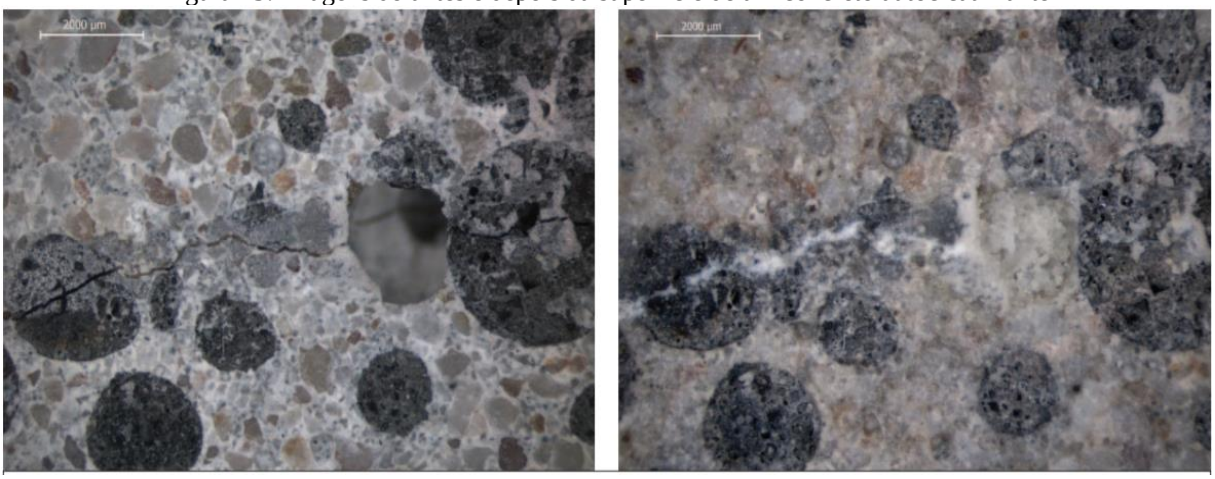
4.1.2 Comportamento do bioconcreto a curto e longo prazo

Segundo Wang *et al*. (2012), a introdução de agentes como bactérias e nutrientes autocicatrizantes na mistura do concreto, apresenta resultados promissores quando se trata de um período curto de cura, tendo as fissuras totalmente seladas. Porém, de acordo com Luo *et al*. (2015), o problema pode vir a ocorrer em idades mais avançadas do concreto, pois a atividade metabólica das bactérias tende a reduzir de acordo com o tempo. Isso ocorre pela falta de nutrientes que não são encontrados no ambiente alcalino e por conta do fechamento dos poros. Consequentemente a reprodução das células torna-se uma atividade inviável refletindo assim em uma diminuição drástica na capacidade de autocicatrização.

Jokers *et al*. (2010) diz que tal situação pode ser solucionada através do uso do encapsulamento das bactérias e nutrientes. Nesta técnica as bactérias e nutrientes encapsulados são adicionas na mistura no concreto. Uma vez que o concreto começa a sofrer solicitações, as fissuras surgem atingindo as cápsulas que por sua vez liberam os agentes para o meio alcalino. Por conta da água presente nas fissuras, as bactérias fazem seu trabalho gerando o carbonato de cálcio que posteriormente irá selar as fissuras.

Na figura 15, observa-se o antes e o depois na superfície do concreto. No lado esquerdo percebe-se a formação de uma fissura, enquanto no lado direito há o fechamento desta fissura através da colmatação causadas pela produção de calcário oriundos da digestão das bactérias.

Figura 15: Imagens do antes e depois da superfície de um concreto autocicatrizante



Fonte: Ingenia edição 46 (2011)

Quando se trata de bactérias desprotegidas, as mesmas não conseguem sobreviver por longos períodos dentro da pasta cimentícia e nem conseguem selar as fissuras por completo. Logo, a utilização de materiais de proteção mostra um caminho mais seguro para que haja uma

maior eficiência no processo de autocura. Contudo, o material utilizado não pode interferir na resistência mecânica do concreto abrindo espaço para que novas pesquisas venham ser feitas a fim de propor novos materiais de proteção, conforme Ersan *et al*. (2015).

4.1.3 Inconsistências possíveis no uso do bioconcreto

Apesar de mostrar uma utilização promissora para sanar um dos maiores problemas que a construção em concreto enfrenta, também é visto algumas desvantagens no uso desta metodologia.

Segundo Jokers (2011), existem dois obstáculos que o bioconcreto, dependendo do tipo da bactéria, deve vencer para que ele seja utilizado de forma ampla. O primeiro obstáculo é relação ao volume que é necessário ser utilizado na mistura do concreto, onde se pode chegar a 20% levando à redução na resistência à compressão do concreto. Para algumas estruturas essa redução não seria um grande problema, porém para projetos que querem um valor específico de resistência, como por exemplo em edificações muito altas, a utilização deste concreto não é seguramente recomendável.

Para Jokers (2011), outro obstáculo que o bioconcreto precisa vencer, é o custo de aplicação do método. Na Europa, o concreto convencional é comercializado por cerca de 80 euros por metro cúbico, o valor do bioconcreto seria bem mais elevado, sendo vendido por um preço aproximado de 160 euros, ou seja, o dobro. A utilização deste concreto somente seria viável em construções onde o concreto requer mais rigor na qualidade e no controle tecnológico, como por exemplo linhas de túneis, estruturas marinhas, onde a segurança é fator prioritário, ou em lugares onde o acesso para manutenção e reparos sejam limitados.

4.2 Autocicatrização do concreto com adição de cristalizantes

De acordo com Azarsa e Gupta (2018), os aditivos cristalinos são aditivos solúveis que melhoram certas propriedades do concreto em seus estados fresco e endurecido, como por exemplo, a redução da permeabilidade na mistura do concreto.

Os aditivos cristalizantes são produtos encontrados no mercado com fácil acesso, aplicação e implementação, mas comparado aos métodos convencionais eles apresentam um certo custo elevado. Todavia, por conta de sua característica autocicatrizante o aditivo cristalino irá prover uma redução no custo de reparos e manutenção em estruturas, além de fornecer uma

melhor durabilidade ao mesmo. Segundo os fabricantes deste tipo de material, fissuras de até 0,4mm podem ser cicatrizadas, Breugel (2012).

O uso dos aditivos cristalinos tem como intuito reduzir a passagem de água e de agentes potencialmente perigosos pelas fissuras encontradas no concreto. Existem vários tipos de aditivos e de misturas que variam com o tipo de cimento, areia, super plastificante e outros. Penetron (2010), por exemplo, utiliza a mistura do concreto feita através de cimento Portland, areia de sílica fina tratada e compostos químicos ativos, que em contato com a umidade do meio formam uma estrutura cristalina insolúvel nas fissuras que surgem na superfície do concreto, aumentando a durabilidade especialmente onde a classe de agressividade encontrada é de grande porte.

Como mencionado anteriormente neste trabalho, quando há adição de um certo material na mistura do concreto que venha trazer características autocicatrizantes é chamado de cicatrização autônoma. O uso do aditivo cristalizante foi considerado por anos como autocura autônoma até que segundo De Belie *et al*. (2018), a utilização deste material cristalino foi considerada como autocicatrização autógena estimulado, juntamente com adição de outros materiais, tendo em vista que sua utilização apresenta melhorias no processo de cicatrização.

4.2.1 Resultados obtidos com o uso de aditivos cristalizantes

Diferentes tipos de aditivos cristalizantes podem ser utilizados com diferentes dosagens para concreto.

Em uma pesquisa de San Martin (2021), foi utilizado um aditivo impermeabilizante por cristalização constituído de cimento Portland, compostos químicos ativos e rastreador químico, com o intuito de selar as fissuras e reduzir a porosidade do concreto para que não houvesse penetração de água ou agentes nocivos. O traço feito contou com uma quantidade de 0,8 % de aditivo impermeabilizante em relação à quantidade de cimento.

É possível observar na Figura 16, as fissuras consideradas no experimento, que variaram entre 0,15 e 0,40 mm de espessura.

Figura 16: Fissuras encontras na edificação variando entre 0,15 e 0,40 mm

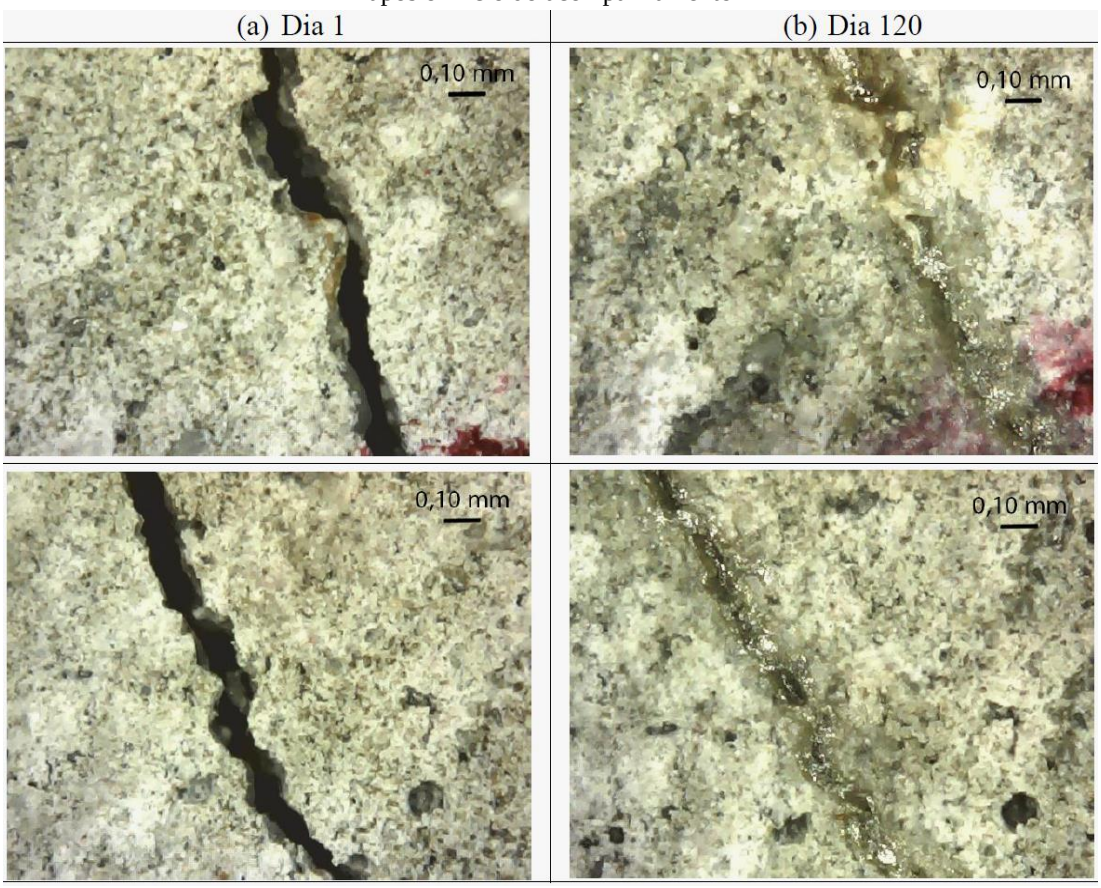
Fonte: San Martin (2021)

Após a verificação das fissuras e de seus fechamentos, conclui-se que, para que ocorra a colmatação das aberturas é imprescindível a presença de umidade. Este fenômeno vem através da formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que é depositado na fissura, segundo Reddy *et al*. (2019) afirma que a água contribui para o transporte de hidróxido de cálcio contribuindo para o depósito de carbonato de cálcio nas fissuras.

Segundo Jiang *et al* (2015), as condições ambientais podem prolongar o tempo de autocura do concreto por conta dos íons, que são responsáveis pela cristalização, serem drenados pela água onde a fissura acontece. Logo, conclui-se que esse tipo de autocicatrização é um processo que não depende apenas do tempo, mas também das condições de meio.

Na Figura 17, a seguir, pode-se observar a evolução da autocicatrização com aditivos cristalizantes, ao longo de um período de 120 dias. Pode-se observar no local das fissuras, uma ‘pasta cristalina’ tratando e preenchendo essas degradações.

Figura 17: Autocicatrização de fissuras presentes , nos primeiros dias de acompanhamento e 4 meses após o início do acompanhamento



Fonte: San Martin (2021)

A Tabela 6, mostra a síntese dos fechamentos de fissuras bem-sucedidos e também, aqueles que não obtiveram êxito com os aditivos cristalizantes. Alguns pesquisadores utilizaram os aditivos cristalizantes disponíveis no mercado ou não mencionaram quais aditivos foram utilizados, e Pazderka (2016), comenta sobre a dificuldade da obtenção de informações sobre à composição química destes produtos comerciais, devido ao sigilo dos negócios.

Tabela 6 - Síntese do fechamento das fissuras com aditivos cristalizantes

Espessura (mm)	**Com fechamento (un.)**	**Sem fechamento (un.)**	**Total de Fissuras**	**Com fechamento (%)**
0,10	12	8	20	60%
0,15	3	6	9	33%
0,20	2	9	11	18%
0,25	1	4	5	20%
0,30	0	6	6	0%
0,35	0	5	5	0%
0,40	1	3	4	25%
TOTAL	19	41	60	32%

Fonte: San Martin (2021)

4.3 Autocicatrização utilizando materiais pozolânicos

Helene *et al*. (2018), observou em diversas pesquisas, que alguns estudos tem mostrado a funcionalidade do concreto através de aditivos químicos, encapsulamento de agentes reparadores, bactérias, dentre outros. Os materiais pozolânicos, por exemplo, vêm sido a fonte mais interessante para o estudo da autocicatrização dos Compósitos Cimentícios Projetados (ECC). Estes materiais, por vezes auxiliam na solução para a redução do uso de cimento na dosagem, apresentam por outro lado um ganho de resistência significativo, podendo também ser essenciais na atuação da cicatrização na matriz cimentícia Tittelboom (2013).

Em concretos como o ECC, a dosagem tem como cimento e material pozolânico sua principal base, chegando a 70% do volume inteiro. Segundo Stutzman (2001), nesta dosagem alguns grãos de cimento e algumas partículas pozolânicas não hidratadas não reagiram no compósito, o que pode levar, após o acontecimento de uma fissura no concreto, uma continuidade no processo de hidratação.

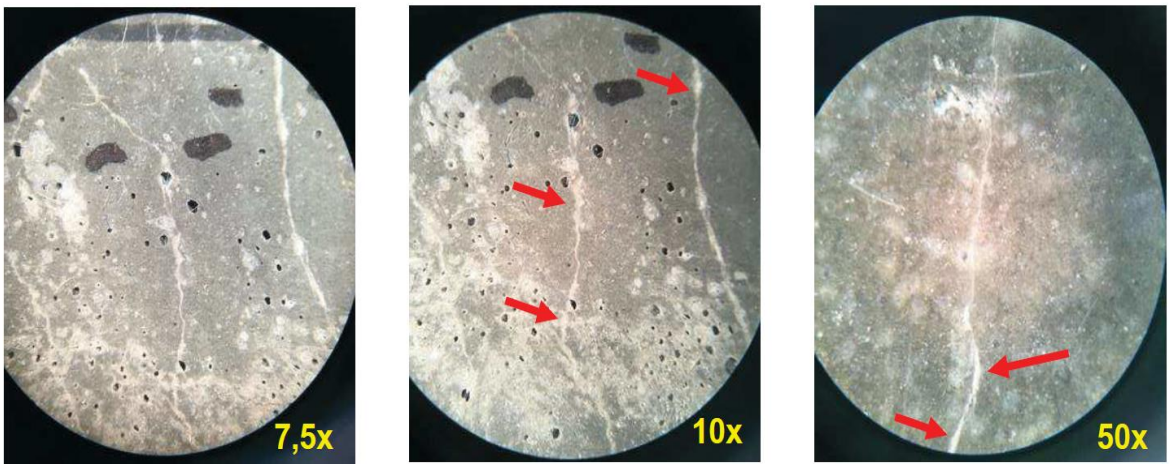
De acordo com Mehta (2014), após a hidratação do cimento dois produtos são gerados, sendo eles o C-S-H e o hidróxido de cálcio, Ca(OH)2. Este último, que além de contribuir para o balanceamento do pH da pasta cimentícia, é utilizado pela pozolana presente, dando a formação de cristais de silicoaluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H), que ajudam na cicatrização do concreto. Portanto conclui-se que quanto mais hidróxido de cálcio presente na mistura da pasta onde há a presença de pozolana, mais suscetível o concreto será a ter uma boa autocicatrização.

Segundo Van Breugel (2007) quando em contato com o ar, o Ca(OH)2 sofre carbonatação dando formação a outro elemento, o CaCO3. Este elemento encontra-se presente nas superfícies das fissuras devido estar mais próximo do meio em contato com o ar Dong *et al*. (2015).

Mais uma vez, foi notado que para que ocorra a autocicatrização do compósito cimentício é preciso estar em meio aquoso. Tratando-se de cura, a única situação que não ocorreu a autocicatrização foi a cura ao ar, que por não obter uma disponibilidade de água suficiente não foi possível ativar as reações químicas, Ravitheja *et al* (2019).

Na Figura 18, é possível ver os diferentes produtos de autocura devido às reações químicas do cimento e do material pozolânico. Em seu último estado de autocura pode-se notar a presença de CaCO3 que ficam depositados na superfície da fissura quando cicatrizada.

Figura 18: Presença de autocicatrização em uma fissura de ECC



Fonte: Ehrenbring (2020)

Nas pesquisas de Sahmaran (2013), foram expostos os diferentes tipos de cinza volante (CV) e suas máximas espessuras que obtiveram cicatrizações. De acordo com a categoria da CV foi possível observar uma variação de espessuras de fissuras que foram colmatadas, algo em torno de 30 µm e 100 µm. Logo, quanto maior a atividade pozolânica do material é possível que fissuras de maiores tamanhos possam ser seladas.

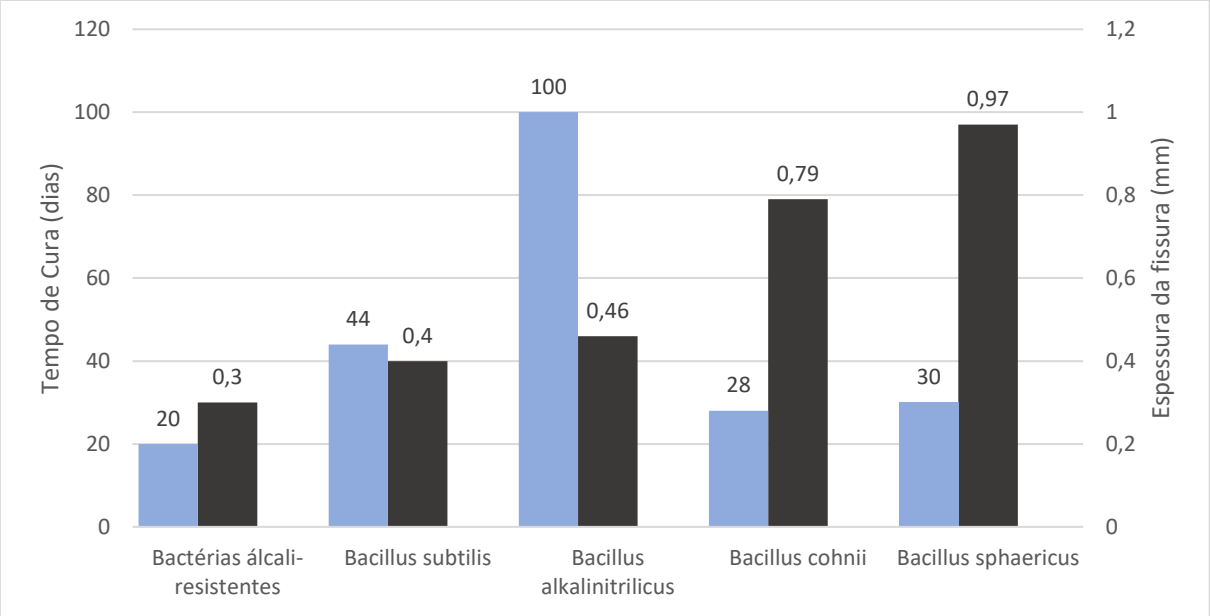
5. EFICIÊNCIA DOS MÉTODOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO

5.1 Eficiência do bioconcreto

Vários pesquisadores desenvolveram diferentes tipos de experimentos utilizando diferentes tipos de bactérias e em quantidades diferentes. De acordo com Li *et al*. (2019), a largura máxima reparável não depende apenas da quantidade de bactérias encontradas nas fissuras, mas também da forma que ela é aplicada no compósito cimentício.

Na Figura 19, é possível observar a eficiência dos diferentes experimentos com diferentes bactérias e os resultados encontrados de acordo com o tamanho das fissuras e o tempo de autocura.

Figura 19: Eficiência de diferentes agentes biológicos utilizados no bioconcreto



Fonte: Adaptado de CARNEIRO, *et al*. (2019).

É notório, como a utilização do bioconcreto mostra uma eficiência mais efetiva em relação a sua durabilidade. Diversos tipos de bactérias podem ser utilizados nas misturas de concreto como por exemplo, a que melhor obteve resultados em pesquisas, *Bacillus sphaericus*, que foi capaz de cicatrizar fissuras de até 0,97 mm na presença de água.

Percebe-se que este tipo de concreto pode perdurar por longo tempo, sem que haja a necessidade da realização de manutenções corretivas para reparar as fissuras que podem abrir com o tempo. Entretanto, em relação ao custo inicial, percebe-se também que precisa ser

estudado com mais empenho, para que possa se tornar viável a utilização deste método de forma mais econômica nos concretos para a construção civil.

5.2 Eficiência dos concretos com aditivos cristalizantes

Parâmetros distintos, como o tipo de cimento utilizado na mistura, a proporção entre a areia e o cimento, a proporção entre o cimento a água, as características, propriedades e quantidades dos aditivos aplicados, etc., utilizados nas pesquisas, apresentam resultados que podem se aproximar ou se distanciar entre si. Esses parâmetros e outras observações, podem ser visualizados na Tabela 7.

Analisando os dados expostos nessa tabela, é notório que o fator “água” se distingue entre os diferentes experimentos com concreto, e é imprescindível para o processo autocura. Nos resultados exibidos, pode observar que os melhores estão em meio aquoso onde se realizaram as reações químicas, anteriormente comentadas nesse trabalho.

De acordo com os parâmetros da Tabela 7, pode-se verificar algumas semelhanças entre os concretos. Nos itens 4 e 6, é possível verificar que a grande maioria dos parâmetros são parecidos, como o tipo de concreto, o tempo de cura, exposição do concreto e a capacidade máxima de cicatrização que ambos obtiveram. Em suma, apesar de não haver conhecimento sobre o tipo de aditivo utilizado nos dois itens, foi notado que apenas a proporção água/cimento difere das outras características, havendo no item 4 um consumo de água maior na hora da preparação do concreto. A eficiência desses dois tipos de concreto em específico mostrou-se bem próxima uma da outra.

Por outro lado, os itens 8 e 9, que demonstram um tipo de concreto de alta performance com a adição de fibra em comum, utilizaram parâmetros como aditivos cristalizantes, tipo de cimento, relação água/cimento, exposição ao meio, tempos de cura, totalmente diferentes, porém para este tipo de concreto foram apresentados resultados de cicatrização de fissuras relativamente próximos. Para os parâmetros citados, atenta-se para o de tempo de cura, que mostra uma diferença bem notória. Isso ocorre pelo fato de a relação água/ cimento ser menor. Tendo em vista que para que ocorra a cicatrização da fissura a presença de água é fundamental. Neste caso, o concreto do item 9, precisou estar em contato com água por um tempo bem maior relacionado ao item 8, para que as reações químicas pudessem ocorrer.

Tabela 7: Relações entre os tipos de concreto, aditivos cristalinos, fissuração e cura

ITEM	CONCRETO	CIMENTO	RELAÇÃO ÁGUA/ CIMENTO	ADITIVO	FISSURA CICATRIZADA (mm)	CURA	CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO DO CONCRETO
1	CONCRETO USUAL	CP-II	0,63	Microsilica	0,25	12 meses	água/ar
2	CONCRETO USUAL	Não especificado (N/E)	0,25	CSA, Denka, Xyper, Admix C1000NF	0,20	28 dias	água
3	CONCRETO USUAL	CP-II	0,45	Metacaulim	N/E	28 dias	água
4	CONCRETO USUAL	CP -II	0,6	N/E	0,40	42 dias	água
5	CONCRETO COM FIBRA	CP-II	0,5	Penetron Admix	0,30	6 meses	ar
6	CONCRETO COM FIBRA	CP-II	0,45	N/E	0,30	42 dias	água
7	CONCRETO DE ALTA PERFOMANCE COM FIBRA	I 42,5 N	0,25	N/E	0,40	28 dias	água
8	CONCRETO DE ALTA PERFOMANCE COM FIBRA	N/E	0,43	WT-250 Sika	0,20	56 dias	água/ar
9	CONCRETO DE ALTA PERFOMANCE COM FIBRA	I – 52,5	0,18	Microsilica	0,25	6 meses	água

Fonte: Adaptado de Guzlena e Sakale (2019)

Do ponto de vista econômico, entre os concretos mostrados na Tabela 7, aqueles que apresentam menor tempo de cura tornam-se mais atrativos para o mercado. Os itens 2, 3 e 7, são tipos de concreto que obtiveram a cicatrização das fissuras em menor período em relação aos demais, desta forma quando analisados os prazos de cumprimento de execução nas obras, estes tipos de concreto atendem bem as expectativas das empresas de construção civil.

De forma geral, a utilização dos aditivos cristalinos mostra eficiência satisfatória em relação a cicatrização de fissuras, se considerados todos os fatores envolvidos. Vale destacar, a facilidade da aquisição desses aditivos no comércio e a facilidade na sua aplicação.

6. CORRELAÇÕES ENTRE OS TIPOS DE CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES

Quando analisados de forma separada, os tipos de concreto autocicatrizantes mostram ter diferentes métodos de pesquisa, aplicações e desenvolvimentos. Porém todos propõe algumas soluções em comum, como uma melhor durabilidade do concreto, menor consumo de cimento, melhor efeito de sustentabilidade para o meio ambiente através da diminuição do uso de cimento que gera uma redução na produção de CO2 para o meio, dentre outros. A seguir, alguns pontos de convergências e alguns pontos de divergência entre tipos distintos de concretos autocicatrizantes, serão explicados.

Na Tabela 8, são apresentadas as correlações entre o bioconcreto e o concreto com aditivos cristalizantes.

Tabela 8: Correlação entre o bioconcreto e o concreto com aditivo cristalizante

QUESITO	BIOCONCRETO	CONCRETO COM ADITIVOS CRISTALIZANTES
Durabilidade	Até 200 anos	Melhor comparado ao concreto convencional
Resistência	Varia de acordo com a quantidade	Ganho de resistência
Sustentabilidade	Diminui a produção de CO_2	Não difere do concreto convencional
Espessura de cicatrização máxima	0,8 mm	0,4 mm
Manutenção	Não há necessidade; custo inexistente	Não há necessidade, custo inexistente
Inconvenientes	Acesso à tecnologia; custo inicial elevado	Custo inicial elevado

Fonte: Próprio autor (2021)

Ambos os métodos apresentados na Tabela 8, estão em ascensão no mercado comercial para os processos de autocura dos concretos. Embora apresentem metodologias distintas entre si, o resultado entre eles é relativamente similar.

O bioconcreto, assim como o concreto com aditivos cristalizantes, apresentam bons resultados no quesito manutenção, considerando que o custo atual com manutenção de estruturas é extremamente alto, os dois tipos de concreto apresentam resultados satisfatórios. Como o intuito do uso destes tipos de concretos é obter uma cicatrização autônoma, a preocupação com reparos deixa de ser um fator extremamente importante. Como mencionado

anteriormente, o bioconcreto apresenta bom desempenho com perspectiva de durabilidade até 200 anos, com respeito ao concreto com aditivos cristalizantes, os dados disponíveis nas pesquisas são insuficientes ou inconclusivos.

Em relação a resistência mecânica de cada concreto, nota-se que o concreto com atividade biológica apresenta resultados variados, pois a capacidade de aumentar ou reduzir a resistência depende de fatores como o tipo e a quantidade de bactérias aplicadas na dosagem, e o material para encapsulamentos dos agentes. Em contrapartida, o concreto com aditivo cristalizante apresenta melhor resistência mecânica, pela redução do índice de vazios decorrida da expansão dos aditivos.

No que tange a aquisição do produto, o custo elevado do bioconcreto, em torno de 40% superior ao concreto convencional, afirma Jokers (2010), contribui para o acesso relativamente restrito em termos comerciais. No caso dos aditivos cristalizantes, o custo inicial também se mostra elevado, porém é vantajosa a diversidade de aditivos disponíveis no comércio varejista, gerando assim um ambiente competitivo entre as empresas especialistas nesse tipo de concreto, resultando em custos iniciais mais atrativos em relação ao bioconcreto. Os dois tipos de concretos apresentam boa capacidade de autorregeneração, porém, os resultados de colmatação das fissuras mostram que o uso de aditivos cristalizantes é inferior ao uso de bactérias.

A seguir, será apresentada a correlação entre o bioconcreto e concreto com materiais pozolânico. Na Tabela 9, são apresentados os mesmos aspectos de comparação entre os

Tabela 9: Correlação entre o bioconcreto e o concreto com materiais pozolânicos

QUESITOS	**BIOCONCRETO**	**CONCRETO COM MATERIAIS POZOLÂNICOS**
Durabilidade	Até 200 anos	Melhor comparado ao concreto convencional
Resistência	Varia de acordo com a quantidade	Ganho de resistência
Sustentabilidade	Diminui a produção de co2	Diminui a produção de co2
Espessura de cicatrização máxima	0,8 mm	0,1 mm
Manutenção	Não há necessidade; custo inexistente	Há necessidade periódica
Inconvenientes	Acesso à tecnologia; custo inicial elevado	Pouca disponibilidade no mercado

Fonte: Próprio autor (2021)

É possível ver na Tabela 9, as diferenças entre os métodos expostos. A maioria dos itens analisados possuem divergências, mostrando que um método é potencialmente superior ao outro quando relacionados a autocura.

O concreto com agentes biológicos se mostra superior em todos os itens listados e exibidos neste trabalho. Em relação a manutenção e durabilidade, o bioconcreto apresenta uma maior segurança tendo em vista uma maior espessura máxima curável. Como o concreto de alto índice pozolânico possui a cicatrização máxima até 0,1mm de espessura, é recomendável que haja inspeção no concreto pois fissuras maiores podem estar presentes, gerando custos com manutenção e reparos.

O único ponto de convergência visível quando correlacionados, é o ganho de resistência presente nos dois tipos de concreto, porém o bioconcreto depende de fatores já mencionados anteriormente para que alcance uma resistência mecânica melhor. Já o concreto com o índice pozolânico mais elevado apresenta uma melhoria. Concretos como o ECC, utilizam materiais pozolânicas em sua composição para que haja uma melhoria na resistência e para que ocorra uma substituição da quantidade de cimento, visando uma melhoria no quesito sustentabilidade.

Ambos, possuem características de cicatrização autógenas. Enquanto no bioconcreto os agentes biológicos são utilizados na mistura da pasta cimentícia produzindo calcário, responsável pela cicatrização das fissuras, os materiais pozolânicos geram C-S-H, C-A-S-H e CaCO3, também auxiliam na cicatrização do concreto. Nesses dois métodos é imprescindível a utilização de água para que ocorra todos os processos químicos. Na tabela 10, destaca-se as correlações entre o concreto com materiais pozolânicos e o concreto com aditivos cristalinos.

Tabela 10: Correlação entre o concreto com materiais pozolânicos e o concreto com aditivos cristalizantes

QUESITOS	**CONCRETO COM MATERIAIS POZOLÂNICOS**	**CONCRETO COM ADITIVOS CRISTALIZANTES**
Durabilidade	Melhor comparado ao concreto convencional	Melhor comparado ao concreto convencional
Resistencia	Ganho de resistência	Ganho de resistência
Sustentabilidade	Diminui a produção de co2	Não difere do concreto convencional
Espessura de cicatrização máxima	0,1 mm	0,4 mm
Manutenção	Há necessidade periódica	Não há necessidade, custo inexistente
Inconvenientes	Pouca disponibilidade no mercado	Custo inicial elevado

Fonte: Próprio autor (2021)

Os tipos de concreto autocicatrizantes presentes na Tabela 10, são considerados autônomos, ou seja, houve adição na mistura inicial do concreto para que houvesse melhorias em suas propriedades. É perceptível que os métodos mencionados na Tabela tratam de materiais que propuseram resultados não tão distintos.

Em relação a manutenção, o concreto com materiais pozolânicos aponta uma necessidade de análises periódicas enquanto o concreto com aditivos cristalizantes não necessita de tal preocupação. Claramente, a durabilidade e resistência de cada apresenta uma melhoria em relação ao concreto usual, pois através dos processos de autocura, as fissuras colmatadas formam uma barreira entre as agentes nocivos e a armadura, impedindo que qualquer dano seja causado na estrutura.

Embora sejam bastante parecidos em relação a tamanhos de fissuras que podem ser cicatrizadas, os dois métodos apresentam divergências sobre a sustentabilidade. O concreto com a presença de materiais pozolânicos, substituindo uma certa quantidade de cimento necessário para produzir o concreto, reduz a produção de CO_2. Por outro lado, o concreto com aditivos cristalinos visa diminuir a permeabilidade do mesmo, utilizando a mesma quantidade de cimento na dosagem.

Após a correlação entre os métodos pesquisados, foi possível perceber que apesar de todos terem o mesmo objetivo, que se resume em gerar um concreto que possui características auto regenerativas, todos possuem formas diferentes de se alcançar o objetivo de autocura. Alguns se mostram superiores aos outros quando analisadas a capacidade de fechamento de fissuras e resistências mecânicas, no entanto itens como durabilidade e manutenção apresentaram resultados bastante semelhantes.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho, compreendeu-se que as pesquisas relacionadas a autocicatrização dos concretos oferecem ampla possibilidade de estudo. Estes estudos, por sua vez, têm evoluído bastante na comunidade técnico-científica internacional, entretanto, a percepção do autor é que no Brasil, esse campo de pesquisa ainda se mostra limitado, talvez por fatores econômicos e relacionados a outras prioridades científicas.

Percebeu-se o esforço de vários pesquisadores que têm empreendido no desenvolvimento de concretos autoregeneráveis, como foco na selagem das fissuras nas peças de concreto, degradações essas, que aparecem com certa frequência ao longo do tempo, principalmente quando não há manutenção adequada nas peças concretadas.

Diferentes métodos foram pesquisados e analisados neste trabalho. Métodos que envolvem agentes biológicos, aditivos como cristalizantes, como também a introdução de materiais pozolânicos. Como o concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, e é preciso estudar mais sobre sua eficiência, pois um dos requisitos mais desejáveis nesse produto é a durabilidade, do contrário, economicamente, o produto não será vantajoso. Um concreto menos durável, pode contribuir para a deterioração das peças estruturais, sem citar os custos de manutenções e de reparos que se tornam elevados.

Os custos relacionados aos concretos autocicatrizantes são nitidamente mais elevados quando comparados aos concretos usuais, entretanto, embora este custo seja alto, acredita-se que é uma vantagem utilizá-los, quando considerados os custos com reparos futuros, considerando também, que diversas pesquisas tem sido desenvolvidas para que o custo inicial dos concretos autocicatrizantes se tornem mais atraentes e mais disponíveis no mercado da construção civil.

Como sugestão para futuros estudos, sugere-se explorar o desenvolvimento de outros métodos, visando a redução dos custos de execução e de aplicação dos concretos autocicatrizantes. Outra possibilidade de estudo, é a experimentação de concretos envolvendo materiais pozolânicos, com emprego de outros materiais e outros parâmetros, pois percebeu-se nas pesquisas relacionadas, a escassez de literatura científica quanto ao uso desses materiais para essa finalidade. Finalmente, propõe-se a busca de contribuições de outras ciências, como por exemplo a Biologia, para o desenvolvimento ou potencialização de outros tipos de bactérias, que auxiliem nas pesquisas sobre o bioconcreto.

8. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAIS TÉCNICAS. Estruturas de Concreto Armado. NBR 6118. Rio de Janeiro. 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAIS TÉCNICAS. Vermicula expandida — Temperaturas inicial e final de amolecimento — Método de ensaio. NBR 9573. Rio de Janeiro 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAIS TÉCNICAS. Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. NBR 15530:2019. Rio de Janeiro. 2019

AZARSA, P.; GUPTA, R.; BIPARVA, A. **Crystalline waterproofing admixtures effects on self-healing and permeability of concrete**. Em: Proceedings of the International Conference on New Horizons in Green Civil Engineering, University of Victoria, Victoria, BC, Canada. 2018.

BASSO, MATHEUS. **Autocicatrização autógena do concreto**. Disponível em https://petciviluem.com/2021/02/16/autocicatrizacao-autogena-do-concreto/Escrito. Acesso em 30 de maio de 2021.

BERKE, NEAL S.; HICKS, MARIA C. **Predicting long-term durability of steel reinforced concrete with calcium nitrite corrosion inhibitor**. Cement and Concrete Composites, v. 26, n. 3, p. 191-198, 2004.

CAILLEUX, E.; POLLET, V. **Investigations on the development of self-healing properties in protective coatings for concrete and repair mortars**. Em: Proceedings of the 2nd international conference on self-healing materials, Chicago, IL, USA. 2009.

DE BELIE, NELE *et al*. **A review of self-healing concrete for damage management of structures**. Advanced materials interfaces, v. 5, n. 17, p. 1800074, 2018.

DONG, B. *et al.* **Self-healing features in cementitious materials with urea-formaldehyde/epoxi microcapsules**. Constructions and Building Materials. v. 106, p. 608-617, 2016.

ERŞAN, YUSUF ÇAĞATAY *et al*. **Screening of bacteria and concrete compatible protection materials**. Construction and building materials, v. 88, p. 196-203, 2015.

FIGUEIREDO, ENIO PAZINI. **Durabilidade das estruturas de concreto esta sujeita a ação do meio ambiente.** Disponível em < https://www.aecweb.com.br/revista/materias/durabilidade-de-estruturas-de-concreto-esta-sujeita-a-acao-do-meio-ambiente/12727. Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (UFG). Acesso em 30 de maio de 2021.

GHOSH, SWAPAN KUMAR (Ed.). **Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications**. Weinheim: Wiley-vch, 2009.

JAPAN CONCRETE INSTITUTE. State-of-the-art report of the JCI Technical committee: **Autogenous healing in cementitious materials**. Proceedings of 4th International Conference

on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, ConMat'09. Nagoya, Japan. 2009.

JONKERS, HENK M. **Self-healing concrete: a biological approach**. Em: Self-healing materials. Springer, Dordrecht, 2007. p. 195-204.

NAKAMURA, JULIANA. **Fissuras põem em risco a vida útil das estruturas de concreto**. Disponível em <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/fissuras-poem-em-risco-a-vida-util-das-estruturas-de-concreto/16243>. Acesso em 02 de junho de 2021.

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

MARTINS, Kleber José Berlando. Fissuras põem em risco estruturas de concreto. Disponível em https://www.aecweb.com.br/revista/materias/fissuras-poem-em-risco-a-vida-util-das-estruturas-de-concreto/16243. Acesso em 03/06/2021.

DE MEDEIROS, M. H. F., DE OLIVEIRA ANDRADE, J. J.; DO LAGO HELENE, P. R. **Durabiliidade e vida útil das estruturas de concreto**. Concreto: ciência e tecnologia, IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland: contribuição aos processos de autocicatrização.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

NOAL, BRUNO ALEXANDRE MAINARDI. **Entendendo as trincas e fissuras**. Disponível em <https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/entendendo-as-trincas-e-fissuras>. Acesso em 10/06/2021

OLIVEIRA, HÉLIO M. **Cimento Portland**. Em: Materiais de construção. Ed. L. A. Falcão Bauer. 5.ed. rev. Rio de Janeiro, LTC, 2012.

PAZDERKA, J. **Concrete with Crystalline Admixture for Ventilated Tunnel Against Moisture**. Key Engineering Materials, v. 677, n. 1, p. 108–113, 2016.

PENETRON, disponível em :https: //blog.penetron.com.br /wpcontent/uploads /2020/09 Manual-produtos.pdf

RAVITHEJA, A.; REDDY, T. C. S.; SASHIDHAR, C. **Self-healing concrete with crystalline admixture: a review**. Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition, Wahun, v. 34, n. 5, p. 1143 – 1154, 2019.

REDDY, T. C. S.; RAVITHEJA, A. **Macro mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments**. Ain Shams Engineering Journal, v. 10, n. 1, p. 23–32, 2019.

RILEM - Internacional Union of Laboratories and Experts in Construtuion Materials. Systems and Strutures. Disponível em <https://www.rilem.net/groupe/221-shc-self-healing-phenomena-in-cement-based-materials-228/page/presentation> International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, 2013.

REINHARDT, HANS-WOLF; JOOSS, MARTIN. **Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width**. Cement and concrete research, v. 33, n. 7, p. 981-985, 2003.

SAHMARAN, MUSTAFA; YILDIRIM, GURKAN; ERDEM, TAHIR K. **Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials**. Cement and Concrete Composites, v. 35, n. 1, p. 89-101, 2013.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007. p. 306.

STUTZMAN, P. E. **Scanning electron microscopy in concrete petrography**. Em: MATERIALS SCIENCE OF CONCRETE, 2000. Anna Maria Island, Florida. Calcium hydroxide in concrete: workshop on the role of calcium hydroxide in concrete. Gaithersburg, MD: NIST, 2001. P. 59-72.

TAKAGI, EMILIO MINORU. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária) Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2013.

TANG, WAICHING; KARDANI, OMID; CUI, HONGZHI. **Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review**. Construction and Building Materials, v. 81, p. 233-247, 2015.

TER HEIDE, NYNKE. **Crack healing in hydrating concrete**. Thesis (Master of Applied Science) – Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Microlab. Delft. 2005.

VAN BREUGEL, K. **Is there a market for self-healing cement-based materials?** International Conference on Self-Healing Materials. Noordwijk aan Zee, The Netherland, 2007.

VAN TITTELBOOM, KIM; DE BELIE, NELE. **Self-healing in cementitious materials—A review**. Materials, v. 6, n. 6, p. 2182-2217, 2013.

WANG, JIANYUN *et al*. **X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete**. Cement and Concrete Composites, v. 53, p. 289-304, 2014.