



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

ALAN DE FREITAS ZAGO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE
ESTRUTURAS COM PROCESSOS DE AUTOCURA:
BIOCONCRETO E CONCRETO AUTOCICATRIZANTE**

Tubarão

2021

ALAN DE FREITAS ZAGO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE
ESTRUTURAS COM PROCESSOS DE AUTOCURA:
BIOCONCRETO E CONCRETO AUTOCICATRIZANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
do Sul de Santa Catarina como requisito parcial
à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof. Lucimara Aparecida Schambek Andrade, Ms.

Tubarão

2021

ALAN DE FREITAS ZAGO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE
ESTRUTURAS COM PROCESSOS DE AUTOCURA:
BIOCONCRETO E CONCRETO AUTOCICATRIZANTE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 02 de dezembro de 2021.

Professora e Orientadora Lucimara Aparecida Schambek Andrade, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Charles Mendes de Souza, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Mauricio Alberto Büchele Motta, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedico esse trabalho a minha família, aos professores e aos colegas de classe que sempre me incentivaram a continuar firme na graduação e estavam presentes quando mais precisei.

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial para meus pais que proporcionaram a mim a oportunidade de fazer uma graduação, e sempre me incentivaram a estudar desde pequeno.

A professora Lucimara, minha orientadora desse trabalho de conclusão, por toda sua dedicação, e sabedoria, me ajudando muito para conseguir vencer mais essa etapa.

Aos outros professores por passarem todo conhecimento durante as aulas, e por cobrar a dedicação e comprometimento com a disciplina desde o começo.

Os colegas de classe que contribuíram nas atividades acadêmicas, e se esforçaram para que todos chegassem até aqui.

“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar aonde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.” (Bill Gates).

RESUMO

Um dos principais materiais descoberto pelo homem foi o concreto, e até os dias de hoje o concreto é o método construtivo mais utilizado pelo mundo. Com sua utilização foram se descobrindo a ocorrência de manifestações patológicas, e com o tempo as causas. Conforme os estudos, à vários tipos de patologias que podem causar a deterioração das estruturas. Muitas dessas deteriorações ocorrem, pois em algum lugar na estrutura surgem fissuras ou rachaduras, onde permitem a entrada de substâncias que agride a estrutura com o passar do tempo, podendo ocasionar a ruptura do concreto e outros problemas também. Logo como medidas de precaução, muitas vezes são usados os métodos de reparações convencionais nas estruturas, como por exemplo, o uso da nata de cimento no preenchimento das fissuras em caso simples, ou até chegando a quebrar parte da estrutura para aplicação de produtos químicos e refazer a concretagem, isso em casos mais graves. Por isso que a utilização dos métodos de autocura do concreto, pode levar as reparações das estruturas a um outro nível, sua aplicação é simples, e se usada desde o começo numa obra, irá reduzir gastos com reparos constantes nas estruturas futuramente. Os métodos de autocura são baseados na regeneração observados no corpo humano, onde a recuperação dos tecidos da pele e dos ossos, acontecem de forma natural e conseguem recuperar a parte lesionada “estrutura”. Com isso a importância de estudar como funciona a autocura dos concretos, objetivo desse trabalho. E para atingir esse objetivo, um estudo comparativo entre dois métodos de processos de autocura do concreto foi desenvolvido através desse trabalho, onde foi descrito as características entre o bioconcreto e o concreto autocicatrizante, para assim identificar suas funcionalidades e ter um conhecimento mais aprofundado sobre eles, e saber como aplicar cada um dos métodos. Enfim, por meio desse trabalho identificamos as propriedades desses processos de autocura, e podemos concluir que os métodos ajudam realmente a combater as fissuras no concreto, se reparando de forma autônoma, de forma segura, sendo economicamente viável, e mais eficaz que os processos de reparos comuns.

Palavras-chave: Estrutura. Autocura. Concreto.

ABSTRACT

One of the main materials discovered by man was concrete, and to this day, concrete is the most used construction method in the world. With its use, the occurrence of pathological manifestations was discovered, and with time as causes. According to studies, there are several types of pathologies that can cause the deterioration of structures. Many of these deteriorations occur, as cracks or cracks appear somewhere in the structure, which allow the entry of substances that attack the structure over time, which can cause concrete rupture and other problems as well. Therefore, as precautionary measures, conventional repair methods are often used on structures, such as the use of cement to fill cracks in a simple case, or even breaking part of the structure to apply products chemicals and redo the concreting, this in more serious cases. That's why the use of concrete self-curing methods can take structural repairs to another level, its application is simple, and if used from the beginning in a work, reduce costs with constant repairs in the structures in the future. Self-healing methods are based on the regeneration observed in the human body, where the recovery of skin tissue and bones happens naturally and is able to recover an injured part of the “structure”. Thus, the importance of studying how the self-healing of the concrete works, the objective of this work. And to achieve this goal, a comparative study between two methods of self-healing concrete processes was developed through the work, which was described as characteristics between bioconcrete and self-healing concrete, in order to identify their characteristics and have a deeper knowledge about them, and know how to apply each method. Finally, through the work, we identified the properties of these self-healing processes, and we can conclude that the methods really eliminate cracks in concrete, repairing itself autonomously, safely, being economically viable, and more effective than common repair processes.

Keywords: Structure. Self-Healing. Concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fissura no concreto	23
Figura 2 – Fissuras por retração na fase plástica do concreto	24
Figura 3 – Fissuras frente as tensões básicas.....	24
Figura 4 – Fissuras devido a compressão	24
Figura 5 – Efeito Pilha em meio de concreto	27
Figura 6 – Tipos de Corrosão em uma barra de aço imersa em meio ao concreto.....	27
Figura 7 – Desenvolvimento da reação álcali-agregado.....	29
Figura 8 – Tratamento de aberturas no concreto com aplicação do microconcreto fluido	31
Figura 9 – Tratamento de aberturas no concreto com métodos convencionais.....	31
Figura 10 – Ação das bactérias do bioconcreto	34
Figura 11 – Concreto autocicatrizante.....	37
Figura 12 – Causas para autocicatrização autógena no concreto	39
Figura 13 – Posto salva-vidas no lago de Galder na Holanda.....	48
Figura 14 – Recuperação da estrutura do posto salva-vidas na Holanda	48
Figura 15 – Laje de subpressão do Museu de Imagem e Som (MIS).....	49
Figura 16 – Laje fluida do Museu de Arte do Rio (MAR).....	50
Figura 17 – Meio de cultura e autoclave	51
Figura 18 – Meio de cultura com bactéria após estufa.....	52
Figura 19 – Corpo de prova prismático	53
Figura 20 – Plastificante, cicatrizante e fibra de vidro	55
Figura 21 – Mistura dos materiais e moldagem dos corpos de prova	56
Figura 22 – Corpos de prova imersos na água	56
Figura 23 – Análise de resistência à compressão	58
Figura 24 – Comparação da resistência dos concretos	60
Figura 25 – Despesas com manutenção no Rio de Janeiro	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de resultados de ensaios de compressão do bioconcreto	58
Tabela 2 – Demonstrativo dos valores obtidos no ensaio de compressão.....	59
Tabela 3 – Valor real gastos em manutenção com o uso dos métodos	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	JUSTIFICATIVA	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	CRONOLOGIA DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	16
3.2	CONCRETO	17
3.2.1	Propriedades do concreto	18
3.2.1.1	Estado fresco	18
3.2.1.2	Estado endurecido	18
3.3	DURABILIDADE E DETERIORAÇÃO.....	19
3.4	PATOLOGIAS DO CONCRETO	20
3.4.1	Permeabilidade e porosidade	21
3.4.1.1	Permeabilidade à água.....	21
3.4.1.2	Permeabilidade aos gases	22
3.4.1.3	Absorção da água	22
3.4.2	Fissuras.....	23
3.4.2.1	Controle de fissuração	25
3.4.3	Ataque por sulfatos	25
3.4.4	Corrosão de armaduras	26
3.4.4.1	Carbonatação	28
3.4.4.2	Cloretos e ácidos no concreto	28
3.4.4.2.1	<i>Reação álcali-agregado</i>	<i>29</i>
3.5	MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS	30
3.5.1	Métodos convencionais	30
3.5.2	Processos de autocura	32
3.5.2.1	Bioconcreto.....	33
3.5.2.2	Concreto autocicatrizante	36
3.5.2.2.1	<i>Autocicatrização autógena</i>	<i>38</i>
3.5.2.2.2	<i>Autocicatrização autônoma</i>	<i>40</i>
3.5.2.3	Bioconcreto x Concreto Autocicatrizante	41

3.6 TRABALHOS REFERENTES A RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS POR PROCESSOS DE AUTOCURA	42
4 METODOLOGIA.....	44
5 ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	47
5.1 APLICABILIDADE EM ESTRUTURAS	47
5.1.1 Aplicabilidade do bioconcreto em estruturas	47
5.1.2 Aplicabilidade do concreto autocicatrizante em estruturas.....	49
5.1.3 Discussão da aplicabilidade em estruturas	50
5.2 ANÁLISE DE ESTUDOS EM LABORATÓRIOS NO BRASIL	51
5.2.1 Estudo do bioconcreto em laboratório	51
5.2.2 Estudo do concreto autocicatrizante em laboratório	55
5.2.3 Discussão dos estudos em laboratório	57
5.3 ANÁLISE DE ENSAIOS DE RUPTURA	57
5.3.1 Ensaio de ruptura do bioconcreto.....	57
5.3.2 Ensaio de ruptura do concreto autocicatrizante	59
5.3.3 Discussão dos ensaios de ruptura dos métodos.....	60
5.4 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS MÉTODOS	61
5.4.1 Viabilidade do bioconcreto	61
5.4.2 Viabilidade do concreto autocicatrizante.....	61
5.4.3 Discussão de viabilidade dos métodos	62
5.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS	64
5.5.1 Vantagens e desvantagens do bioconcreto	64
5.5.2 Vantagens e desvantagens do concreto autocicatrizante	65
5.5.3 Discussão das vantagens e desvantagens dos métodos.....	65
6 CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

O trabalho apresenta uma estudo comparativo entre dois métodos de recuperação de estruturas por processos de autocura do concreto. O bioconcreto e o concreto autocicatrizante, são processos que estão em fase de testes, tanto em laboratório quanto em campo, e trazem propriedades que podem fazer com que esses processos de recuperação de estruturas de concreto no futuro sejam usados com frequência, devido a sua facilidade de utilização enorme, e por sua viabilidade econômica em evitar manutenções constantes.

Em nosso país a utilização de estruturas em concreto armado é muito forte, e como temos uma variação de temperatura muito grande durante os anos, é inevitável que a maioria dessas estruturas não apresentem patologias, por isso que devido aos métodos serem poucos explorados, e terem um vasto campo de utilização, e com propriedades que ajudam na recuperação das estruturas com essas manifestações patológicas por exemplo, é importante mostrar através desse trabalho, as funcionalidades e características de cada método de autocicatrização, a fim de solucionar problemas que os reparos comuns muitas vezes não adiantam em nada.

O bioconcreto, é composto por cápsulas que tem seu interior preenchidas por bactérias produtoras de calcário, tais bactérias que estão dentro do concreto encapsuladas, e que quando por intermédio de uma fissura são expostas a atmosfera e entram em contato com a água produzem o calcário preenchendo assim a fissura onde ali habitam. Tendo isso em mente, porque não as utilizar em ambientes mais úmidos e de difícil manutenção, como em túneis e em construções subterrâneas e que são mais propícios a proliferação de bactérias. Proporcionado assim uma menor manutenção, gerando uma economia e mais segurança para as estruturas e para as pessoas. (ARAUJO *et al.*, 2019)

Em relação ao concreto autocicatrizante, classificam-se as estruturas inteligentes em ativas ou passivas. No modo passivo, a estrutura possui a habilidade de reagir ao estímulo externo e iniciar o fenômeno de autocicatrização, sem necessitar de intervenção humana; já no modo ativo, o material demanda intervenção para que sejam acionados os mecanismos de autocura (GHOSH, 2009).

A pesquisa desse trabalho tem como objetivo detalhar a utilização dos dois processos de autocura do concreto, quais suas características e funcionalidades, e qual será mais eficiente nas estruturas, vamos identificar sua aplicabilidade, analisar estudos em laboratório aqui no Brasil, analisar os ensaios de ruptura, apresentar e analisar a viabilidade econômica entre os métodos, e identificar algumas vantagens e desvantagens desses métodos.

O trabalho da sequência com a revisão bibliográfica, de caráter exploratório realizada através de artigos científicos e livros, onde garantem a fidelidade dos dados, através de pesquisas posso mostrar toda a sequência introdutória para se compreender o que é o concreto, as suas propriedades e durabilidades, em patologias do concreto o porquê das estruturas apresentarem diferentes anomalias, como é realizado o método de recuperação das estruturas convencionais, até apresentar os métodos de autocicatrização que é o foco do trabalho, conseguindo assim fazer a comparação entre os dois tipos de processos de autocura do concreto.

Assim nos resultados e discussões veremos todos os detalhes técnicos apresentados nos objetivos, para conseguir concluir o estudo comparativo dos processos de autocicatrização tanto do bioconcreto quanto do concreto autocicatrizante, visando ajudar no conhecimento dessas técnicas, para serem estudadas afincamente e introduzidas com frequência nas estruturas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Como existe uma grande variedade de patologias que surgem nas estruturas de concreto, como por exemplo as fissuras e rachaduras, e como os métodos convencionais de recuperação de estrutura muitas vezes não resolvem o problema, vi a necessidade de pesquisar sobre materiais novos, e encontrei os processos de autocura do concreto, e resolvi apresentar algum estudo para contribuir com o desenvolvimento desses métodos.

Atualmente, manutenção e reparação de estruturas de concreto contam com programas de inspeção regular, que são onerosos e eles também dependem de uma combinação de ensaios não destrutivos e percepção humana (ALGHAMRI et al., 2016). Há outras técnicas para reparar as rachaduras pelos materiais constituintes do próprio concreto chamado concreto autocurável. (VIJAY et al., 2017).

Esse precipitado biogênico é ambientalmente amigável, mais durável e mais compatível com os materiais de construção, devido a isto, precipitação de carbonato induzido por microrganismos está sendo utilizada com o objetivo de aplicação na construção civil (WANG et al. 2015).

Tendo em vista que os métodos de recuperação de estruturas podem trazer soluções para a engenharia civil, é válido trazer esse estudo comparativo e ver qual desses métodos se destaca melhor nas estruturas. O conteúdo apresentado reforça todos os conceitos tradicionais que sabemos e traz um novo pensamento a partir da hora que entendemos como que funciona os novos processos de recuperação, por isso a importância de estarmos atualizados com todos os materiais que são pesquisados e introduzidos nos meios construtivos.

Então poder trazer algum desses novos conceitos em recuperação de estrutura, pode avançar muito as pesquisas no Brasil e quem sabe uma maior utilização desses métodos de autocura nas estruturas, tornando viáveis e que possam ser executados nas nossas obras.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo comparativo entre métodos de recuperação de estruturas com processos de autocura: bioconcreto e concreto autocicatrizante, visando obter informações técnicas de como funciona esses processos, e a existência de aplicações desses métodos em algumas estruturas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- a) Mostrar como que acontece esses processos de autocura do concreto e como aplicá-los;
- b) Detalhar a utilização dos dois métodos de recuperação de estrutura por processo de autocura, do bioconcreto e do concreto autocicatrizante;
- c) Expor a eficácia desses métodos;
- d) Identificar a aplicabilidade nas estruturas;
- e) Analisar estudos feitos em laboratórios no Brasil;
- f) Analisar os ensaios de rupturas;
- g) Analisar a viabilidade econômica de ambos os métodos;
- h) Identificar as vantagens e desvantagens dos métodos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CRONOLOGIA DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

O uso dos materiais de construção caminha junto com a própria história do homem, onde desde os primórdios ele sempre buscou um local para se abrigar e ter segurança para garantir sua sobrevivência e de quem estivesse com ele.

Com o passar do tempo e do desenvolvimento do conhecimento humano, começaram a ser identificados alguns materiais na natureza, onde eles começaram a modelar e adaptar conforme suas necessidades, então a madeira, as pedras, o barro e algumas fibras parecem ter sido os primeiros materiais identificados pelo homem.

Conforme o entendimento do homem em utilizar vários materiais, também foi aumentando e sua curiosidade em usar novas soluções, sua exigência foi aumentando e os padrões para o uso dos materiais também, um material com maior resistência, durabilidade e melhor aparência passou a ser cogitado por eles.

Os primeiros megalitos (grandes blocos de pedra), aparecem há aproximadamente cerca de 3000 a.C., onde hoje estão localizados na Espanha e no sul da França, perante forma de “dolmens” ou “antas” (mesas de pedra), (PETRUCCI, 1980).

Segundo Assunção (2005) os romanos, foram os primeiros a utilizar cinzas vulcânicas nos processos construtivos de seu império, após anos e com vários pesquisadores, engenheiros e químicos aplicando seus conhecimentos com o uso do gesso, pozolana e cal, onde somente no final do século XIX apareceu o cimento.

Em outubro do ano de 1824, Joseph Aspdin – empresário e fabricante de cimento do Reino Unido – evidenciou um aglomerante por meio do cozimento de mistura de argila e calcário, nomeando-o como “Cimento Portland”, uma vez que a sua cor, após o período de pega, assemelhava-se com a cor das pedras encontradas em Portland, cidade localizada no noroeste dos Estados Unidos. Entretanto, o material em questão tratava-se de uma cal hidratada artificial (ASSUNÇÃO, 2005).

O cimento conhecido atualmente só foi obtido no ano de 1845, por Isaac Charles Johnson. Em 1873, o produto passou a servir de complemento com gesso cru e cloreto de cálcio, cujo objetivo era a regulamentação do tempo de pega. No fim do século XIX, na Alemanha e na França, a tecnologia de aditivos foi impulsionada por meio da mistura de graxa de cal ao cimento, fazendo com que o mesmo apresentasse características plastificantes e hidrofugantes.

A partir de então, o cimento seria considerado como outro material de grande destaque no que diz respeito à composição do concreto armado (ASSUNÇÃO, 2005).

O concreto armado foi uma das grandes evoluções do homem na construção civil, quando o aço foi introduzido na aplicação do concreto se obteve uma resistência a tração e compressão bem maior, o estudo e aplicação desse material ganhou proporções enormes, onde sua utilização em grandes construções mundo a fora começou em grande escala e até nos dias de hoje é um dos métodos construtivos mais utilizados.

Todavia hoje, existem diversas indústrias que aperfeiçoaram o uso variado de tipos de materiais de construção, e evoluíram com os estudos dos materiais para que existam outros métodos a serem usados futuramente.

3.2 CONCRETO

“O concreto moderno, utilizado atualmente para construção dos mais diversos tipos de estrutura é fruto do trabalho de inúmeros homens, que durante milhares de anos observaram a natureza e se esmeraram por aperfeiçoar materiais, técnicas, teorias e formas estruturais.” (KAEFER, 1998).

Segundo Pinheiro *et al.*, (2007), o concreto é composto por agregados, aglomerantes e água. E cada composto deve ser utilizado em determinada quantidade, pois cada composto modifica a característica do concreto.

Os agregados segundo Pinheiro *et al.*, (2007), são partículas de minerais que são misturados juntos ao cimento, onde aumenta seu volume e assim consegue reduzir seu custo. Areia, pedras ou brita são usados geralmente como agregados e o aglomerante mais usado para unir todo o material é o cimento, e a água é utilizada para fazer a mistura de todos os componentes e realizar as reações químicas juntamente com o cimento, para que ocorra o endurecimento do concreto.

Mehta e Monteiro (2008) e Pedroso (2009), citam três razões por que o uso do concreto tomou proporção maior, comparado ao uso de outros tipos de materiais. A primeira razão é que o concreto possui uma resistência a água maior após o endurecimento, diferentemente do aço que enferruja e a madeira apodrece. Desta forma, temos um material ótimo para ser usado em construções que fazem armazenamento ou o transporte de água, pois historicamente, os romanos o utilizavam em cisternas e aquedutos. Atualmente a utilização do concreto tornou-se mais amplo, sendo empregado em estacas, fundações, pilares, vigas e lajes, que diariamente estão em contato com a umidade. A segunda razão é a sua plasticidade, onde permite executar

construções de diversas formas possíveis, ajudando muito a arquitetura contemporânea. Mehta e Monteiro (2008) ainda citam uma terceira razão para o amplo uso do concreto. Segundo eles e Isaia (2005) a grande motivação do uso do material se dá pelo baixo custo e a fácil obtenção de seus componentes.

3.2.1 Propriedades do concreto

O cimento quando entra contato com a água passa por um processo de hidratação, onde se tem reações químicas acontecendo constantemente. Esse processo é complexo e para avaliar a qualidade do concreto, é importante conhecer as suas propriedades, seja no estado fresco, desde o momento da colocação da água até o momento de adensar na fôrma, ou no estado endurecido, resistindo as tensões aplicadas ao longo da vida útil.

3.2.1.1 Estado fresco

Segundo Mehta (1994) e Monteiro (1994), a consistência do concreto fresco é relacionada com o estado de fluidez da mistura onde o concreto permanece plástico. A consistência, coesão e homogeneidade é fundamental para garantir a trabalhabilidade do concreto, facilitando com que o concreto possa ser colocado num certo tipo de fôrma, ser moldado facilmente, sem segregação.

A consistência do concreto é geralmente medida no ensaio de abatimento (slump test). O concreto fresco é compactado no interior de uma fôrma troco-cônica, com altura de 30 cm. Retirando-se da fôrma, por cima do concreto, este sofre um abatimento, cuja medida em centímetros é usada como valor comparativo da consistência (MEHTA *et al.*, 1994).

A dosagem do concreto deve levar em conta a consistência necessária para as condições da obra. Peças finas e fortemente armadas necessitam misturas mais fluidas que peças de grande largura e com pouca armação (CARVALHO *et al.*, 2015).

3.2.1.2 Estado endurecido

O concreto no estado endurecido é aquele que atinge seu estado sólido e obtém resistência mecânica máxima, e possui como propriedades a durabilidade, impermeabilidade, e a resistência à compressão. A resistência é medida através do rompimento de corpo de prova que está em condições específicas de humidade e temperatura, onde é esperado um tempo de 28 dias, para que seja concluído todo o processo de hidratação do cimento, ou seja sua cura.

Tradicionalmente a deformação decorrente de cargas aplicadas é expressa em deformação específica, definida como a mudança do comprimento por unidade de comprimento; a carga é expressa em tensão, definida como a força por unidade de área. Dependendo de como agem sobre o material, as tensões poderão ser distinguidas umas das outras: por exemplo, compressão, tração, flexão, cisalhamento e torção. As relações tensão-deformação dos materiais são geralmente expressas em termos de resistência, módulo de elasticidade, ductilidade e tenacidade esclarece (CARVALHO et al., 2015).

Segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015), concreto para fins estruturais são classificados conforme a resistência à compressão, determinada a partir da ruptura do corpo de prova, onde o concreto para fins estruturais deve atingir resistências entre 20 e 100 MPa.

As propriedades do concreto endurecido estão na obtenção de um concreto de boa qualidade para qual é necessário empregar materiais de boa qualidade, dosá-los em proporções adequadas e colocar o concreto nas fôrmas sem provocar segregação dos componentes compactando o concreto por meio de vibração (CARVALHO et al., 2015).

3.3 DURABILIDADE E DETERIORAÇÃO

A durabilidade pode ser definida como sendo a capacidade que o concreto possui de resistir à ação do tempo, aos ataques químicos, à abrasão ou a qualquer outra ação de deterioração. A durabilidade depende, entretanto, do tipo de ataque, físico ou químico, que o concreto, depois de endurecido, será submetido, devendo ser analisado criteriosamente antes da escolha dos materiais e da dosagem (ARAÚJO, RODRIGUES & FREITAS, 2000).

Nenhum material é inerentemente durável, como um resultado de interações ambientais, a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades dos materiais mudam com o passar do tempo. Admite-se que um material atingiu o fim da sua vida útil quando as suas propriedades sob dadas condições de uso deterioram a um tal ponto que a continuação do uso deste material é considerada, como insegura, ou antieconômica. (MEHTA, MONTEIRO, 1994).

Segundo Piancastelli (1997) e Reis (2001), teve muita coisa que evoluiu na engenharia, porém, com toda essa evolução o que não desapareceu foi a incidência de manifestações patológicas e acidentes, ao longo de várias construções causando assim, prejuízos enormes.

3.4 PATOLOGIAS DO CONCRETO

Desde o início da civilização o homem tem se preocupado com a construção de estruturas adaptadas às suas necessidades, sejam elas habitacionais ou de infraestrutura. Em função disso, acumulou-se um grande acervo científico ao longo dos séculos, o que permitiu o desenvolvimento da tecnologia da construção, abrangendo a concepção, o cálculo, a análise e o detalhamento das estruturas, a tecnologia de materiais e as respectivas técnicas construtivas (SOUZA et al., 1998).

As falhas humanas durante a construção de uma estrutura são frequentes, tendo sua origem, na maioria das vezes, por falta de qualificação profissional, ou seja, de mão de obra especializada, o que pode acarretar a estrutura manifestação de problemas patológicos futuros (MORAES VIEIRA, 2016).

A grande maioria dos problemas patológicos expõem manifestações particulares, que examinados pode-se julgar a natureza, a origem e os mecanismos dos fenômenos abrangidos, com o objetivo de se conseguir suas prováveis decorrências. Os sintomas, também chamados: lesões, danos, defeitos ou manifestações patológicas, podem ser avaliados e qualificados para nortear uma primeira apreciação, partindo de meticulosas notas visuais. As indicações mais frequentes de danos em edificações de concreto armado são: fissuras, eflorescências, flechas excessivas, manchas, corrosão de armaduras e ninhos de concretagem, segregação dos materiais constituintes do concreto (HELENE et al, 2011).

A vida útil de uma estrutura depende de vários fatores, para que a mesma permaneça muito tempo intacta, dentre eles a forma como foi projetada, a mão de obra usada na execução, os componentes adicionados nos materiais, os fatores externos como clima, temperatura, produtos químicos entre outros, tudo pode favorecer a formação de patologias na estrutura, e para evitar isso todo detalhamento e informação disponível no projeto pode influenciar na execução e na durabilidade da estrutura.

Por isso a importância de a estrutura ter um concreto especificado, e testado e com o tempo de cura respeitado, para não aparecer manifestações patológicas na estrutura com o decorrer do tempo. E caso isso não ocorra, com certeza haverá o aparecimento de fissuras na estrutura, penetração de água, corrosão da armadura que acarretará o desgaste da estrutura e por em risco a vida dos usuários.

3.4.1 Permeabilidade e porosidade

A relação com a quantidade de ligante é o elemento básico que irá reger características como densidade, compactidade, porosidade, permeabilidade, capilaridade e fissuração, além da resistência mecânica do concreto, que em resumo, são os indicadores de qualidade do material, primeiro passo para a classificação de uma estrutura como durável ou não (RIPPER; SOUZA, 1998).

A permeabilidade faz com o concreto tenha uma durabilidade maior, mais o que regula ele é a relação água-cimento que apresenta na estrutura, por isso que quanto mais baixo for a permeabilidade do concreto, mais resistente ele será.

A água numa estrutura é capaz de transportar substâncias que podem causar danos ao material, por isso que a sua redução é uma excelente forma de evitar o processo de deterioração, na sua armadura.

A porosidade do concreto é formada durante a hidratação do cimento, onde acaba sendo responsável pela passagem da água, gases e outras substâncias corrosivas para a parte interna do material. O ideal é fazer com que o concreto tenha poucos poros, pois eles são os que mais ajudam a entrada de agentes degradantes.

Para diminuir a porosidade do concreto é necessário ter uma baixa relação água/cimento, usar micro sílica (sílica ativa), só assim pode-se garantir a redução de permeabilidade no concreto e elevar sua resistência mecânica.

3.4.1.1 Permeabilidade à água

A permeabilidade do concreto à água depende da relação água/cimento utilizada na mistura, a qual determina o tamanho, volume e continuidade dos poros capilares, como depende também, da dimensão máxima dos agregados, que influencia nas microfissuras da zona de transição (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A permeabilidade à água é a principal característica que define a durabilidade do concreto, pois quando seus poros estão saturados, haverá presença de manifestações patológicas no concreto.

3.4.1.2 Permeabilidade aos gases

A permeabilidade aos gases do concreto não é um mecanismo muito comum em estruturas de concreto, no entanto, por meio desses ensaios, tem se buscado caracterizar a sua porosidade e correlacioná-la com os mecanismos de difusão de dióxido de carbono, de oxigênio e se estabelecer parâmetros de durabilidade (NEPOMUCENO, 2005).

As permeabilidades aos gases de boas argamassas e concretos é tão baixa, que são raras as determinações precisas dessa propriedade. Sob iguais gradientes de pressão, o oxigênio deve penetrar através do concreto mais rapidamente que o CO_2 , vapor de H_2O ou água, devido às suas características moleculares, mais dificilmente os gradientes de pressão são elevados (HELENE, 1986).

Segundo Helene (1986), os gases agressivos são gerados a partir dos interceptores de esgoto e do deslocamento dos fluidos, onde afeta a permeabilidade do concreto, pois é gerado sulfetos (S^{--}) em forma de gás sulfídrico H_2S , que consegue oxidar os gases quando se entra em contato com o concreto, que junto com as bactérias aeróbias, acelera o processo de corrosão da armadura.

A penetração de gases só ocorre pois há áreas mais permeáveis e porosas no concreto, isso deixa a resistividade do concreto baixa, sendo que para um concreto de alta resistividade a baixa porosidade é conseguida com um baixo valor de água de saturação do concreto.

3.4.1.3 Absorção da água

A absorção de água é o mais difícil de controlar no concreto, reduzir o fator de água/cimento ajuda na absorção, porém ao tornar o concreto mais compacto, diminui o diâmetro e aumenta a pressão dentro dos capilares e assim uma rápida absorção de água acontece.

Os concretos porosos absorvem pouca água, mas geram vários problemas ao longo do tempo de permeabilidade e carbonatação.

Segundo Helene (1986), a melhor solução é adicionar ao concreto aditivos incorporadores de ar e de ação hidrofugante, pois assim as bolhas de ar incorporadas ao concreto têm a propriedade de cortar a comunicação entre os capilares e diminuir a absorção de água.

3.4.2 Fissuras

As fissuras são manifestações patológicas na construção que aparecem nas superfícies do concreto, elas indicam naquele local em que aparecem alguma anomalia na estrutura, em casos graves até um possível colapso. Uma fissura deve ser analisada por profissionais especializados, para definir essa causa de manifestação patológica, onde ele irá avaliar se um reparo estrutural resolve o problema ou se então precisa demolir a estrutura, mais a demolição só acontece em casos extremos.

As fissuras são uma porta de entrada para agentes agressivos tanto químicos quanto biológicos, onde agredem a estrutura na parte da corrosão das armaduras, desagregação do concreto e no seu desgaste. A figura 1 representa uma fissura ocorrida no concreto.

Figura 1 – Fissura no concreto



Fonte: <http://www.clubedoconcreto.com.br.html> (Acessado 11 de abril 2021).

O aparecimento de fissuras é instigado por tensões, essas tensões são originadas pelos elementos e componentes de uma edificação quando toleram variações térmicas, sazonais e diárias. Essas variações cogitam numa modificação dimensional dos materiais de construção (dilatação ou contração); os movimentos de dilatação e contração são limitados pelos múltiplos vínculos que abrangem os elementos e componentes (THOMAZ, 1989).

As fissuras podem ainda ocorrer por outras causas, como retração plástica térmica ou devido a reações químicas internas do concreto nas primeiras idades, devendo ser evitadas ou limitadas por cuidados tecnológicos, especialmente na definição do traço e na cura do concreto (NBR 6118, ABNT 2014).

Os fatores que mais originam as fissuras, são tipicamente ocasionados por: retração, variação de temperatura, esforços de tração compressão, flexão cortante, torção, ou então

causadas por corrosão nas armaduras, recalque das fundações ou movimentações higroscópicas (CAMADURO *et al*, 2000).

Abaixo figura 2 apresentando fissuras por retração na fase plástica do concreto.

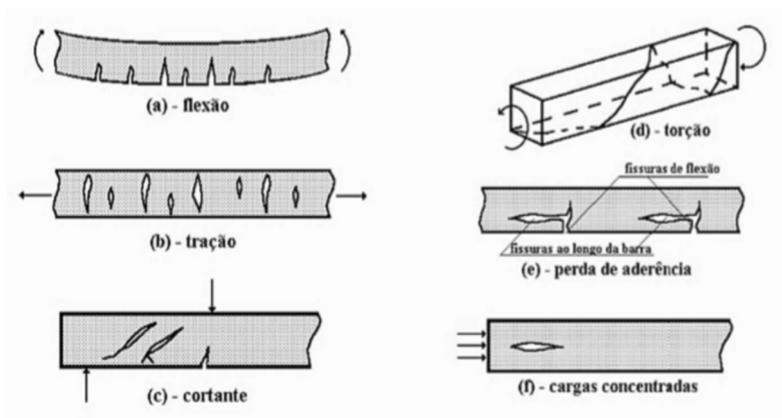
Figura 2 – Fissuras por retração na fase plástica do concreto



Fonte: <http://construcaomercado.pini.com.br> (Acessado 11 de abril 2021).

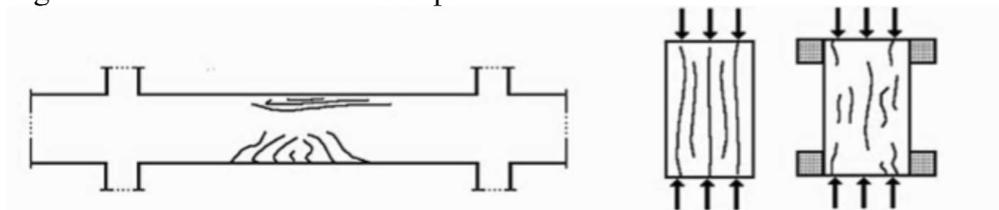
As tensões normais são causadoras das fissuras na estrutura e elas podem ser de tração ou de compressão, já as tangenciais podem ser de cisalhamento ou de torção. Nas figuras 3 e 4 abaixo temos uma percepção de como essas fissuras atuam na estrutura.

Figura 3 – Fissuras frente as tensões básicas



Fonte: Ripper e Souza (1998, p. 58).

Figura 4 – Fissuras devido a compressão



Fonte: Ripper e Souza (1998, p. 58).

3.4.2.1 Controle de fissuração

Segundo (Souza e Ripper, 2009), um engenheiro perito em patologias deve realizar um levantamento, entender o comportamento da estrutura, e ver a origem da patologia e identificar as técnicas e medidas a serem tomadas para um eventual reparo. Dependendo do grau de comprometimento da estrutura ou do custo de reparo o engenheiro pode determinar a demolição do elemento estrutural afetado.

Fissuração em elementos estruturais de concreto armado é inevitável, devido à grande variabilidade e à baixa resistência do concreto à tração; mesmo sob as ações de serviço (utilização) valores críticos de tensões de tração são atingidos. Visando obter bom desempenho relacionado à proteção das armaduras quanto à corrosão e à aceitabilidade sensorial dos usuários, busca-se controlar a abertura dessas fissuras (NBR 6118, ABNT 2014).

3.4.3 Ataque por sulfatos

As obras normalmente atacadas são as que estão em contato direto com o solo ou com as águas naturais ou de efluentes, portanto, as estruturas de fundações, de sistemas de esgotamento, de ambientes marinhos, entre outras (MATTOS, 2015).

Segundo Neville (1997), os ataques por sulfatos não geram somente a desagregação por expansão e fissuração, mas também influenciam na perda da resistência do concreto por causa da perda da coesão e pela perda da aderência entre a pasta de cimento e as partículas de agregado. O ataque por sulfatos consegue ser identificado no concreto pois ele cria uma aparência esbranquiçada, no início a deterioração começa pelos cantos e arestas, logo em seguida o concreto começa a fissurar e lascas.

Em relação as manifestações patológicas têm-se que as principais são a alteração para coloração esbranquiçada ou marrom do concreto, e, em virtude da expansão advinda da etringita formada e das possíveis corrosões do aço, da desagregação e fissuração do concreto. Pode-se verificar ainda a ocorrência de amolecimento da pasta do concreto endurecido quando em casos de formação de taumasita (mineral de silicato) (MATTOS, 2015).

Uma das formas para fazer com que a estrutura tenha uma defesa ao ataque de sulfatos é a diminuição de aluminato de cálcio do cimento, e adicionar óxido férrico, para que seja produzido o Ferro-aluminato tetracálcico, que é muito resistente ao ataque químico. Os concretos que são resistentes a sulfatos não devem eliminar totalmente o aluminato de cálcio na sua pasta, pois o aluminato tem um efeito que diminui o ataque de cloretos nas armaduras.

3.4.4 Corrosão de armaduras

A corrosão das armaduras é uma das manifestações patológicas mais comuns em estruturas de concreto, pois sua existência provoca a deterioração, e afeta a durabilidade, e a estabilidade das estruturas.

Embora a ocorrência dessa manifestação se dê de forma lenta, ela afeta a resistência, a permeabilidade danificando a estrutura. Sendo um problema crônico para os profissionais da área, além do mais a corrosão é diferente em cada estrutura e pode ser causada por processos, biológicos, químicos e físicos, sendo difícil seu diagnóstico e manutenção (GIONGO, 2015).

Segundo Helene (1986), a corrosão das armaduras pode acontecer de duas formas, sendo por reação eletroquímica ou por reação química.

Segundo Gentil (2007), em muitos casos as armaduras duram muito tempo a agentes agressivos, entretanto a casos que o processo é rápido e progressivo, pois não há conformidade de corrosão por toda a armadura, e existem trechos em que o processo é mais acentuado do que em outros.

O agir de corrosão no aço tem um estágio inicial em que agentes agressivos alteram o estado do concreto ao redor da haste, removem o reforço e formam células corroídas que causam o crescimento corrosivo. A corrosão geralmente é a ocorrência de deterioração por ação química ou eletroquímica em contato com meio externo, em materiais metálicos. As químicas ocorrem por meio de contato direto com o meio corrosivo, já as eletroquímicas ocorrem devido a presença de um eletrólito em solução aquosa que será responsável pela formação e migração de partículas carregadas até o meio a ser deteriorado (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013).

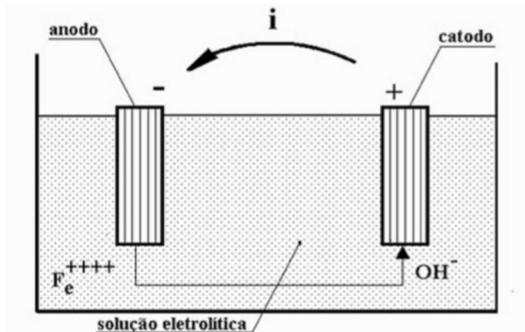
Para que ocorra esta manifestação faz-se necessário existência de água que é representada pelo eletrólito, oxigênio e uma diferença de potencial (HELENE, 1986).

Quando se submerge um aço em uma solução transforma-se átomos desse material em cátions de ferro. Essa situação com presença de reagentes capazes de combinar com elétrons liberado na reação, acarreta na produção de íons de ferro (HELENE, 1986).

Existindo um anodo, catodo, eletrólito e condutor metálico “qualquer diferença de potencial que haja entre as zonas anódicas e catódicas acarreta o aparecimento de corrente elétrica. Dependendo da magnitude dessa corrente e do acesso de oxigênio, poderá ou não haver a corrosão” (HELENE, 1986).

Com isso o efeito pilha acontece onde a corrosão é instalada pela geração de uma corrente elétrica conduzida do anodo para o catodo, como é identificado na figura 5, esta é uma das reações mais encontradas no concreto.

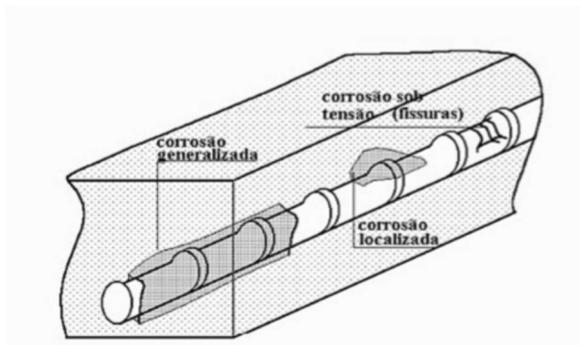
Figura 5 – Efeito Pilha em meio de concreto



Fonte: Ripper e Souza (1998, p. 67).

A corrosão pode ser classificada da seguinte forma: corrosão sob tensão fraturante, corrosão da fragilização pelo hidrogênio e corrosão por pite. A primeira ocorre em conjunto com uma tensão de tração, dando origem a propagação de fissuras. A segunda é ocasionada por hidrogênio atômico que se difunde ao interior do aço da armadura e possibilita a fragilização com consequente perda de ductibilidade e possibilidade de fratura da armadura. Por fim a corrosão por pite pode se revelar de duas formas, localizada que é caracterizada pela ação de cloretos sempre que haja umidade e oxigênio e a generalizada que ocorre em função da redução de pH do concreto com valores menores que nove (RIPPER; SOUZA, 1998).

Figura 6 – Tipos de Corrosão em uma barra de aço imersa em meio ao concreto



Fonte: Ripper e Souza (1998, p. 66).

Como os agentes deteriorantes fazem um grande estrago com a corrosão da armadura, controlar os processos de permeabilidade do concreto é fundamental para evitar estes problemas. Entretanto, existem outras maneiras de evitar a corrosão que são menos prejudiciais do que fazer um concreto com baixa permeabilidade. Pode-se adotar revestimento para as barras de aço para evitar com que os agentes corrosivos não ataquem a estrutura. Existem dois revestimentos protetores para as barras de aço, o revestimento anódico onde as barras de aço são revestidas com zinco, esse processo é chamado de galvanização, e tem o revestimento por barreira, onde as barras são revestidas com epóxi.

3.4.4.1 Carbonatação

A carbonatação é um fenômeno natural no concreto, que podem desencadear nas estruturas, o aparecimento de manifestações patológicas. Isso pode ocorrer devido a um processo físico-químico que ocorre na estrutura e facilita a entrada do dióxido de carbono (CO_2) nos poros do concreto, onde acelera o processo de carbonatação. Se a carbonatação for avançando no interior do concreto e conseguir alcançar a armadura, ocorre a despassivação do aço, onde deixa a armadura vulnerável ao processo de corrosão.

O aço é protegido por uma camada, que funciona como filme, de óxidos ricos em cromo que aderem ao aço, o protegendo da corrosão, a desestabilização desse filme passivante de óxidos, é chamado de despassivação do aço (NETO, 2013).

Neville & Brooks (2013), observaram que com o aumento do período da cura, ampliando a molhagem de um dia para três dias, conseguiu-se uma redução da profundidade de carbonatação em cerca de 40%.

Como já citado anteriormente a fator água/cimento tem uma importância na permeabilidade aos gases, onde também influencia na velocidade desse fator agressivo.

A carbonatação ocorre em todas as estruturas, mas podemos tomar medidas para controlar esse fenômeno.

3.4.4.2 Cloretos e ácidos no concreto

Um dos agentes mais agressivos as estruturas de concreto é a atmosfera marinha, considerando que íons de cloreto e de magnésio estão em suspensão no ar.

“Os íons cloreto podem entrar no concreto vindos do ambiente externo, principalmente nas estruturas expostas à névoa salina e a altas taxas de poluentes ou estar contido no concreto devido ao uso de água ou agregados contaminados”. (DOTTO, 2012)

Por isso a presença de altos teores de cloreto no concreto, as vezes geram alguns inconvenientes na estrutura com as aparições de manifestações patológicas.

Os cloretos conseguem provocar a corrosão do alumínio e aceleram a corrosão no aço quando estes são utilizados juntos na mesma estrutura.

Os ácidos podem ser inorgânicos ou orgânicos, sendo de qualquer forma perigosos para o concreto. O ácido quanto age do concreto, provoca a destruição da pasta de cimento e logo em seguida ataca a armadura. É muito comum problemas patológicos na estrutura ocasionados pelos poluentes na atmosfera, que são responsáveis pela chuva ácida.

Um dos componentes da chuva ácida são provenientes dos óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre, que acumulam na atmosfera, por causa dos agentes poluentes que podem provir da queima de combustíveis, indústrias e usinas termelétricas. Estas substâncias, em conjunto com oxigênio e a umidade, ganham forma na atmosfera e geram os ácidos sulfurosos (H_2SO_3). Estes ácidos formam a chuva ácida, que quando retornam se depositam nas estruturas de concreto, ocasionando vários problemas, como a ação química que acontece na pasta de cimento e chega até as armaduras.

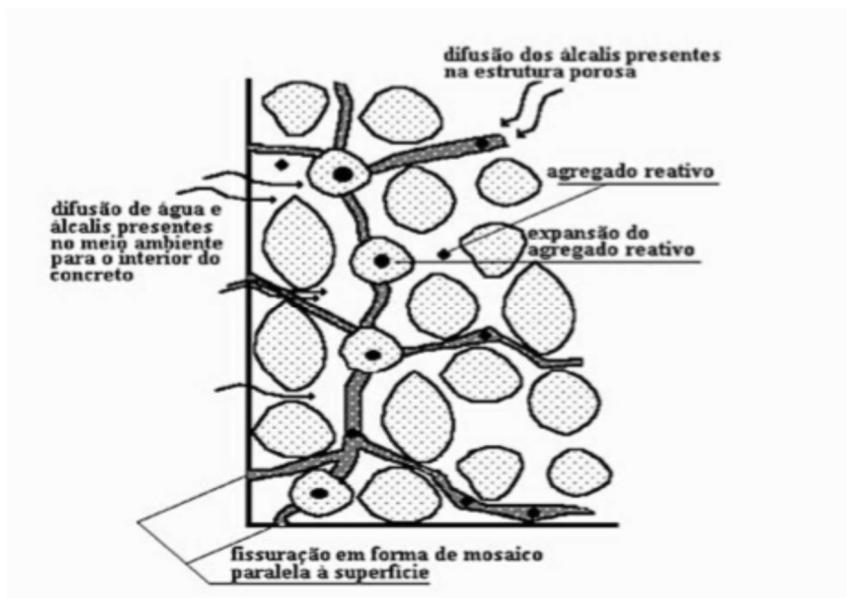
3.4.4.2.1 Reação álcali-agregado

A reação álcali-agregado ou RAA, é uma reação química que acontece por dentro da estrutura de concreto, ela é uma interação que atinge os íons álcalis (Na^+ e K^+) presentes no cimento e alguns tipos de minerais usados como agregados. Geralmente os álcalis ou hidróxidos alcalinos podem surgir através da água de amassamento, aditivos químicos, ou de outras adições pozolânicas na mistura da massa cimentícia.

O RAA é uma reação expansiva, que compromete a durabilidade de uma estrutura, pois ela é caracterizada por gerar um gel que se expande entre a pasta do agregado e os vazios do concreto, causando a fissuração da superfície e deslocamentos diferenciais no concreto.

O gel sílico-alcalino caracteriza-se por ser hidrófilo e sob condição de umidade aumenta volumetricamente, gerando tensões suficientes para danificar a estrutura do concreto (COLLINS, 2007; POOLE, 1992).

Figura 7 – Desenvolvimento da reação álcali-agregado



3.5 MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS

O objetivo do processo de recuperação é reestabelecer as características previstas em projeto, conferindo atributos de durabilidade a uma estrutura que, por algum motivo, encontra-se deteriorada (QUESADA, 2003).

Manutenção de uma estrutura é o conjunto de tarefas necessárias à garantia do seu desempenho satisfatório ao longo do tempo, ou seja, o conjunto de rotinas que tenham por finalidade o prolongamento da vida útil da obra, a um custo compensador. Em termos de manutenção fica clara a corresponsabilidade, pois proprietários, investidor e usuários sempre deverão estar dispostos a amparar os custos com o sistema de manutenção concebido pelos projetistas, que deverá ter sido respeitado e viabilizado pelo construtor. A base deste sistema, aliás, será o conjunto de inspeções rotineiras, em que o usuário será figura preponderante (SOUZA, 1998).

Ressalta-se a importância de garantir a segurança da estrutura durante o procedimento de reparo com o uso de escoramento, caso seja necessário. Os elementos de escoramento devem ser dimensionados em caso com o máximo rigor profissional, ajustando-os às soluções escolhidas (AGUADO et al, 2003).

O procedimento mais comum para a recuperação de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão envolve a remoção dos materiais das áreas deterioradas e a substituição por material novo, sendo essa metodologia largamente utilizada no mundo todo (LOURENÇO, 2014). Os elementos utilizados em reparos vão desde materiais normalmente utilizados na etapa da construção até materiais específicos para reparo e com características específicas para cada tipo de reparo (BAUER, 2008).

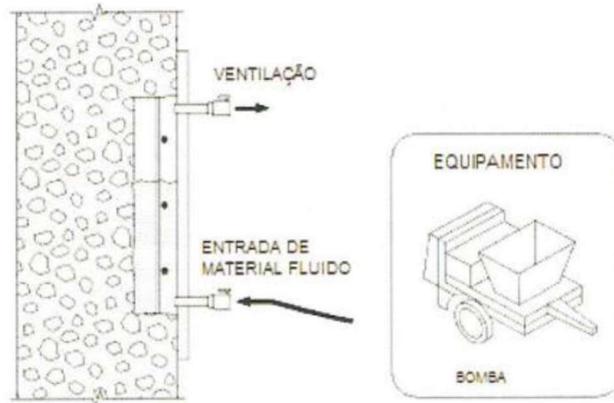
3.5.1 Métodos convencionais

Diferentes estratégias são usadas para retardar a propagação das aberturas no concreto levando a maior durabilidade. No entanto, a maioria das estratégias, como sistemas epóxi, resinas acrílicas e silicone com base em polímeros, envolvem o uso de materiais que não são compatíveis com concreto, caro e perigoso principalmente ao ambiente (KHALIQ et al, 2016).

Para o tratamento convencional de uma estrutura, deve-se fazer um corte do contorno da abertura no concreto com espessura entre 0,5 e 1,0 cm, limpeza da superfície com jato de água fria sob alta pressão, jato de água quente sob alta pressão, remoção de óleos e graxas superficiais, montagem da forma e aplicação do microconcreto fluido (HELENE et al, 2011).

As figuras abaixo demonstram tratamentos de aberturas de concreto com métodos convencionais.

Figura 8 – Tratamento de aberturas no concreto com aplicação do microconcreto fluido



Fonte: <http://www.reitec.com.br> (Acessado 11 de abril 2021).

Figura 9 – Tratamento de aberturas no concreto com métodos convencionais



Fonte: <http://www.reitec.com.br> (Acessado 11 de abril 2021).

Temos os reparos profundos também que segundo Souza; Ripper (1998), são aqueles cuja estrutura tenha rupturas com profundidades superiores a 5,0 cm.

Conforme Piancastelli (1998), os reparos profundos são feitos com a retirada do concreto deteriorado ou contaminado, um exemplo é o ninho da concretagem (segregações).

Segundo Helene (1988), utiliza-se a argamassa seca, graute de base mineral, concreto ou concreto pré-acondicionado, para realizar o reparo. Souza & Ripper (1998), sugerem a utilização de argamassa seca ou convencional, com adesivo PVA ou acrílico para o reparo.

3.5.2 Processos de autocura

Dentro da construção civil, os materiais chamados de “inteligentes” ainda são escassos e o seu potencial de uso ainda demanda disseminação no setor. Eles consistem naqueles materiais que detectam as mudanças que ocorrem no ambiente e respondem a essas de maneira previamente estabelecida fazendo analogia ao que acontece nos organismos vivos. São constituídos por um composto que opera como sensor, detectando a alteração, e um agente atuante, o qual efetua uma resposta e consequente adaptação (MIHASHI; NISHIWAKI, 2012; MOREIRA, 2016).

Em relação a autocicatrização, classificam-se as estruturas inteligentes em ativas ou passivas. No modo passivo, a estrutura possui a habilidade de reagir ao estímulo externo e iniciar o fenômeno de autocicatrização, sem necessitar de intervenção humana; já no modo ativo, o material demanda intervenção para que sejam acionados os mecanismos de autocura (GHOSH, 2009).

A cicatrização autógena consiste na habilidade intrínseca do concreto de se regenerar, preenchendo vazios e reparando eventuais fissuras, por meio de fatores associados apenas ao próprio material. Sendo que a concepção da palavra “autógena” enfatiza que esse processo acontece em materiais cimentícios sem interferência externa, similar aos fenômenos de regeneração observados no corpo humano (recuperação dos tecidos da pele e das estruturas ósseas, por exemplo). Em relação a essa autocicatrização, apesar de o processo ser conhecido, as informações sobre seus efeitos benéficos e suas limitações não são completamente compreendidas (DE BELIE et al., 2018).

A classificação dos mecanismos de autocicatrização em materiais cimentícios nem sempre é uma tarefa fácil diante de todas as terminologias existentes na literatura. Assim, devido à grande quantidade de trabalhos abordando o tema e à falta de padronização, os comitês técnicos criados no JCI e RILEM buscaram sistematizar esses conceitos (BERNARDINO DA SILVA, 2016).

Atualmente, manutenção e reparação de estruturas de concreto contam com programas de inspeção regular, que são onerosos e eles também dependem de uma combinação de ensaios não destrutivos e percepção humana (ALGHAMRI et al., 2016). Há outras técnicas para reparar as rachaduras pelos materiais constituintes do próprio concreto chamado concreto auto-curável. (VIJAY et al., 2017).

Com a descoberta da função de algumas bactérias marinhas, para a formação de calcita no mar, foi que surgiu a precipitação de carbonato de cálcio por bactérias marinhas. Os avançados estudos realizados podem verificar que a calcificação é um processo rotineiro no solo e a formação de calcita mostrou resultados com algumas bactérias presentes no solo.

Bactérias são capazes de mediar a precipitação de minerais, com a mineralização biologicamente controlada como a formação de magnetita por bactérias, ou por mineralização biologicamente induzida, que são os processos dominantes entre bactérias. Sob condições apropriadas, a maioria das bactérias são capazes de induzir a precipitação de carbonato. Esse precipitado biogênico é ambientalmente amigável, mais durável e mais compatível com os materiais de construção; devido a isto, a precipitação de carbonato induzido por microrganismos está sendo utilizada com o objetivo de aplicação na construção civil (WANG et al. 2015).

3.5.2.1 Bioconcreto

Conforme Nascimento (2018), o estudo e pesquisa para chegar ao bioconcreto teve início em 2006, na Universidade de Tecnologia de Delft na Holanda, pelo Microbiologista e Professor Henk M. Jonkers, e pelo Engenheiro especialista em materiais de construção civil Eric Schlangen, ambos tinham em mente solucionar um dos grandes problemas da engenharia civil.

Como a maiorias das estruturas de concreto fissuram com o tempo, as infiltrações por capilaridade através dessas fissuras são muito frequentes, faz com que a umidade percorra pela estrutura causando assim o desgaste e enfraquecimento, e a oxidação das barras de aço tirando aos poucos toda a resistência dos materiais. (MAZER, 2008).

Segundo Jonkers (2007), o início da pesquisa em concreto aconteceu a partir de um projeto interessante de estudar o potencial de cura de diferentes materiais, tais como plástico, poliuretano e asfalto, foi quando Henk estava estudando e analisando a regeneração do corpo humano e pode notar que, nosso corpo possui células que produz minerais que criam a estrutura e se reparam sozinhas, por exemplo os ossos e pele, quando são fragmentados eles conseguem se regenerar sozinhos, então porque os prédios não podem fazer a mesma coisa?.

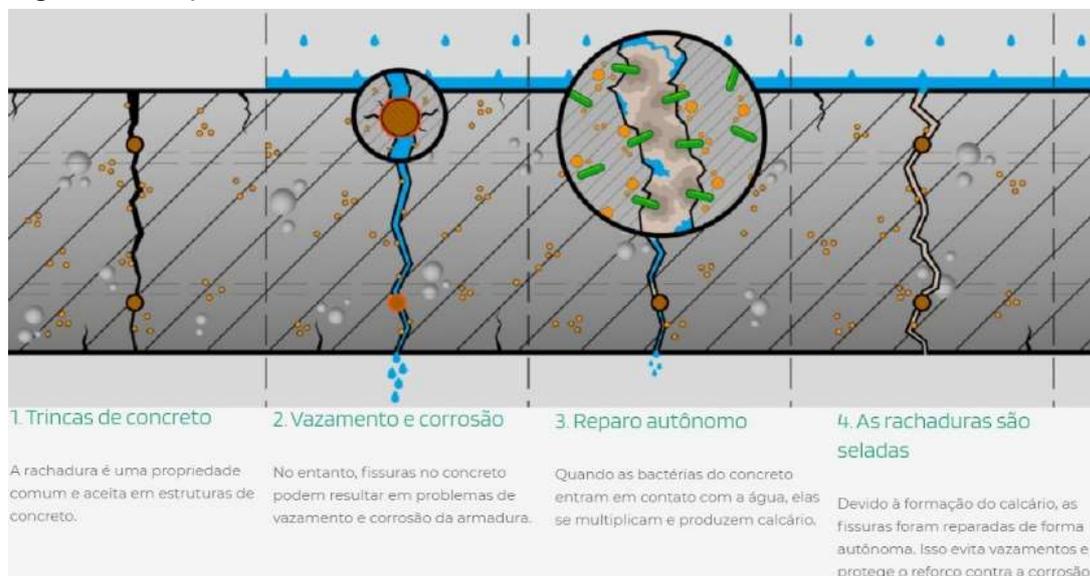
Jonkers (2010), afirma que em 2009 depois de variadas tentativas, chegaram nos testes com bactérias produtoras de calcário. Descobriram que específicas bactérias resistiam aos processos químicos do concreto e ainda os regenerava. Como o concreto é um ambiente alcalino tendo um ph de até 13 quando misturados, a maioria dos microrganismos não sobrevive a esses

ambientes e as bactérias do tipo *Bacillus pseudofirmus* e *Sporosarcina pasteurii*, são as que se desenvolvem nesses ambientes alcalinos e naturais. Essas bactérias são encontradas em lagos com águas altamente alcalinas com pH elevado acima de 10, ou em crateras com vulcões ainda em atividade e em solos ricos em carbonatos em áreas desérticas da Espanha e lagos de soda no Egito.

Segundo Silva e Passarini (2017), para fazer o bioconcreto, é necessária uma cadeia da bactéria onde inicialmente elas podem estar encapsuladas junto com o lactato de cálcio em pastilhas de argila expandida, ou ser aplicada a solução com as bactérias direto na água com o lactato de cálcio, e todo os outros agregados e cimento para fazer a mistura de concreto.

A função da bactéria misturada ao concreto é de se alimentar do lactato de cálcio, onde origina a calcita que é o mineral constituinte do calcário, em seu processo digestivo. Elas podem ficar em estado dormente por até 200 anos, e só começam a agir na estrutura quando aparecer fissuras ou rachaduras, onde o material vai obter contato com o ar, umidade ou água, e aciona a bactéria e ela começa a se alimentar. Conseguindo assim regenerar ou selar as fissuras do concreto com até 8 milímetros de espessura, não tendo limites para a extensão da fissura, e podendo levar até 3 semanas para concluir o processo de regeneração. (ARAÚJO et al. 2019).

Figura 10 – Ação das bactérias do bioconcreto



Fonte: <https://www.basiliskconcrete.com/waterdicht-beton-vanaf-de-betoncentrale>. (Acessado 13 de out 2021).

Uma cicatrização contínua de fissuras particularmente superficiais resulta em uma menor permeabilidade do material e um risco significativamente reduzido de degradação prematura da matriz e corrosão do reforço de aço embutido devido à entrada de água e produtos químicos agressivos (JONKERS, 2007).

Conforme Brito et al. (2018), o bioconcreto é uma mistura do concreto tradicional, bactérias e lactato de cálcio (alimento das bactérias), uma vez que, a bactéria é ativada quando entra em contato com a água ou oxigênio. Se o concreto começa a se degradar, os *Bacillus Pseudofirmus* se abrem e por meio de reações químicas, as bactérias auxiliam na regeneração do concreto.

O bioconcreto, conhecido também como “concreto auto curável” consiste na mistura do concreto com bactérias produtoras de calcário. Quando o concreto é fissurado as bactérias produzem calcário e reestruturam a falha formada. Para manter as bactérias dormentes até que ocorra a patologia, as mesmas são encapsuladas em partículas pequenas compostas de argila expansível e lactato de cálcio. Assim, quando as fissuras ocorrem, as cápsulas são degradadas e as bactérias entram em contato com a água e começam a se alimentar do cálcio que reage com o carbono e produz o calcário, que por sua vez preenchem as fissuras existentes (OLIVEIRA, 2015; TAKAGI, 2013).

Silva e Passarini (2017) avaliaram a capacidade de autorregeneração, a durabilidade e a eficiência do bioconcreto, e concluíram que o uso do bioconcreto reduz custos de manutenção e reparos e estende a vida útil de construções além de ser um material sustentável.

Segundo Mendes et al., (2016) a utilização de bactérias dormentes na mistura do concreto, além de corrigir as fissuras, aumentar o tempo de vida das estruturas e garantir condições seguras de uso desta, também diminui a necessidade de realização de manutenções e permite que estas sejam feitas em locais de difícil acesso devido à autonomia do concreto.

Segundo Rebeca (2017), em 2015 Henk Jonkers, foi premiado como o melhor europeu inventor, onde Henk afirmou que o bioconcreto vai revolucionar a maneira como construímos, pois nos inspiramos na natureza.

A invenção de Henk, abriu os olhos e a percepção do mundo da engenharia civil, abrindo espaço para outras pessoas desenvolverem estudos em cima da autocicatrização do concreto, e o quanto ainda podemos evoluir nessa área com a ajuda da tecnologia.

Imagine só conseguir ficar anos sem se preocupar em fazer manutenções em vários tipos de estruturas, principalmente as que são de difícil acesso e que precisam ser vistoriadas, a economia de tempo e mão de obra que esse processo desenvolve é extraordinário.

No Brasil o bioconcreto ainda está sendo conhecido, poucas pessoas sabem da sua utilidade e como ele pode agregar na engenharia civil. Temos alguns alunos e professores que já desenvolveram artigos sobre o assunto, e até experiências em laboratório sendo feitas, no contexto ainda há poucas referências de pesquisa e estudo no país, mas aos poucos estamos avançando com as descobertas da utilização desse material.

Alguns estudantes estão correndo atrás e querem trazer essa nova tecnologia para ser usada no Brasil, já que temos uma grande variação de temperatura durante o ano nossas estruturas de concreto fissuram muito rápido, e a aplicabilidade do bioconcreto nas estruturas seria uma das possíveis soluções e evitaria muitos reparos.

3.5.2.2 Concreto autocicatrizante

O estudo e pesquisa sobre o assunto começou no ano de 1994, pela Dra. Carolyn M. Dry da Universidade de Illinois (USA), ela foi a pioneira a propor a utilização de elementos de propriedades autocicatrizantes no concreto. (DRY, 1994).

Porém, apenas em 2001 foi que a pesquisa em materiais autocicatrizantes passou a atrair mais atenção com a publicação do trabalho sobre autocicatrização em materiais à base de polímeros. (WHITE ET AL, 2001).

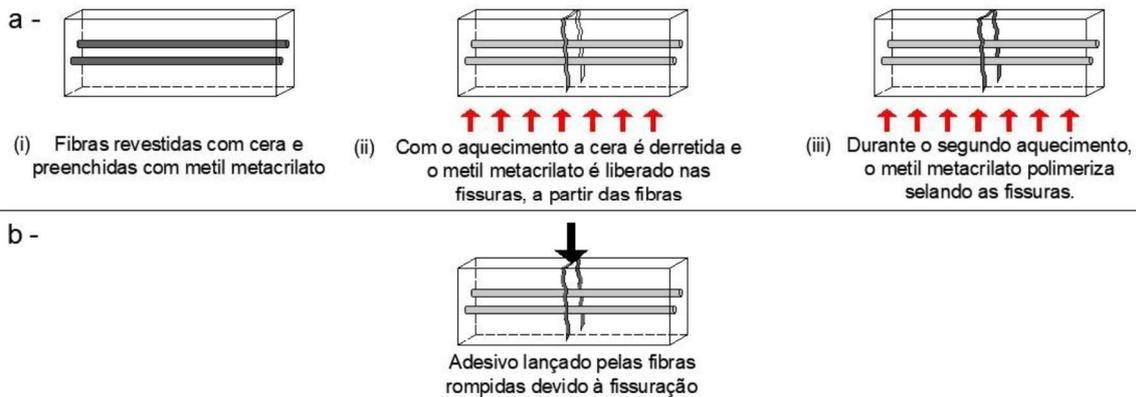
A autocicatrização é geralmente definida como a capacidade de reparar ou curar os danos de material de forma autônoma (ZWAAG, 2007).

Em relação a autocicatrização, classificam-se as estruturas inteligentes em ativas ou passivas. No modo passivo, a estrutura possui a habilidade de reagir ao estímulo externo e iniciar o fenômeno de autocicatrização, sem necessitar de intervenção humana; já no modo ativo, o material demanda intervenção para que sejam acionados os mecanismos de autocura (GHOSH, 2009).

Segundo Dry (1994), os dois sistemas foram testados, e os primeiros trabalhos começaram com um concreto autocicatrizante que pudesse ser melhorado com a adição de fibras ocas de polipropileno preenchidas com adesivo de metil metacrilato como agente cicatrizante, e conforme a propagação das fissuras, as fibras eram rompidas e liberavam o adesivo contido nas mesmas, a fim de cicatrizar as fissuras de modo passivo (Figura 11-b), ou conforme as fibras eram aquecidas através de intervenção humana, o material derretia liberando então o adesivo para agir no modo ativo (Figura 11-a).

No modo ativo a intervenção humana possibilita um maior controle, pois é a pessoa mesmo que está fazendo o processo acontecer, assim transmite maior confiança para o usuário final do produto. Entretanto, o modo passivo se sobressai, e por não demandar da atividade humana, evita assim a necessidade de gastos com mão de obra em reparo e manutenção pois todo processo faz-se automaticamente.

Figura 11 – (a) modo ativo; (b) modo passivo - Concreto Autocicatrizante



Fonte: Dry (1994).

Com a sua capacidade de reparar as fissuras automaticamente, sem diagnóstico externo ou intervenção humana, o concreto autocicatrizado é importante na recuperação das propriedades mecânicas do concreto. Embora os materiais com propriedades cicatrizantes tenham um custo maior nas obras, a longo prazo com a ausência de manutenções na estrutura, o custo será menor do que em estruturas convencionais ou de alto desempenho. (ARAÚJO, 2020).

Segundo Araújo (2020), dentre os processos de autocicatrização do concreto, existem também as técnicas que são usadas para diminuir a permeabilidade do concreto, através da adição de aditivos redutores de permeabilidade, esses aditivos são materiais hidrofílicos que reagem com a água presente na estrutura e com a formação de depósitos de carbonato de cálcio, onde se inicia um processo que bloqueia os poros e fissuras existentes chamado de cristalização capilar, assim ele funciona como um mecanismo de autocicatrização do concreto e ainda reduz a sua permeabilidade à água, deixando toda a estrutura estanqueada, resolvendo assim o problema para estruturas subterrâneas, em reservatórios e barragens.

A indústria da construção civil tem um grande interesse nas tecnologias de cicatrização do concreto, e o uso desses aditivos como estimuladores de cicatrização representam um grande avanço na indústria, e pelo vasto campo de conhecimento que ainda tende ser explorado pela comunidade científica.

Conforme Araújo (2020), as abordagens de autocicatrização do concreto podem ser divididas em duas classes, em cura autógena e cura autônoma, a autógena é o modo passivo que é originada naturalmente do material cimentício, enquanto a autônoma é o modo ativo e requer um gatilho para ativar o processo de cicatrização, e nos tópicos seguintes essas abordagens serão mais bem detalhadas.

3.5.2.2.1 Autocicatrização autógena

Conforme Moreira (2016), a autocicatrização autógena ocorre por meio de cicatrização natural, é um fenômeno que preenche e sela fissuras sem qualquer interferência externa, e são geradas por algumas reações químicas como por exemplo a hidratação tardia e carbonatação do concreto, ou também através do bloqueio mecânico nas fissuras, pelas partículas do próprio concreto, considerando que o ambiente em que essas fissuras estão presentes, esteja úmido.

Tittelboom e De Belie (2013) afirmam que a cicatrização autógena é um fenômeno antigo e conhecido e que atraiu muita atenção desde que foi observado.

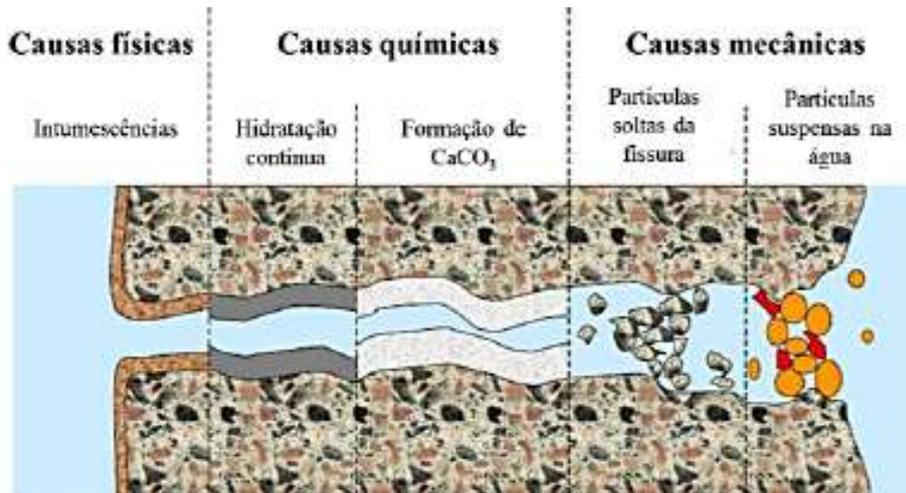
Esta é uma das razões para que muitos edifícios e estruturas antigas permanecem de pé por tanto tempo com assistência e manutenção limitada (MOREIRA, 2016).

A cicatrização autógena consiste na habilidade intrínseca do concreto de se regenerar, preenchendo vazios e reparando eventuais fissuras, por meio de fatores associados apenas ao próprio material. Sendo que a concepção da palavra “autógena” enfatiza que esse processo acontece em materiais cimentícios sem interferência externa, similar aos fenômenos de regeneração observados no corpo humano (recuperação dos tecidos da pele e das estruturas ósseas, por exemplo). Em relação a essa autocicatrização, apesar de o processo ser conhecido, as informações sobre seus efeitos benéficos e suas limitações não são completamente compreendidas (DE BELIE et al., 2018).

De acordo com Tittelboom e De Belie (2013) o mecanismo com maior capacidade de promover a cicatrização autógena varia de acordo com a idade do concreto e quando ocorrer a rachadura. A hidratação contínua de partículas de cimento não hidratado exerce essa função no concreto em idades mais jovens, enquanto nas idades mais tardias é a precipitação do carbonato de cálcio.

Dentre as causas da fissuração do concreto, os fatores mecânicos, químicos e físicos podem originar a cicatrização autógena; e esses fatores podem ser determinados como intumescência ou inchamento, hidratação contínua e causas mecânicas. Como mostra a Figura 12 abaixo.

Figura 12 – Causas para autocicatrização autógena no concreto



Fonte: Takagi (2013).

a) Intumescências

Conforme Moreira (2016) e Araújo (2020), as intumescências ou inchamento acontece quando a água em contato com a pasta de cimento é absorvida e atinge os espaços disponíveis com os compostos de hidratação e causa um efeito físico entre os constituintes da pasta que começa a se reidratar. O efeito físico acontece devido ao inchaço da pasta de cimento hidratado perto das faces da fissura que reagem com a água, e acontece o fechamento das aberturas menores que 0,1 milímetro, em função da saturação de água que ocorre ou então estimula as outras causas para a autocrystalização de fissuras maiores.

b) Hidratação contínua

Segundo Moreira (2016), a hidratação contínua ocupa quase que o dobro do material cimentício, mas não é responsável por selar completamente uma fissura, entretanto acontece uma ação diretamente entre o efeito de inchaço e hidratação que é possível atingir a autocicatrização autógena, onde assim esta ação exerce maior influência em fissuras menores, na ordem de 0,1 mm.

Oliveira (2019), afirma que o processo ocorre pela reação do hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento, disponível no interior da fissura com o dióxido de carbono presente na água que se infiltra na abertura da fissura. A dissolução desses compostos resulta em carbonato de cálcio, o qual forma uma densa barreira nas faces internas da fissura que interrompe o fluxo de água no material.

c) Causas mecânicas

As causas mecânicas, que geram a autocicatrização das fissuras podem ser por fraturamento ou sedimentação de partículas. Neste caso, as partículas mais finas provenientes da água que fluem através das fissuras, ou até mesmo as partículas de cimento, que se soltam a superfície da fissura e ao serem transportadas pelo fluxo podem se prender nas regiões de menor espessura das fissuras. No caso do fraturamento de pequenas partículas, estas podem se soltar do concreto, a partir das faces da fissura, e as partículas obstruírem a fissura (HEIDE, 2005).

Há controvérsias sobre a importância desses diferentes mecanismos. O fenômeno de inchamento da matriz de cimento e a hidratação contínua podem ser negligenciados se comparados com a formação de carbonato de cálcio e com a sedimentação das partículas, sendo que apenas fissuras iguais ou menores que 6µm podem ser curadas por hidratação contínua (EDVARSEN, 1996).

Portanto, como abordado por Tittelboom e De Belie (2009) e De Belie et al. (2018), a autocicatrização autógena nos materiais cimentícios, apesar de ser bem conhecida, é limitada a selagem de fissuras menores entre 0,01 a 0,1 mm, em casos específicos chegando a 0,2 mm, mas não ultrapassando 0,3 mm e a demanda de disponibilidade de água para ocorrer, o que dificulta o controle do processo e aumenta o tempo necessário para cicatrização. Em vista disso, a autocicatrização autônoma desponta como uma alternativa mais eficiente em relação a propriedade de autoreparação do concreto.

3.5.2.2.2 Autocicatrização autônoma

Moreira (2016), afirma que a autocicatrização autônoma ocorre de forma involuntária e simultânea através de adições de outros materiais como cinzas volantes ou agentes expansivos específicos, com o intuito de acelerar e preencher as fissuras para a recuperação do concreto, em um ambiente que envolve umidade.

A cicatrização autônoma é realizada pela adição de agentes químicos ou biológicos específicos à matriz cimentícia, (FERRARA; KRELANI; CARSANA, 2014; PANG et al., 2016).

Refere-se a mecanismos artificialmente acionadas na matriz de forma artificial, a ideia básica da cicatrização autônoma é que, após a ocorrência de rachaduras no concreto, os agentes de cicatrização possam ser liberados e reajam com alguns estímulos, e como resultado, acionam o mecanismo de cicatrização (TANG; KARDANI; CUI, 2015).

Diferentemente da cura autógena, a autônoma depende de adições incorporadas à matriz e tem o potencial de reparar rachaduras maiores (ZHANG et al., 2020).

Vários são os agentes de cura autônoma utilizados, por exemplo, tem-se os em cápsulas, fibras ocas, bactérias e polímeros. (NASIM; DEWANGAN; DEO, 2020).

Os materiais baseados em cápsulas levam os agentes curativos dentro de discretas cápsulas, quando estas são rompidas, por exemplo, por danos, o mecanismo de cicatrização é acionado através da liberação e reação do reagente na região onde ocorreu o dano. (TANG; KARDANI; CUI, 2015)

Enquanto outros agentes reagem em contato com a umidade, ar ou devido ao aquecimento, ou o contato com a própria matriz. Outros agentes reagem ao ter contato com outros componentes presentes na matriz cimentícia. Na abordagem baseada em cápsulas, estas podem ter formato esférico ou cilíndrico (TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

3.5.2.3 Bioconcreto x Concreto autocicatrizante

Jonkers (2010) e Takagi (2013), afirmam que de alguma maneira esses dois métodos de autocicatrização do concreto, tem grande importância na área da construção civil, a sua descoberta revolucionou a maneira de resolver problemas que nem os reparos ou manutenções convencionais resolvem, e que precisam ser constantemente analisadas para que uma estrutura não se deteriore devido as manifestações patológicas que ao passar do tempo surge nas edificações.

Os processos de cicatrização tanto do bioconcreto quanto do concreto autocicatrizante, ainda estão sendo estudados no mundo todo, professores e alunos estão fazendo pesquisas e teste em laboratórios em vários materiais cimentícios, para desenvolver uma técnica ou produto para serem usados nas estruturas de concreto, visando a autoreparação sem precisar de interferência humana para que o processo seja concluído.

Segundo Takagi (2013), o concreto autocicatrizante hoje é um dos mais conhecidos métodos de cicatrização, ele utiliza aditivos ou outros componentes para selar as fissuras, e seu estudo e aplicação está mais avançado no mundo, e possui algumas obras que adotaram esse método, inclusive aqui no Brasil, onde estão servindo de teste para validar sua eficácia nas estruturas. Tende a ser muito utilizada ainda, mas também a ser muito estudada, devido a sua cicatrização ter uma capacidade de selar fissuras com diâmetros mínimos de até 0,5 milímetro, por isso estão em busca para fazer com que esse método possa selar fissuras com diâmetros maiores.

Jonkers (2010), diz que o bioconcreto é um processo de cicatrização que foi desenvolvido recentemente, ele utiliza bactérias que sobrevivem aos processos químicos do concreto, e consegue selar fissuras maiores que 0,8 milímetro de diâmetro e sem limites de comprimento. Em tese a bactéria fica adormecida na estrutura até que se tenha alguma patologia, e ao entrar em contato com ar, umidade ou água a bactéria se ativa e passa a se alimentar de lactato de cálcio, onde no seu processo digestivo a bactéria libera o calcário, assim conseguindo a autocicatrização do concreto, e evita que a estrutura tenha contato novamente com os agentes patológicos.

É um dos métodos com mais expectativas de dar certo, pois vai ser um grande aliado na construção civil para deixar as estruturas ainda mais forte por muitos anos, como ainda é um método que está sendo testado para validar sua eficiência, há muita pesquisa em cima do bioconcreto e do uso de bactérias, muitos professores e alunos estão testando várias bactérias em material cimentício, para encontrar uma melhor forma de implantar esse processo na construção civil.

3.6 TRABALHOS REFERENTES A RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS POR PROCESSOS DE AUTOCURA

O processo de autocura de concreto utilizando bactérias é um mecanismo inovador e alternativo para as problemáticas fissuras em estruturas de concreto. O presente estudo identificou e avaliou cinco linhagens bacterianas coletadas de solo com histórico de contaminação com petróleo para seu potencial aplicação no processo de autocura de concreto via bioprecipitação de CaCO_3 (SANTOS, 2018).

O concreto convencional tem diversas patologias, e um dos seus principais problemas é a corrosão da armadura, uma das mais comuns e mais graves patologias que acaba pondo em risco toda a estrutura da obra que ela ali sustenta. Acabando também ocorrendo as principais causas de fissuras e trincas em estruturas de concreto convencional, geralmente causada por retração térmicas e esforços de cargas. Junte isso tudo a uma estrutura subterrânea e seus altos gastos em manutenção, surgindo uma nova opção e podemos assim dizer que, o concreto como nos conhecemos hoje está evoluindo, e baseando-se no método de cura do corpo humano, Henk Jonkers criador deste novo concreto, viu as possibilidades de inovar no que até então não se havia imaginado ser aplicável a construções, feitas de concreto e aço. Este novo concreto e chamado de bioconcreto ou também de concreto auto curável, é composto por capsulas que tem seu interior preenchidas por bactérias produtoras de calcário, tais bactérias que estão dentro do

concreto encapsuladas, e que quando por intermédio de uma fissura são expostas a atmosfera e ao entrarem em contato com a água produzem o calcário preenchendo assim a fissura onde ali habitam. Tendo isso em mente, porque não as utilizar em ambientes mais úmidos e de difícil manutenção como em túneis e em construções subterrâneas e que são mais propícios a proliferação de bactérias. Proporcionado assim uma menor manutenção, gerando uma economia e mais segurança para as estruturas e para as pessoas (ARAÚJO et al, 2019).

Existem alguns concretos especiais atuais formados por mais do que essa mistura, pois frequentemente possuem materiais classificados como aditivos que podem ser químicos ou minerais que tem capacidade de melhorar algumas propriedades e características e proporcionar vantagens como por exemplo, maior resistência e durabilidade, ou até mesmo corrigir algumas deficiências dos cimentos existentes.

Nesse sentido, o estudo de Silva (2018), foi realizado com intuito de avaliar a utilização do bioconcreto em substituição ao concreto comum no que abrange os aspectos técnicos e econômicos envolvidos. O objetivo principal foi realizar um estudo teórico da utilização do bioconcreto em comparação com o concreto comum. O bioconcreto, conhecido também como “concreto auto curável” consiste na mistura do concreto com bactérias produtoras de calcário. Quando o concreto é fissurado as bactérias produzem calcário e reestruturam a falha formada. Para manter as bactérias dormentes até que ocorra a patologia, as mesmas são encapsuladas em partículas pequenas compostas de argila expansível e lactato de cálcio, assim quando as fissuras ocorrem, as cápsulas são degradadas e as bactérias entram em contato com a água e começam a se alimentar do cálcio que reage com o carbono e produz o calcário, que por sua vez preenchem as fissuras existentes. O bioconcreto se apresenta como uma nova alternativa na área da construção civil. Esse estudo possibilitou entender como funciona o seu processo de liberação do carbonato de cálcio e a regeneração. Também sendo possível acompanhar como é feito seu experimento e quantificação na análise após compressão do ensaio, verificando assim seu ganho de resistência com passar dos dias. (SILVA, 2018).

4 METODOLOGIA

De acordo com Gil (1999), o método científico é toda forma intelectual e técnica usada como benefício a obtenção do conhecimento. Sendo que o conhecimento científico precisa identificar os passos da sua verificação para ressaltar que o método possa chegar ao conhecimento.

Para a realização desse estudo comparativo, foi realizado uma pesquisa bibliográfica de caráter exploratório, onde a pesquisa bibliográfica, de acordo com Boccato (2006), busca a resolução de uma hipótese ou problema através de referenciais teóricos publicados, analisando e discutindo as contribuições científicas.

O método de pesquisa exploratório “[...] envolve levantamento bibliográfico e as entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado” (GIL, 1991; SILVA apud MENEZES, 2005, p. 21).

A fim de desenvolver o conhecimento sobre a autocura do concreto, foi escolhido para esse trabalho um estudo entre dois métodos de autocura do concreto, realizado a partir de conhecimentos de estudo comparativo e qualitativo. A coleta dos dados para esta pesquisa foi realizada através de artigos científicos e livros, onde garantem a fidelidade dos dados, assim como sites confiáveis, para que se tenha um entendimento maior sobre o assunto.

Nesse tipo de investigação, foi estudado as diferenças entre os métodos de recuperação de estruturas com processos de autocura, apesar do concreto ser um material comum, muito conhecido e com uma longa aplicabilidade na indústria da construção civil, ainda assim muitas estruturas estão sujeitas as ações de deterioração, e muitos dos reparos convencionais não ajudam a solucionar o problema.

Há poucos anos começaram os estudos e ensaios capazes de verificar as propriedades autocicatrizantes do concreto e conhecer seus efeitos e benefícios para de fato serem aplicados nas estruturas de concreto desde o começo de uma obra, para garantir a integridade da estrutura e evitar problemas futuros. É essencial o entendimento desse assunto, pois alguns desses métodos podem ser uma das possíveis soluções a se adotar futuramente nas reparações de estruturas de várias obras.

Este trabalho procura também contribuir para os estudos dos concretos autocicatrizantes, e despertar o interesse dos estudantes em trazer novas soluções para o mundo da construção civil, para facilitar e melhorar as técnicas construtivas que temos hoje em dia.

Visto todo o material desenvolvido acima na revisão bibliográfica, através de pesquisas pude mostrar toda a sequência introdutória para se compreender o que é o concreto, as suas

propriedades e durabilidades, em patologias do concreto o porquê das estruturas apresentarem diferentes anomalias, e os métodos de recuperação das estruturas convencionais e até apresentar os métodos de autocicatrização que é o foco do trabalho, conseguindo assim fazer a comparação entre os dois tipos de processos de autocura do concreto.

Os processos de cicatrização tanto do bioconcreto quanto do concreto autocicatrizante, ainda estão sendo estudados no mundo todo, professores e alunos estão fazendo pesquisas e teste em laboratórios em vários materiais cimentícios, para desenvolver uma técnica ou produto para serem usados nas estruturas de concreto, visando a autoreparação sem precisar de interferência humana para que o processo seja concluído.

No bioconcreto segundo Jonkers (2010), o concreto é um ambiente alcalino tendo um ph de até 13 quando misturados, específicas bactérias produtoras de calcário resistiam aos processos químicos do concreto e ainda os regenerava. Essas bactérias são encontradas em lagos com águas altamente alcalinas com pH elevado acima de 10, ou em crateras com vulcões ainda em atividade e em solos ricos em carbonatos em áreas desérticas da Espanha e lagos de soda no Egito.

Segundo Araújo (2019), as bactérias podem ficar adormecidas por até 200 anos dentro da estrutura, e só começar a agir quando aparecer fissuras, onde o material com o contato do ar, umidade ou água, aciona as bactérias e começam a se alimentar do lactato de cálcio, misturado junto ao concreto, onde em seu processo digestivo origina o mineral constituinte do calcário. Assim as bactérias podem regenerar ou selar as fissuras do concreto em até 3 semanas, com até 8 milímetros de espessura, não tendo limites para a extensão da fissura.

No concreto autocicatrizante segundo Ghosh (2009), as estruturas de concreto que usam esse método classificam-se como estruturas inteligentes, sendo as ativas ou passivas. De modo que a passiva possui a habilidade de reagir ao estímulo externo e iniciar o fenômeno de autocicatrização de forma autônoma sem necessitar de intervenção humana, já no modo ativo, o material demanda intervenção para que sejam acionados os mecanismos de autocura na estrutura.

Segundo Dry (1994), os dois sistemas foram testados, e os primeiros trabalhos começaram com um concreto autocicatrizante que pudesse ser melhorado com a adição de fibras ocas de polipropileno preenchidas com adesivo de metil metacrilato como agente cicatrizante, e conforme a propagação das fissuras, as fibras eram rompidas e liberavam o adesivo contido nas mesmas, a fim de cicatrizar as fissuras de modo passivo, ou conforme as fibras eram aquecidas através de intervenção humana, o material derretia liberando então o adesivo para agir no modo ativo.

Embora os materiais com propriedades cicatrizantes tenham um custo maior nas obras, a longo prazo com a ausência de manutenções na estrutura, o custo será menor do que em estruturas convencionais ou de alto desempenho. (ARAÚJO, 2020).

A indústria da construção civil tem um grande interesse nas tecnologias de cicatrização do concreto, e o uso desses aditivos como estimuladores de cicatrização representam um grande avanço na indústria, e pelo vasto campo de conhecimento que ainda tende ser explorado pela comunidade científica.

Com isso na próxima etapa desse trabalho, em análises e discussões de resultados teremos mais detalhes sobre esses dois processos de autocicatrização do concreto, no qual serão mostradas as aplicações em estruturas desses métodos, a análise da viabilidade econômica de implantar esses processos de cicatrização, os estudos em laboratórios que já obtivemos no Brasil, as análises dos ensaios de ruptura e as vantagens e desvantagens desses métodos.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados as análises e resultados obtidos através de pesquisas bibliográficas onde diferentes autores contribuíram para que se pudesse ter referências para concluir o estudo comparativo entre métodos de recuperação de estruturas com processos de autocura, o bioconcreto e o concreto autocicatrizante, onde foi possível obter os dados necessários para a discussão dos resultados. Dando ênfase em verificar a eficácia desses métodos, mostrar as análises de ruptura de ensaios, e analisar a viabilidade econômica em implantar esses processos de cicatrização.

Pretende-se também mostrar a aplicabilidade em estruturas, ou seja, obras que já utilizaram esses métodos e ver qual deles será o melhor para ser usado nas estruturas, analisar os estudos em laboratórios que já obtivemos no Brasil, as vantagens e desvantagens desses métodos, assim vão ser geradas as conclusões na interpretação e discussão destes métodos.

5.1 APLICABILIDADE EM ESTRUTURAS

O estudo de aplicabilidade serve para descrever as características de aplicação, qualidade, peculiaridade de determinados materiais.

5.1.1 Aplicabilidade do bioconcreto em estruturas

Segundo Jonkers (2015), o bioconcreto está sendo testado em diferentes estruturas com a finalidade da aceitação do mercado. A primeira estrutura a utilizar o bioconcreto foi uma estação de salva-vidas na beira de um lago em Galder na Holanda que foi iniciada em 2011 e está sujeita a condições extremas com alta incidência solar e presença contínua de água, e na América do Sul o bioconcreto também está sendo utilizado em canais de irrigação no Equador, já que o país possui grande incidência de abalos sísmicos, esses eventos podem provocar rachaduras, colocando em teste a capacidade de regeneração do bioconcreto.

Figura 13 – Posto de salva-vidas no lago de Galder na Holanda



Fonte: Jonkers (2015).

Conforme Jonkers (2015), o bioconcreto pode ser utilizado em todos os tipos de estruturas de concreto, ou até como material de reparação, é um dos fatores que tem contribuído para o aumento das pesquisas e estudos, visando o amadurecimento do método e a sustentabilidade na construção civil.

Na figura 14 ilustrada a seguir, pode ser visto uma parede que passou pelo processo de recuperação e mostra visualmente onde apareceram as trincas, tirado por Henk em uma das suas visitas periódicas ao posto de salva-vidas na Holanda.

Figura 14 – Recuperação da estrutura no posto salva-vidas na Holanda



Fonte: Jonkers (2015).

5.1.2 Aplicabilidade do concreto autocicatrizante em estruturas

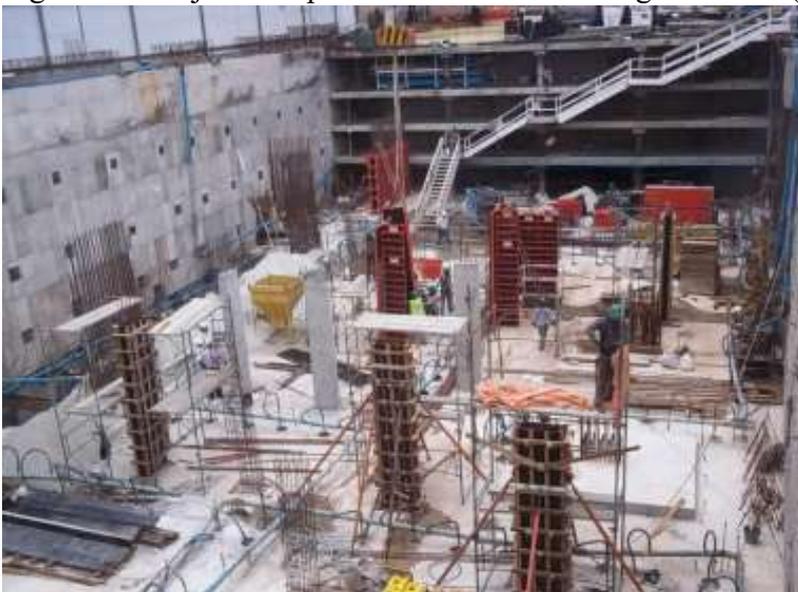
Os concretos autocicatrizantes vêm ganhando espaço em obras no Brasil. Suas características são indicadas para obras de reservatórios, estruturas de saneamento e subterrâneas, como túneis e metrô (ALMEIDA E VOZINIAK, 2019).

A primeira obra a receber o concreto autocicatrizante foi as lajes de fundo das estações de metrô Praça Nossa Senhora da Paz, Antero de Quental e Jardim de Alá, sendo que todos estes exemplos pertencem a linha 4 do metrô no Rio de Janeiro (PORTAL ITAMBÉ, 2016).

O concreto autocicatrizante foi usado na execução da laje de subpressão do Museu da Imagem e do Som (MIS) e na cobertura fluida do Museu de Arte do Rio (MAR). (TAKAGI, LIMA e HELENE, 2014).

Britez et al. (2016), apresentam um estudo sobre a concretagem da laje de subpressão em concreto armado da nova sede do Museu de Imagem e Som (MIS), onde o museu apresenta uma laje de 1 metro de espessura e volume de 1200 m³, e para execução e composição do concreto da laje, foi utilizado CP III 40-RS, adição de sílica ativa, utilização de gelo durante a mistura, um alto consumo de cimento, gerando uma alta resistência do concreto e de componente adicional, utilizou-se um aditivo impermeabilizante por cristalização integral, conhecido como Cat-X.

Figura 15 – Laje de subpressão do Museu de Imagem e Som (MIS)



Fonte: Britez et al. (2013).

A cobertura fluida do Museu de Arte do Rio (MAR), compreende 1.700 m² e é modelada em formato de uma onda, com desníveis de até 1,75 m, gerando uma impressão de fluidez. Ela está disposta a 30 metros de altura, conforme mostra a Figura 17, estando apoiada em 37 tubos de aço galvanizado. Na concretagem, 80% da água foi substituída por gelo, todos os concretos dos caminhões foram lançados em temperaturas entre 16°C a 21°C, com a trabalhabilidade necessária e retardando a pega, evitando ao máximo a fissuração (ALMEIDA, 2013).

Figura 16 – Laje fluida do Museu de Arte do Rio (MAR)



Fonte: Almeida e Voziniak (2019).

A mais recente fica em Porto Alegre, a laje de subpressão receberá as propriedades do concreto autocicatrizante, são mais de 20.000 m² do complexo multiuso do Edifício Pontal do Estaleiro, a 3,3 metros abaixo do nível do Lago Guaíba (UNIVERSIDADE TRISUL, 2017).

5.1.3 Discussão da aplicabilidade em estruturas

É notável que o uso do concreto autocicatrizante em estruturas são muito mais frequentes, visto que seus estudos começaram em 1994 com a Dr. Dry, e hoje são aplicados em estruturas aqui no Brasil, dado que a eficácia do material se tornou comprovada, diferente do bioconcreto que é um material que foi descoberto recente e ainda está em fase de teste em algumas estruturas.

Tomara que possamos ver maiores aplicações desses métodos ao longo dos anos, e muitas pesquisas em cima desse assunto, a fim de validar ainda mais a eficácia das propriedades de autocura dos concretos, ou de descoberta de novos métodos para a evolução dos materiais da construção civil.

5.2 ANÁLISE DE ESTUDOS EM LABORATÓRIOS NO BRASIL

O laboratório é o lugar destinado a estudos e a pesquisas, nele contém os materiais, equipamentos e ferramentas para executar os testes próprios da área estudada. Esse ambiente permite que o aluno ou professor, possa ter uma aplicação prática do conhecimento teórico.

5.2.1 Estudo do bioconcreto em laboratório

Barros e Nascimento (2019), fizeram um teste no laboratório de microbiologia e de engenharia civil na Universidade São Francisco localizada em Bragança Paulista – SP, com auxílio dos laboratoristas, simulando situações reais da utilização do bioconcreto.

O primeiro passo foi selecionar uma bactéria do tipo *Bacillus* que possa ser encontrada em nosso país, entre várias possibilidades já estudadas e que tenha características aproximadas das que Henk Jonkers executou seus estudos. A bactéria *Bacillus Subtilis*, é conhecida como *Bacillus* da grama e *Bacillus* do feno, foi selecionada devido a facilidade de encontrarmos no solo e na água, de não ser patogênicas, são resistentes a condições ambientais atípicas e estão presentes em alimentos estragados como arroz, bolo, pão, entre outros e por serem uma bactéria que produz carbonato de cálcio, principal ativo do bioconcreto para selar as fissuras das estruturas de concreto armado.

O processo é simples de se fazer tendo os materiais e os equipamentos corretos, foi usado 10,5g de caldo de nutriente chamado Tryptone Soya Broth (T.S.B.), diluídos em 350 ml de água destilada, em um balão de Erlenmeyer de 1 litro, essa solução é aquecida em um micro-ondas por cerca de 2:30 minutos, para ser esterilizada. Logo em seguida o balão é vedado com um plugue, e envolvido com papel e amarrado com elástico e o encaminhamos para autoclave.

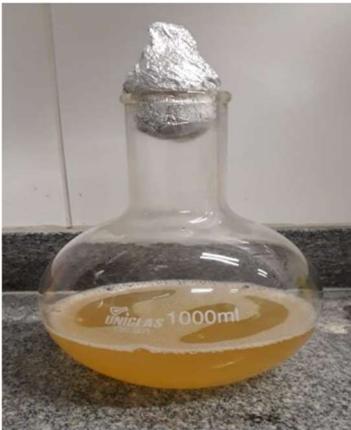
Figura 17 – Meio de cultura e autoclave



Fonte: Barros e Nascimento (2019).

A autoclave eleva a temperatura da solução a 121° centígrados e em 15 minutos a solução de nutriente fica pronta, e espera a solução chegar à temperatura ambiente. O balão é aberto, e acrescentado 1 ml do *Bacillus Subtilis* na solução de nutriente, onde se mistura até ficar homogênea, depois disso é levado para uma estufa a temperatura de 37° centígrados por 24 horas. Após o prazo, houve o aumento da quantidade de bactérias *Subtilis* e o aspecto da solução apresentava uma cor amarelada e esbranquiçada.

Figura 18 – Meio de cultura com bactéria após estufa



Fonte: Barros e Nascimento (2019).

Após feito esses processos, chega a hora de fazer o concreto, foi confeccionado um corpo de prova prismático, com dimensões de 15x15x75cm, em uma forma de metal com desmoldante, e armadura de aço, para o corpo de prova obter uma resistência maior ao esforço solicitante de tração, caracterizando situações reais aos testes e os materiais utilizados foram, cimento, areia, brita 0, brita 1, água, onde 3% do volume da água foi substituído pelo composto químico a base de bactéria *Bacillus Subtilis* e lactato de cálcio. Todos os materiais foram misturados com auxílio de uma betoneira, até que se tornasse uma mistura homogênea, denominando todo composto como bioconcreto.

Também foram confeccionados corpos de prova cilíndricos, em uma forma de metal cilíndrica com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura com desmoldante. Os materiais utilizados foram, cimento, areia, argila expandida, água. No experimento foi substituído 3% do peso do volume da água pelo composto químico a base de bactéria *Bacillus Subtilis* e lactato de cálcio, em seguida a argila expandida foi encharcada na solução, e adicionados e misturados com o auxílio da betoneira até que se tornasse uma mistura homogênea, denominando bioconcreto. Após os corpos de prova ficarem prontos, foi feita a cura por submersão em água por 28 dias.

O corpo de prova prismático foi posicionado horizontalmente, com dois lados apoiados na prensa para ensaios de compressão e tração, como mostra a figura 19, simulando situações reais, onde foi aplicado uma carga vertical produzindo microfissuras com espaçamento menores ou igual a 0,8 milímetros e maiores ou igual a 0,2 milímetros.

Após três semanas hidratando o corpo de prova prismático, verificou-se um aspecto diferenciado, o corpo de prova apresentava em suas fissuras um aspecto esbranquiçado como mostra a figura 19. O material apresentado nas fissuras se tratava da formação de carbonato de cálcio no processo de alimentação e digestão das bactérias selecionadas nesse trabalho.

Figura 19 – Corpo de prova prismático



Fonte: Barros e Nascimento (2019).

Nas duas amostras cilíndricas de concreto, não foi executado o processo final de rasamento do corpo de prova, o material foi utilizado apenas na confecção de pastilhas para visualização, onde na primeira amostra houve a adição da bactéria e seu alimento, e na segunda amostra não houve a contaminação do concreto. Nos dois experimentos o agregado graúdo foi substituído por argila expandida.

Barros e Nascimento (2019), puderam concluir com esses testes que o composto bacteriano e seu alimento, aplicado diretamente no concreto o contaminando, possibilita microbiologicamente através da digestão do bacillus o material necessário para manter a estrutura impermeável e estável a ações mecânicas e do tempo. Assim com seus estudos no laboratório de microbiologia da Universidade São Francisco, possibilitaram o entendimento do comportamento que o microrganismo denominado *Bacillus Subtilis*, e que todos os argumentos baseados na teoria e na prática, pode relatar que o bioconcreto representa de fato um passo significativo para evolução na construção civil, restaurando danos nas edificações causados por

efeitos patológicos. A economia que sua matéria prima representa é considerável e encontra-se em abundância na natureza, tornando assim um meio sustentável.

Com os ensaios feitos no laboratório, na primeira experiência o resultado foi positivo, porém seu processo de autoreparação é um pouco mais lento e em termos de resistência o material apresenta superioridade referente ao concreto tradicional. O segundo experimento, substitui o agregado graúdo por argila expandida, foi o método que adquiriu o melhor resultado no processo de autocicatrização, porém sua resistência foi inferior em comparação ao concreto tradicional, posteriormente necessitando de mais experimentos para que houvesse um aperfeiçoamento em seus resultados de resistência. Mesmo assim eles afirmam, que o sistema de material com introdução de bactérias é eficaz.

Medeiros (2020), executou testes no laboratório de microbiologia do Departamento de Fisiologia e Patologia, no Centro de Ciências da Saúde e no laboratório de reologia do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, no Centro de Tecnologia, ambos localizados na Universidade Federal da Paraíba.

Medeiros executou os mesmos procedimentos que Barros e Nascimento (2019), só que ele fez a substituição da brita pela argila expandida em todos os corpos de prova. Então concluiu que quanto à verificação visual do preenchimento das fissuras, observou que as bactérias testadas são eficazes na regeneração de fissuras quando usadas em bioconcreto. A bactéria *Bacillus Subtilis* apresenta uma maior capacidade de regeneração, e que os sete dias de cura utilizados para os tratamentos bacterianos foram insuficientes para hidratar completamente o material e endurecê-lo. Por fim, concluiu que o bioconcreto é um material eficaz em sua proposta de tratamento autônomo de suas fissuras. Além disso, deve ser mais estudado e desenvolvido para que sirva como alternativa aos métodos convencionais que tradicionalmente apresentam grande potencial poluidor. Como qualquer material, o bioconcreto também possui suas limitações, que se fazem mais latentes na questão do custo e da acessibilidade aos insumos, especialmente, os agentes microbianos e o lactato de cálcio.

Para mim os testes que Medeiros, Barros e Nascimento fizeram tem o intuito de provar por meio dos ensaios a eficácia do bioconcreto, e de como é possível fazer o bioconcreto em qualquer lugar do mundo utilizando as bactérias com as características corretas, e que não deixa mais de ser uma teoria embasada em livros ou artigos, e os testes que o inventor fez e pode executar aqui no Brasil é muito importante para dar sequência em mais estudos aprofundando a aplicação do bioconcreto.

5.2.2 Estudo do concreto autocicatrizante em laboratório

A grande parte dos estudos em laboratório com os concretos autocicatrizantes, consiste apenas da mistura dos materiais para fabricação como no concreto comum, a única diferença é a adição de aditivos cristalizantes, alguns usam superplastificantes e também algum tipo de fibra. São realizados os mesmos testes de abatimento e moldagem de corpos de prova.

Grau e Barbosa (2020), em seu trabalho de pesquisa usaram os dois tipos de aditivos mais a adição de fibras de vidro, o superplastificante da marca Tecnomor, segundo eles o produto é excelente na dispersão das partículas de cimento melhorando assim a trabalhabilidade, é fornecido no estado líquido, a sua cor é marrom e segundo o fabricante, utiliza-se apenas 1,2% do material em relação a massa de cimento, e o cristalizante da marca Penetron, é usado na impermeabilização por cristalização integral, que é um pó adicionado ao traço do concreto, no momento de sua produção e segundo o fabricante, foi utilizado 0,8% do aditivo em relação à massa do cimento. A fibra de vidro foi utilizada pois ela previne fissuras e aumenta o desempenho, cerca de 5% do peso total do concreto foi acrescentado.

Figura 20 – Plastificante, cristalizante e fibra de vidro



Fonte: Grau e Barbosa (2020).

Todos os materiais foram misturados em uma betoneira e logo em seguida lançados no corpo de prova.

Figura 21 – Mistura dos materiais e moldagem dos corpos de provas



Fonte: Grau e Barbosa (2020).

Segundo Grau e Barbosa (2020), em seus testes a cura dos corpos de provas iniciou-se após 24 horas da sua confecção e foi realizada através da sua submersão em água saturada com cal em uma temperatura controlada por 28 dias. Com idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias de cura os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, para gerar um pré fissuramento, onde são submetidos a submersão em água novamente por mais 28 dias, para induzir o processo de autocicatrização e serem testados novamente.

Figura 22 – Corpos de prova imersos na água



Fonte: Grau e Barbosa (2020).

Almeida e Voziniak (2019), fizeram os mesmos procedimentos que Grau e Barbosa (2020), só que com dois tipos diferentes de aditivo cicatrizantes que não informaram o nome, e um outro tipo de superplastificante o MC PowerFlow 4001, foram aplicados em corpos de provas prismáticos, e no processo de cura foram colocadas em submersão em água, depois fissurados no ensaio de compressão, e submersos na água novamente para ver o processo de autocicatrização.

5.2.3 Discussão dos estudos em laboratório

Os estudos em laboratório mostram o desempenho dos alunos em trazer pesquisas com materiais completamente novos na construção civil.

O bioconcreto requer um maior trabalho para ser feito, devido a utilização das bactérias, onde tem que se deixar em um meio de cultura para a formação maior de colônia de bactéria, para então serem aplicadas, já para se fazer o concreto autocicatrizante, tendo em mãos todo o material tudo pode ser feito na hora, a partir da mistura dos componentes.

Esses estudos mostram também o aperfeiçoamento das técnicas, e os testes com variados tipos de materiais trazem informações valiosas, que contribuem para análises e ver qual método terá uma maior eficiência para serem introduzidos no mercado.

5.3 ANÁLISE DE ENSAIOS DE RUPTURA

O teste de compressão ou ensaio de ruptura à compressão é feito com blocos estruturais e segundo a norma NBR 12118 (ABNT, 2013), o teste é a relação de carga e área bruta do corpo de prova quando submetido ao ensaio de compressão axial, onde avalia a resistência de suportar cargas e ações mecânicas da estrutura, vento, choques e deformações.

5.3.1 Ensaio de ruptura do bioconcreto

Segundo Reis (2017), diante da análise da durabilidade do bioconcreto a longo prazo e a eficiência de custo desse novo tipo de concreto, os benefícios potenciais do bioconcreto são principalmente a redução de custos de manutenção e reparação, a extensão da vida útil das construções e o fato desse ser um material sustentável.

Para melhor exemplificar a durabilidade do bioconcreto a longo prazo, Silva e Passarini (2017), apresentaram resultados dos ensaios de resistência à compressão do bioconcreto durante o período de 365 dias, comparados com os resultados dos ensaios do concreto convencional usando cimento de alta resistência CP V ARI, conforme a tabela 1.

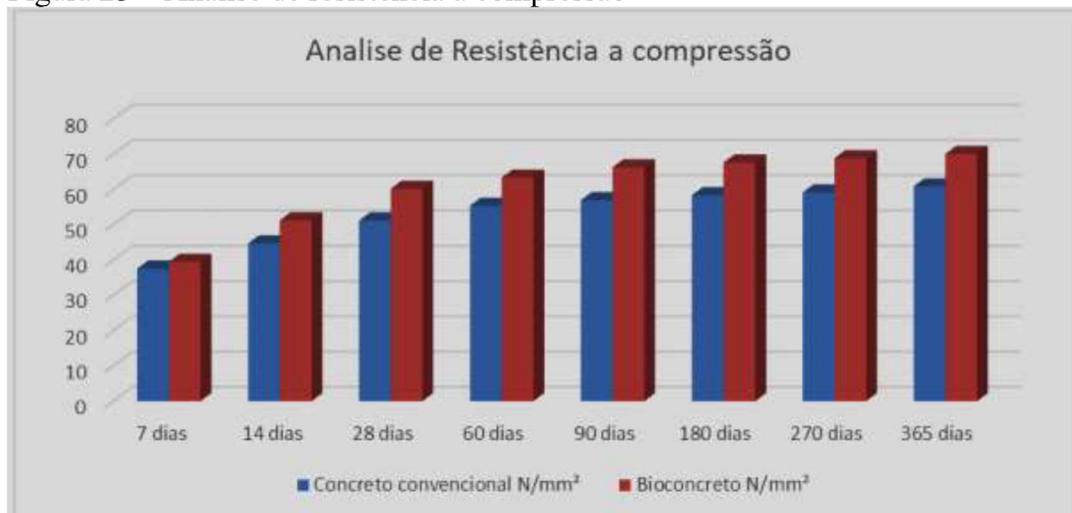
Tabela 1 – Relação de resultados de ensaio de compressão do bioconcreto

Dias	Concreto Convencional N/mm ² (MPa)	Bioconcreto N/mm ² (MPa)
7	37,57	39,48
14	44,73	51,26
28	51,19	60,17
60	55,39	63,35
90	56,97	66,27
180	58,37	67,62
270	59,14	68,84
365	60,87	70,07

Fonte: Adaptado Silva e Passarini (2017).

De acordo com os dados da tabela é visto que o bioconcreto não deixa perder resistência para o concreto convencional, e sim até o eleva com o passar dos dias e apresenta uma resistência consideravelmente maior à compressão. A Figura 23 apresenta os dados da análise comparativa da resistência à compressão dos dois concretos.

Figura 23 – Análise de resistência à compressão



Fonte: Silva e Passarini (2017).

Para Silva e Passarini (2017), em 365 dias, temos um ganho de resistência de quase 10% em comparação ao teste de 7 dias, que é de aproximadamente 2%, isso acontece devido os poros presentes no concreto serem preenchidos por carbonato de cálcio, que é precipitado pelas bactérias, gerando maior resistência ao concreto.

Visto a capacidade de elevação de resistência à compressão do bioconcreto em relação ao concreto convencional, seria válido que a aplicação em estruturas possa tomar proporções maiores para que seja executado outros testes, e ver seu comportamento em 5, 10 ou 20 anos.

5.3.2 Ensaio de ruptura do concreto autocicatrizante

Grau e Barbosa (2020), apresentaram resultados dos ensaios de resistência à compressão, a fim de analisar a eficiência do aditivo e fibras do concreto autocicatrizante, e comparar ao concreto convencional. Foi usado cimento CP II 32 para fazer o concreto convencional e CP III 40 RS para o concreto autocicatrizante. Os resultados estão expostos na tabela 2 abaixo, onde foi rompido 3 corpos de prova em cada dia e realizada a média aritmética.

Tabela 2 – Demonstrativo dos valores obtidos no ensaio de compressão

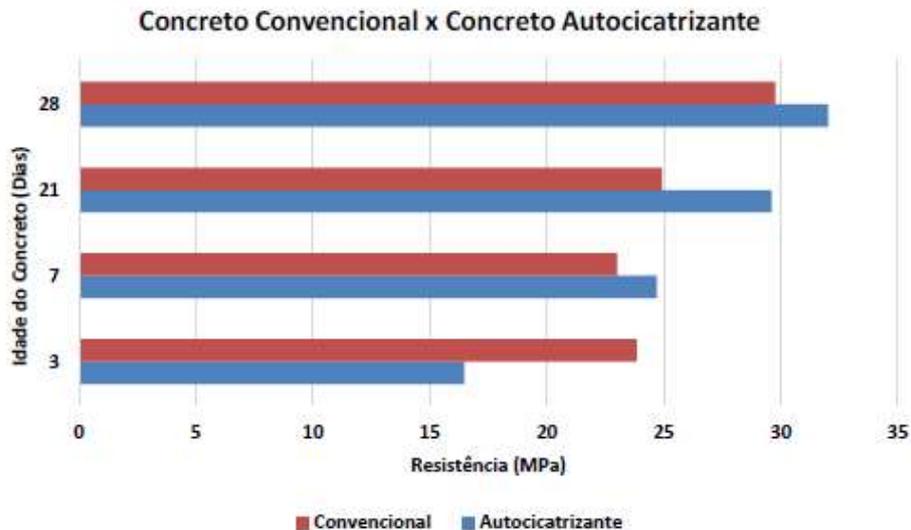
Concreto	Resistência (MPa)			
	3 dias	7 dias	21 dias	28 dias
Convencional	23,39	24,99	22,14	28,00
	24,42	22,28	27,72	32,11
	24,05	21,75	16,99*	29,21
Média Convencional	23,85	23,01	24,93	29,77
Autocicatrizante	18,13	24,87	30,18	26,60*
	14,83	21,62	20,49*	32,26
	16,46	27,62	29,06	31,77
Média Autocicatrizante	16,47	24,70	29,62	32,02

* Pelo valor estar muito fora dos demais, foi desconsiderado do cálculo da média aritmética.

Fonte: Adaptado de Grau e Barbosa (2020).

De acordo com os dados da tabela é visto que o concreto autocicatrizante nos primeiros dias de cura não consegue atingir a resistência do concreto convencional, após os 7 dias apresenta uma resistência maior à compressão. A Figura 24 apresenta os dados da análise comparativa da resistência à compressão dos concretos ao longo das idades.

Figura 24 – Comparação da resistência dos concretos



Fonte: Grau e Barbosa (2020).

Para Grau e Barbosa (2020), em 21 dias, temos um ganho de resistência de quase 5% em comparação ao concreto convencional, e no teste de 28 dias, menor que 2%, houve uma diminuição na resistência do concreto autocicatrizante, que pode ser associada à uma alta porosidade do material. Devido a pandemia Grau e Barbosa (2020), não conseguiram executar teste em corpo de prova com idade maior que 28 dias, onde não foi possível argumentar se o concreto autocicatrizante obteve aumento de resistência, e se os aditivos e as fibras conseguiram oferecer proteção integral contra a deterioração do concreto com o passar do tempo, e oferecer um ganho de durabilidade.

5.3.3 Discussão dos ensaios de ruptura dos métodos

Analisando as informações dos ensaios de ruptura dos concretos posso dizer que em função das amostras não usarem o mesmo tipo de cimento, não podemos ter a definição exata de qual terá a melhor resistência.

De fato, nas amostras analisadas por Silva e Passarini (2017), o bioconcreto sai em vantagem porque em seus testes usaram o cimento de alta resistência CP V ARI, onde acabou elevando bastante a resistência, quase que dobrou o valor da resistência à compressão no tempo de 28 dias, em comparação as amostras feitas com cimento CP III 40 RS, por Grau e Barbosa (2020).

Em teoria se aplicarmos o cimento de alta resistência nas amostras de concreto autocicatrizante, poderíamos obter também uma resistência maior à compressão, chegando bem próximos as amostras do teste em bioconcreto, pois com o uso do cimento CP V ARI estaríamos reduzindo a permeabilidade do concreto e a infiltração de agentes agressores, onde podemos obter material totalmente coeso e mais resistente.

5.4 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS MÉTODOS

A viabilidade econômica traz a análise, os custos e benefícios do projeto, da ideia, do negócio, ou seja, se economicamente é viável ou não trazer algum meio de melhoria sem te afetar futuramente.

5.4.1 Viabilidade do bioconcreto

Segundo o inventor do bioconcreto Jonkers (2015), cerca de 70% da infraestrutura da Europa é composta por concreto, e a manutenção é extremamente custosa, segundo ele estima-se que a manutenção anual em pontes, túneis e muros de contenção de terra nos países membros da União Europeia custou aos cofres públicos cerca de 6 bilhões de dólares.

Segundo Jonkers (2015), se fizermos os cálculos do gasto com a aplicação do bioconcreto em uma construção, veremos que representa apenas de 2 à 5% do valor total gasto, e você teria o investimento de volta em aproximadamente quatro anos pois iria economizar em manutenções.

Segundo Silva (2019), apesar de todas as qualidades do bioconcreto, o que ainda impede sua adesão no mercado é o seu custo elevado, cerca de 40% mais caro que o concreto convencional. Só que a implantação do bioconcreto proporciona uma série de benefícios, como a redução de gastos futuramente, evita as manutenções em obras de difícil acesso, além de prolongar o tempo de vida útil das construções.

5.4.2 Viabilidade do concreto autocicatrizante

Segundo estimativas Takagi et al. (2013), a vida útil desse concreto é estimada entre 50 e 60 anos. Além de ser usado em estruturas que exigem estanqueidade ou proteção química, o custo é 15% a 40% maior que o concreto comum. No entanto, o custo pode ser compensado, oferecendo melhor desempenho em termos de vedação e proteção química.

Grau e Barbosa (2020), afirmam que a introdução intencional de propriedades de autocura no concreto pode ser muito benéfica, pois pode economizar os custos diretos de mão de obra, de produtos e serviços de reparo, além de custos indiretos, porque essas estruturas precisam ser interrompidas durante o reparo e a manutenção.

Apesar de seu alto custo inicial, ele pode reduzir os custos de manutenção, prolongar a vida útil dessas estruturas e reparar danos imediatamente (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, et al., 2013).

Para Oliveira et al. (2019), analisando o custo-benefício do produto nos leva a recomendá-lo certamente, e principalmente a usá-lo, na confecção de obras que atuem em contato direto com o solo, reservatórios de água, estação de tratamento de água e efluentes, piscinas, lajes de subsolo, fundações, estacionamentos subterrâneos e pré-moldados. Ainda sobre a relação custo-benefício, salienta que de acordo com seus estudos, os custos com reparos futuros em uma estrutura com concreto comum são de até 15 vezes maior do que uma com os métodos de autocicatrização, é visto que medidas preventivas fazem diferença a longo prazo.

5.4.3 Discussão de viabilidade dos métodos

Se olharmos aqui para Brasil como exemplo, um estudo feito por Silva (2018), revelou que das 166 obras que ele visitou, 69% delas apresentam patologias em construções que estão ligadas a corrosão da armadura, causadas por exposição da armadura a atmosfera, ou seja, ocasionadas inicialmente por trincas e fissuras. Nesse contexto se a maioria dessas patologias pudessem ser evitadas com a utilização do bioconcreto ou do concreto autocicatrizante, teríamos por volta de 69% do dinheiro economizado, ao invés de gastar em manutenções.

Schmidt (2019), fez uma publicação no jornal O Globo, em que a prefeitura do Rio de Janeiro gastou apenas R\$ 439 mil em manutenção, dentre elas sendo: viadutos, pontes, passarelas e túneis e comparou os gastos com os anos anteriores conforme a figura 25 abaixo. Esses dados teriam sido tirados do sistema Fincon e nas prestações de contas da prefeitura.

Figura 25 – Despesas com manutenção no Rio de Janeiro

GASTOS ANUAIS COM VIADUTOS, PONTES, PASSARELAS E TÚNEIS



Fonte: Jornal O Globo (2019).

Com os dados apresentados até o momento, se analisarmos o estudo de Silva, que 69% das estruturas sofrem com as ações patológicas, e comparar com os gastos anuais da prefeitura do Rio de Janeiro apresentado na publicação de Schmidt, poderíamos tirar algumas conclusões de viabilidade comparando essas duas informações.

Com a utilização de qualquer um dos métodos tanto o bioconcreto quanto o concreto autocicatrizante, hipoteticamente com os efeitos das propriedades cicatrizantes esses 69% que apresentam patologias não necessitariam manutenções das estruturas, ou seja, não teriam mais essas despesas e iria ser economizado um bom dinheiro, trazendo essa economia para os gastos da prefeitura do Rio de Janeiro, teríamos um valor real de quanto seria gasto em manutenção nas estruturas. Conforme a tabela 3, apresenta uma economia anual gigantesca.

Tabela 3 – Valor real gasto em manutenção com o uso dos métodos

Ano	Despesa em Manutenção	69% de economia	Valor Real da Manutenção
2010	R\$ 1.352.000,00	R\$ 932.880,00	R\$ 419.120,00
2011	R\$ 2.297.000,00	R\$ 1.584.930,00	R\$ 712.070,00
2012	R\$ 5.651.000,00	R\$ 3.899.190,00	R\$ 1.751.810,00
2013	R\$ 8.761.000,00	R\$ 6.045.090,00	R\$ 2.715.910,00
2014	R\$ 4.800.000,00	R\$ 3.312.000,00	R\$ 1.488.000,00
2015	R\$ 1.241.000,00	R\$ 856.290,00	R\$ 384.710,00
2016	R\$ 1.759.000,00	R\$ 1.213.710,00	R\$ 545.290,00
2017	R\$ 1.183.000,00	R\$ 816.270,00	R\$ 366.730,00
2018	R\$ 1.184.000,00	R\$ 816.960,00	R\$ 367.040,00
2019	R\$ 439.000,00	R\$ 302.910,00	R\$ 136.090,00

Fonte: Autor, adaptado da figura 16.

Podemos assim observar o impacto de uma pequena bactéria no concreto ou do uso de aditivos cicatrizantes no concreto, visto a economia com gastos em manutenção que poderíamos obter, e dizer com propriedade que o investimento na implantação desses métodos, no lugar do concreto comum, pode ser tirado em poucos anos.

5.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS

As vantagens e desvantagens mostram os motivos, os benefícios, qualidades ou não, de utilizar ou analisar, algum tipo de produto que foi lançado no mercado e que gera opiniões sobre o mesmo descrevendo as suas características de uso.

5.5.1 Vantagens e desvantagens do bioconcreto

Segundo Salomão e Pinheiro (2019), as vantagens que o bioconcreto proporciona para as estruturas são inúmeras, como o aumento da resistência em comparação com concretos comuns, a autoreparação de fissuras ou trincas, a redução da corrosão do aço devido às características da bactéria, a redução da permeabilidade do concreto, e o fato de que a bactéria é inofensiva tanto ao ser humano quanto ao ambiente. Sendo assim podemos dizer que as vantagens são consideráveis, porém o aperfeiçoamento do produto pode potencializar tanto o seu rendimento quanto o seu controle. A maior vantagem para eles é a finalidade do produto sem dúvida, a redução ou minimização da constante intervenção humana de correção de fissuras nas estruturas, que consiste no processo de remoção e reparação dos locais afetados.

Dentre das desvantagens temos aspectos menos relevantes, onde o próprio criador cita "Apesar de ser mais caro que o concreto tradicional, o benefício econômico é perceptível, pois economiza em custos de manutenção" (JONKERS, 2015).

Segundo Salomão e Pinheiro (2019), as desvantagens são poucas mais compreensíveis, temos o custo elevado em comparação com concretos comuns, o fato de que o crescimento de bactérias tem que fazer em ambiente controlado se não elas morrem, os estudos e o seu desenvolvimento são caros, as argilas expandidas quando usadas além de ocuparem bastante espaço na mistura, podem propiciar a formação de “zonas de cisalhamento” além da inacessibilidade devido a recente emergência dessa tecnologia.

Um estudo feito por de Luo et al. (2015), acrescenta mais uma desvantagem ao bioconcreto que é o surgimento de fissuras em idades mais tardias ainda é um desafio para os agentes cicatrizantes bacterianos, dado que sua atividade metabólica se reduz ao longo do

tempo. Para Li et al, (2019), isso ocorre devido à falta de nutrientes ou oxigênio para as bactérias, e ao fechamento dos poros da matriz cimentícia ao longo do tempo, onde a reprodução das células bacterianas se torna inviável, e leva à morte as colônias de bactéria, diminuindo a capacidade autocicatrizante do compósito ao longo do tempo.

5.5.2 Vantagens e desvantagens do concreto autocicatrizante

Para Araújo et al. (2018), as principais vantagens dos concretos autocicatrizantes são ter menor permeabilidade, uma alta resistência a pressões hidrostáticas positivas e negativas, os selamentos de microfissuras de até 0,4 mm, uma resistência maior a ataques químicos, tem um aumento da durabilidade da estrutura, e a redução de etapas de impermeabilização da obra e incremento de resistência à compressão. Além disso esse concreto facilita a manutenção de estruturas enterradas ou em áreas de difícil acesso, e reduz impactos ambientais.

Segundo Araújo et al. (2018), se comparar a quantidade de manutenções feitas nas estruturas de forma tradicional, pode-se dizer que a escolha do concreto autocicatrizante é mais vantajosa, sendo que as propriedades duram na estrutura cerca de 20 a 30 anos mais do que o concreto comum.

Segundo Tavares et al. (2020), uma desvantagem do concreto autocicatrizante é ser 30% mais caro que um concreto comum, sendo que esse método não deve ser aplicado em qualquer tipo de estrutura, sendo recomendado para construções pesadas, tais como reservatórios, estruturas de saneamento, túneis e estações de metrô.

5.5.3 Discussão das vantagens e desvantagens dos métodos

Visto as propriedades de cada método e como solucionam os problemas nas estruturas, posso dizer que os dois métodos se tornam viáveis para serem usados na autoreparação das estruturas e suas vantagens fazem com que desperte o interesse de usar esses métodos. O custo da aplicação é a principal desvantagem nos dois casos, se torna em alguns casos um pouco mais elevado que o uso do concreto comum, mas devido as suas propriedades, ao longo do tempo faz com que o investimento se pague, pois limita muitos tipos de gastos com manutenções na estrutura.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa abordou um estudo comparativo entre métodos de recuperação de estruturas por processos de autocura entre o bioconcreto e o concreto autocicatrizante. Nesse trabalho busco esboçar alguns tópicos relevantes sobre o assunto, para permitir a compreensão desses processos de autocura.

Como foi visto as estruturas em concreto, sofrem com as ações de patologias, que começam através de fissuras ou trincas que aparecem no concreto, devido a expansão térmica ou a movimentação de solo, com isso as aparições das fissuras comprometem a integridade do aço e as propriedades do concreto, onde variados tipos de ações patológicas como vimos ocorrem na estrutura, como por exemplo, a corrosão, ataque a sulfatos e carbonatação. Por isso a necessidade de apresentar nesse trabalho as propriedades, e os benefícios que temos de implantar os processos de autocura do concreto como um meio fácil, viável, e sem agredir o meio ambiente, sendo que seu uso é bem mais vantajoso que os processos de reparos comuns.

Em resultados e discussões apresentei os principais tópicos de estudo que se tem sobre esses métodos em atualidade para uma melhor compreensão do trabalho, em aplicabilidade mostro os lugares que já foram aplicados esses processos, em análises de estudos de laboratório no brasil apresento as pesquisas de alguns estudantes e professores, em cima das propriedades autocicatrizantes, onde detalha como fazer as amostras em laboratório, para assim executar os testes, em ensaios de rupturas temos os corpos de prova sobre a força de compressão estimando as suas resistências e assim com os valores comparando os métodos, em análise de viabilidade econômica, temos os benefícios econômicos de usar os concretos cicatrizantes nas estruturas, e nas vantagens e desvantagens temos algumas características que provam ou não a eficiência de cada processo.

E ter encontrado essas informações proporcionou um enriquecimento de conhecimento, pois a partir da leitura, podemos despertar em nossa mente a curiosidade, e querer ver esses métodos funcionando na prática, e fazer testes com eles, o bioconcreto por exemplo é um material que está em fase de teste ainda no mundo, existe pouca aplicação dele, e quem sabe como trabalho futuro, podemos trazer para o laboratório do nosso campus, o desenvolvimento de pesquisa com amostras, para executarmos teste em cima do material para assim incentivarmos o uso e comprovar ainda mais a eficiência desse processo.

REFERÊNCIAS

- AGUADO, A.; DÍAS, C.; AGULLÓ, L.; ALEGRE, V.; CASANOVAS, X. Orientación para la Selección de la Intervención. In Paulo Helene & Fernanda Pereira (Eds). **Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección**. São Paulo, 2003. Cap 3.
- ALGHAMRI, R.; KANELLOPOULOS, A.; AL-TABBAA, A. **Impregnation and Encapsulation of Lightweight Aggregates for Self-Healing Concrete**. Construction and Building Materials, V. 124, P. 910-921, 2016.
- ALMEIDA, Bruno Lored. VOZINIÁK, Rafaela. **Contribuição ao Estudo da Autocicatrização em Argamassas de Cimento Portland**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Paraná, Curitiba - PR, 2019.
- ALMEIDA, I, R. **A onda de concreto que flutua no M.A.R.** Revista de Concreto & Construções. IBRACON Vol. 72. 2013.
- ALEXIA, Rebeca (2017). **Bioconcreto: o concreto que se autoregenera**. Disponível em: <<https://www.geotesc.com.br/site/tag/bacillus-pseudofirmus/>> Acesso em: 13 de outubro de 2021.
- ARAÚJO, R.C.L.; RODRIGUES, L.H.V.; FREITAS, E.G.A. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro, 2000. (Apostila). Disponível em: <<http://engenhariaconcursos.com.br/arquivos/Materiais/concretosimples.pdf>>. Acessado em: 10 de abril de 2021.
- ARAÚJO, Carlos Eduardo S.B de, ABREU, Brendon Garcia, ÓRFÃO, Ronaldo Barros, AMARANTE, Mayara dos Santos. **Bioconcreto**. Revista Diálogos Interdisciplinares 2019 VOL. 8 N° 2 - ISSN 2317-3793
- ARAÚJO, Frank Albert Soares. **Avaliação de Propriedades Físicas e Mecânicas em Concretos Produzidos com Materiais da Cidade de Manaus com o uso de Redutores de Permeabilidade por Cristalização**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus – 2020.
- ARAÚJO, Denise Torbolo. GODINHO, Paula Ferraz. TANAKA, Yuri Gonçalves. **Desenvolvimento de Metodologia para Verificação de Selamento de Fissuras e Incremento de Resistência em Concreto Autocicatrizante**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul – SP, 2018.
- ASSUNÇÃO, J. A. de. H. R. **Patologia e Terapia dos Edifícios do Tribunal de Justiça do Estado de Minas Gerais**. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG,2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto para fins Estruturais**. NBR 8953 Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – métodos de ensaio**. NBR 12118, Rio de Janeiro 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e Execução de Obras em Concreto Armado – Procedimento**. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

BARROS, Leonardo., NASCIMENTO, Edievan. **Bioconcreto**. Artigo Acadêmico. Universidade São Francisco, São Paulo - SP, 2019.

BERNARDINO DA SILVA, L. M. S. **Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

BOCCATO, V. R. C. “**Metodologia da pesquisa bibliográfica na área odontológica e o artigo científico como forma de comunicação**”. Rev. Odontol. Univ. Cidade São Paulo, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 265-274, 2006.

BRITO, A. V. & NASCIMENTO, M. S. (2018). **A implantação do Bioconcreto desenvolvido para solucionar problemas estruturais tais como: Fissuras, Rachaduras e Trincas**. Revista Científica Semana Acadêmica. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/bioconcreto-_pos_grad.1_artigo_0.pdf>. Acessado em: 30 de setembro de 2021.

BRITEZ, C.; PACHECO, J; BUENO, S.; HELENE, P.; **Concreto e Concretagem de Paredões Inclinados em Concreto Aparente**. Caso MIS-RJ. 58º Congresso Brasileiro de Concreto. Belo Horizonte, 2016.

BRITEZ, C.; PACHECO, J; BUENO, S.; HELENE, P.; **Estanqueidade de Lajes de Subpressão**. Caso MIS-RJ. 55º Congresso Brasileiro de Concreto. Belo Horizonte, 2013.

CADORE, W. W. **Estudo da Carbonatação da Camada de Cobrimento de Protótipos de Concreto com Altos Teores de Adições Minerais e Cal Hidratada**. 2008. 150 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CARNAVAL, M. **Crea Alerta para o Perigo de Passar sob Viadutos sem Manutenção, 2011**. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/rio/transito/crea-alerta-para-perigo-depassar-sob-viadutos-sem-manutencao-2875948>>. Acessado em: 03 de abril de 2021.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas usuais de Concreto Armado**, Editora Udufscar, São Carlos, 2015.

CAMADURO, J. R.; ISMAEL, W.; ZATT, P. J. R. **Um Estudo sobre Fissuras em Concreto Armado**. Maringá, PR. 6P. Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá. Maringá, 2000.

COLLINS, C. ET AL. **Alkali-silica Reaction the Cancer of Concrete**. Disponível em: <<http://www.ce.gatech.edu/~kkurtis/asr.ppt>>. Acessado em: 15 de maio de 2021.

DOTTO, Joseanne Maria Rosarola. **Ataque por íons de cloreto custa R\$ 800 milhões por ano ao Brasil**. Entrevistador: Altair Santos. Ago. 2012. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/ataques-por-ions-de-cloreto-custa-r-800-milhoes-porano-ao-brasil/>>. Acessado em: 08 de maio de 2021.

DE BELIE, N.; GRUYAERT, E.; AL-TABBAA, A.; ANTONACI, P.; BAERA, C.; BAJARE, D.; DARQUENNES, A.; DAVIES, R.; FERRARA, L.; JEFFERSON, T.; LITINA, C.; MILJEVIC, B.; OTLEWSKA, A.; RANOGAJEC, J.; ROIG-FLORES, M.; PAINE, K.; LUKOWSKI, P.; SERNA, P.; TULLIANI, J.; VUCETIC, S.; WANG, J.; JONKERS, H. M. **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures**. *Advanced Materials Interfaces*, P. 1800074, 2018.

DRY, C. M. **Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices**. *Smart Materials and Structures*. Volume 3, Number 2, dez. 1994. pp. 118-123.

EDVARDBSEN, C. K. **Water permeability and self-healing of through-cracks (in German)**. *DAfStb Bull. Berlin.*: [s.n.]. 1996.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; CARSANA, M. A. **Fracture Testing based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures**. *Construction and Building Materials*. v. 68, p. 535–551, 15 out. 2014.

FIGUEIREDO, Enio P.; MEIRA, Gibson R. **Corrosão das Armaduras das Estruturas de Concreto**. México: Boletim Técnico Alconpat Internacional, V. 6, 2013. Disponível em: <<http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/2012/09/b6-corros%c3%a3o-das-armadurasdas-estruturas-de-concreto.pdf>>. Acessado em: 08 de maio de 2021.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

GIONGO, LEONARDO C. **Análise de Processos Corrosivos de Armaduras em Edificações de Concreto Armado**. 2015. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/engcivil/images/pdf/2_2015/tcc_leonardo%20casales%20giongo.pdf>. Acessado em: 08 de maio de 2021.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1999.

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

GRAU, Alessandra Costa. BARBOSA, Maria Daniele Santos. **Concreto Autocicatrizante com Escória de Alto Forno e Aditivo por Catalisador Cristalino**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Católica Dom Bosco (UCDB), Mato Grosso do Sul, Campo Grande - MS, 2020.

HEIDE, N. T. **Crack healing in hydrating**. Delft: University of Technology - Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2005.

HELENE, Paulo R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986.

HELENE, Paulo R.L. **Manual Prático para Reparo e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1988.

HELENE, P., TUTIKIAN, B. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. *Concreto: Ciência e Tecnologia*, V. 1, P. 415-51, 2011.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. V. 01, São Paulo: IBRACON, 2005, 792 p.

JONKERS, H.M. **Self healing concrete: A biological approach**. In *Self healing materials – An alternative approach to 20 centuries of materials science* (ed. S. van der Zwaag), 195–204 (2007) Springer, the Netherlands.

JONKERS, H. M., THIJSEN, A., MUYZER, G. COPUROGLU, O., SCHLANGEN, E. **“Application of bacteria as self-healing agente fot thr development of sustainable concrete”**, *Ecological Engineering*, V.36, p.230-235 (2010).

JONKERS, H. **Self-Healing Concrete**. *Ingenia Magazine*, UK, n. 46, p. 39-46, 2011. ISSN 1472-9768.

JONKERS, H. M. **Bacteria-based self-healing concrete**. Delf, The Netherlands: Delf University of Technology, Faculty of Civil Engineering and GeoSciences, Departament of Materials and Enviroment, 2011.

JONKERS, H.M., MORS R. **Reduction of Water Permeation through Cracks in Mortar by Addition of Bacteria based Healing Agent**, 2015.

KAEFER, L.F. **A Evolução do Concreto Armado**, 1998. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/HistoriadoConcreto.pdf>>. Acessado em: 10 de abril de 2021.

KHALIQ, Wasim; EHSAN, Muhammad Basit. **Crack Healing in Concrete Using Various Bio Influenced Self-Healing Techniques**. *Construction and Building Materials*. v. 102, p. 349-357, 2016.

LOURENÇO, M. Z. **Técnicas eletroquímicas para a reabilitação de estruturas**. In Daniel Vêras Ribeiro (org). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

LI, L., ZHENG, Q., LI, Z., ASHOUR, A., HAN, B. **Bacterial Technology-Enabled Cementitious Composites: A Review**. *Composite Structures*, V.225, 2019.

LUO, M., QIAN, C., LI, R. **Factors Affecting Crack Repairing Capacity of Bacteria-Based Self-Healing Concrete**. *Construction and Building Materials*, V.87, 2015.

MATTOS, P. M. F. **Patologia Estrutural em duas obras da UFPB e Soluções de Recuperação e Reforço**. 143 F. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

MAZER, WELLINGTON. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba – Paraná, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M; CARMONA FILHO, A. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Pini, 1994.

MEHTA, K.P.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, F. G. B.; RUAS, B. L. A.; SILVA, R. K. R.; MELO, T. M.; ELEUTÉRIO, I. A. R.; COSTA, R. A. L. GOMES. L. S. P. **Concreto Autorregenerativo: uma Revisão Bibliográfica sobre suas Propriedades e Benefícios para as Estruturas de Concreto**. Anais de eventos. 10º FEPEG. Montes Claros, 2016.

MEDEIROS, Diego Padilha da Cruz. **Uso de Bactérias (Bacillus Subtilis e Bacillus Cereus) na Produção de Bioconcreto**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, 2020.

MIHASHI, H.; KANEKO, Y.; NISHIWAKI, T.; OTSUKA, K. **Fundamental Study on Development of Intelligent Concrete Characterized by Self-Healing Capability for Strength**. Transactions of the Japan Concrete Institute, V. 22, P. 441-450, 2001.

MOREIRA, M. M. **Efeito do Aditivo Redutor de Permeabilidade em Concretos com Diferentes Tipos de Cimento Portland – Contribuição aos Processos de Autocicatrização**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

NASCIMENTO, Marlesson Soares do. **A Implantação do Bioconcreto Desenvolvido para Solucionar Problemas Estruturais tais como: Fissuras, Rachaduras e Trincas**. Artigo Pós Graduação, Centro Universitário Do Norte – UNINORTE, Manaus - 2018.

NASIM, M.; DEWANGAN, U. K.; DEO, S. V. **Autonomous Healing in Boncrete by Crystalline Admixture: A review**. Materials Today: Proceedings, 2020.

NASIM, M.; DEWANGAN, U. K.; DEO, S. V. **Effect of crystalline admixture, fly ash, and PVA Fiber on Self-healing Capacity of Concrete**. Materials Today: Proceedings, 2020.

NEPOMUCENO, A. A. **Mecanismo de Transporte no Concreto**. IN: ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 2ª ED. IBRACON, 2005.

NETO, E. H. **Estruturas de Concreto Armado: A Proteção do Aço pelo Concreto**. Disponível em: <<http://www.metallica.com.br/estruturas-de-concreto-armado-aprotecao-do-aco-pelo-concreto>> Acessado em: 03 de abril de 2021.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ED. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013. 448 P

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de: GIAMMUSSO, S. E. 2. ED. São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA, T. Y. M. **Estudo sobre o uso de Materiais de Construção Alternativos que Otimizam a Sustentabilidade em Edificações**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 114 p. Rio de Janeiro, 2015.

OLIVEIRA Leilson Nascimento de. BRITO Charles Ribeiro de. OLIVEIRA, Giuliana Leitão. ALENCAR, David Barbosa de. NASCIMENTO, Manoel Henrique Reis. **Análise do Concreto Autocicatrizante para Alta Durabilidade do Concreto Estrutural**. Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications, 2019. Edition. 17.Vol: 05 ISSN: 2447-0228.

OLIVEIRA, Tassiane Apolinário de. **Autocicatrização Autônoma de Concretos com Adição de Nanorreservatórios de Sílica e Ldhs de Nitrito Sujeitos à Ação de Íons Cloreto ou Sulfato**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – 2019.

PANG, B. et al. **Autogenous and engineered healing mechanisms of carbonated steel slag aggregate in concrete**. Construction and Building Materials, v. 107, p. 191–202, 15 mar. 2016.

PEDROSO, Fábio Luís. **Concreto: as Origens e a Evolução do Material Construtivo mais usado pelo Homem**. Revista Concreto e Construções, 2009. ISSN 1809-7197.

PERUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 5ª ed. Porto Alegre, RS: Globo, 1980.

PIANCASTELLI, Élvio M. **Comportamento e Desempenho do Reforço a Flexão de Vigas de Concreto Armado, Solicitado a Baixa Idade e Executado Inclusive sob Carga**. 1997. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) -Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

PIANCASTELLI, E. M. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1998. 160p.

PINHEIRO. L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Universidade de São Paulo. 380 p. São Carlos, 2007.

POOLE, A. B. **Introduction to Alkali Aggregate Reaction in Concrete**. IN: SWAMY, R. N. (ED.). The Alkali-Silica Reaction in Concrete. Glasgow: Blackie and Son, 1992. P. 1- 29.

Portal Itambé. **Brasil omeça a desenvolver Concreto Cicatrizante**. Curitiba - PR, 2016. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/brasilconcreto-cicatrizante/>>. Acessado em: 02 de novembro de 2021.

QUESADA, G. **Procedimientos de Reparación**. In Paulo Helene & Fernanda Pereira (Eds). **Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección**. São Paulo, 2003. Cap 6.

RIPPER, Thomaz; SOUZA, Vicente Custódio Moreira. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 5. ed. São Paulo: Pini, 1998.

REIS, Lília Silveira Nogueira. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2001. 112f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

REIS, L.G.V. **Biotecnologia Microbiana da construção: Potencial de Biomineralização de Bactérias Ureolíticas de solo de Cerrado e de Rejeitos da Construção Civil**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

SALOMÃO, Pedro Emílio Amador. PINHEIRO, Alexandre Victor Silva. **O Potencial do Concreto Vivo Como Alternativa Para Regenerar Estruturas Expostas a Ambientes Agressivos**. Artigo Acadêmico. Universidade Presidente Antônio Carlos (UNIPAC), Itajubá - MG, 2019.

SANTOS, Romário J. **Análise de Estirpes Bacterianas com Potencial Aplicação em Processos de Auto-Cura de Material Cimentício via Bioprecipitação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, 2018.

SILVA, Aline M. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica do uso do bioconcreto em substituição ao concreto comum**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Faculdade de Ciências Humanas e Sociais da Fundação Carmelitana Mário Palmério – FUCAMP, 2018.

SILVA, F. P. C.; PASSARINI, Victor de Carvalho. **Bioconcreto: A tecnologia para Construção Sustentável**. Complexo Educacional Faculdade Metropolitana Unidas. São Paulo, Vol.5, N.2, 2017.

SILVA, Edna Lúcia, MENEZES, Estera Muszkat. **“Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação”**. Florianópolis: UFSC, 2005.

SILVA, Daniel Henrique. **Recuperação de estruturas de concreto – Corrosão das Armaduras**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 10, Vol. 02, 2018. ISSN:2448-0959

SILVA, Lucas Ferreira da. **Estudo do Bioconcreto para Solução de Problemas Estruturais na Construção Civil**. Artigo apresentado a Faculdade Presidente Antônio Carlos ao Curso de Engenharia Civil, Teófilo Otoni – MG, 2019.

SCHMIDT, Selma. **Verba da Prefeitura Destinada a Investimentos em Túneis, Viadutos e Pontes está Zerada**. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/rio/verba-da-prefeitura-destinada-investimentos-em-tuneis-viadutos-pontes-esta-zerada-23676206>>. Acessado em 04 de novembro de 2021.

SOUZA, V. C. M., RIPPER T. P., **Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto [LIVRO]**. - São Paulo: PINI, 1998.

SOUZA, V.C. M.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo, PINI, 2009. 250P.

TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. **Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials - A review**. Construction and Building Materials Elsevier Ltd, 2015.

TAKAGI, E. M. **Concretos Autocicatrizantes com Cimentos Brasileiros de Escória de Alto-forno Ativado por Catalisador Cristalino**. Dissertação de mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. 130 p. São José dos Campos, 2013.

TAKAGI, E.M.; LIMA, M.G.; HELENE, P.R.L. **Concretos Autocicatrizante com Cimentos Brasileiros de Escória de Alto Forno Ativados por Catalisador Cristalino**. Artigo. Revista Concreto e Construções, ed. 73. Ibracon, 2014.

TAVARES, Lucas Zacharias. NUNES, Marília Maiara Cardoso. SIQUEIRA, Matheus da Silva. **Análise Comparativa do Concreto Convencional e do Concreto com Potencial de Autocicatrização**. Centro Universitário de Lins – Unilins, Lins –SP, Revista Estudos & Pesquisas, v.1, n.1, 2020, ISSN 1415-6709.

TITTELBOOM, K. V.; DE BELIE, N. **Autogenous healing of cracks in cementitious materials with varying mix compositions**. 2nd International conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2009). Chicago, USA: Department of Structural engineering. 2009. p. p.160.

TITTELBOOM, K.V; DE BELIE, N. **Self-Healing in Cementitious Materials - A Review**. Materials, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 2013.

THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios: Causas, Prevenção e Recuperação**. São Paulo: PINI, EPUSP, IPT, 1989.

Universidade Trisul. **Concreto Autocicatrizante: Uma Inovação que veio para ficar**. Artigo. Disponível em: <<https://www.universidadetrisul.com.br/solucoesconstrutivas/concreto-autocicatrizante-uma-inovacao-que-veio-para-ficar>>. Acessado em: 05 de novembro de 2021.

VIEIRA, M.M. **Patologias em Estruturas de Concreto** (2016) - Universidade de Araraquara (UNIARA).

VIJAY, K., MURMU, M., DEO, S. V. (2017). **Bacteria Based Self Healing Concrete—a Review**. Construction and Building Materials, 152, 1008-1014.

WANG, JIANYUN ET AL. **Application of Modified-Alginate Encapsulated Carbonate Producing Bacteria in Concrete: a Promising Strategy for Crack Self-Healing**. Frontiers in Microbiology, V. 6, 2015.

WHITE, S. R. et al. **Autonomic healing of polymer composites**. Nature Publishing Group, 15 fev. 2001. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/35057232>>. Acessado em: 24 de setembro de 2021.

ZWAAG, S. V. D. **Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of material science**. University of Michigan: Springer, 2007.

ZHANG, W.; WANG, D.; HAN, B. **Self-healing concrete-based composites**. In: **Self-Healing Composite Materials**. [s.l.] Elsevier, 2020.

ZHANG, W. et al. **Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A Review Composites Part B, Engineering**. Elsevier Ltd, 2020.