

**REVISÃO DO PROCESSO DE AUTO CICATRIZAÇÃO APLICADO EM
ARGAMASSAS E CALDAS DE INJEÇÃO: UMA PROPOSTA DE PESQUISA
EXPERIMENTAL**

Nicholas Borchardt Galli

Relatório Final de Projeto apresentado à
**Escola Superior de Tecnologia e
Gestão Instituto Politécnico de Bragança**

Para a Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Bragança

2023

**REVISÃO DO PROCESSO DE AUTO CICATRIZAÇÃO APLICADO EM
ARGAMASSAS E CALDAS DE INJEÇÃO: UMA PROPOSTA DE PESQUISA
EXPERIMENTAL**

Nicholas Borchardt Galli

Relatório Final de Projeto apresentado à
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

Para a Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção
No âmbito da dupla diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientadora:

**Professora Doutora Eduarda Cristina Pires Luso
Instituto Politécnico de Bragança**

Orientador:

**Professor Doutor Arthur Medeiros
Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

Bragança

2023

*A pandemia de angústia mental que aflige nosso tempo
não pode ser devidamente compreendida, ou curada,
se vista com um problema privado sofrido por indivíduos prejudicados.*

Mark Fisher

AGRADECIMENTOS

A minha falecida vó Elaine. Levarei para sempre comigo seu carinho, sua alegria e sua fé.

A minha mãe e ao meu pai, por serem meus exemplos dentro e fora da engenharia. Por eles sei que qualquer obstáculo pode ser superado. Sou grato por tudo o que fizeram e fazem por mim, tudo o que sou é graças ao amor que recebi de vocês.

A minha irmã, pela amizade e companheirismo. Que mesmo sem perceber me ensina muito e me ajudou a chegar até aqui.

A minha namorada pelos melhores anos da minha vida, que me ensinou a confiar mais em mim mesmo e por me apoiar nos momentos de dificuldade. O mais difícil nós já temos, o resto resolvemos juntos.

Aos demais familiares por me tratarem sempre com muito carinho, atenção, me apoiando e incentivando durante todos estes anos.

Aos meus amigos de Curitiba, em especial aos colegas da UTFPR, por todos estes anos de ajuda e companheirismo.

Ao professor Arthur que me auxiliou e apoio neste projeto e durante meu período na UTFPR.

À professora Eduarda pela oportunidade de estudar me aprofundar no tema a respeito de processos autocicatrizantes e reabilitação de edifícios.

E a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por fornecer um ambiente tão rico em conhecimento e acolhedor. Que, em colaboração com o Instituto Politécnico de Bragança, dar a oportunidade a tantos alunos de vivenciarem esta troca cultural.

RESUMO

Patrimônios históricos, como antigas construções, são um tipo de documento histórico vulnerável devido à exposição a diversos intemperismos naturais e antropogênicos. Na Europa, muitos dos patrimônios históricos são formados por alvenaria de pedra, os quais muitas vezes apresentam baixa compacidade (devido à presença de vazios internos e fissuras) e ligações inadequadas. Para manter estas estruturas, sem danificar seus aspectos estéticos e estruturais, é necessário realizar estudos de reabilitação. A principal técnica de reabilitação recomendada pelo Conselho Nacional dos Monumentos e Sítios (ICOMOS) é a aplicação de caldas de injeção. O presente trabalho tem como objetivo estudar a possibilidade da aplicação de materiais autocicatrizantes nas caldas de injeção. A auto cicatrização é o processo automático realizado pelo material de selar parcialmente ou completamente suas fissuras. Para isto, foi realizada uma revisão bibliográfica das tecnologias dos processos autocicatrizantes e avaliada a possibilidade da aplicação desta técnica em caldas de injeção de alvenaria antiga à base de cal. Verificou-se que os métodos autógenos como o uso de cinzas volantes e o uso de polímeros superabsorventes podem ser compatíveis com a técnica de injeção de caldas, com destaque para a utilização de microcápsulas. Os compostos biológicos (*Bacillus sphaericus*, *Bacillus megaterium*) e os químicos (epóxi, o silicato de sódio), apresentam baixa porosidade e baixa taxa de exsudação (tais propriedades são desejadas em injeções de caldas). Por fim, ressalta-se a importância desta investigação para a área de reabilitação de patrimônios históricos pois possibilita uma maximização nos processos restaurativos.

Palavras-chave: Caldas de injeção; Concreto autocicatrizante; Reabilitação.

ABSTRACT

Historical heritage, such as ancient buildings, are a type of fragile historical document due to exposure to various natural and anthropogenic weathering. In Europe, many of the historical patrimonies are formed by stone masonry, which often have low compactness (due to the presence of internal voids and fissures) and inadequate connections. To maintain these structures, without damaging their aesthetic and structural aspects, it is necessary to carry out rehabilitation studies. The main rehabilitation technique recommended by the National Council of Monuments and Sites (ICOMOS) is the application of injection grout. The present work aims to study the possibility of applying self-healing in injection grouts. Self-healing is the automatic process carried out by the material to partially or completely seal its cracks. For this, a bibliographic review of the technologies of the self-healing processes was carried out and the possibility of applying this technique in old lime-based masonry injection grouts was evaluated. It was found that autogenous methods such as the use of fly ash and the use of superabsorbent polymers can be compatible with the injection technique, with emphasis on the use of microcapsules. Biological compounds (*Bacillus sphaericus*, *Bacillus megaterium*) and chemical compounds (epoxy, sodium silicate) have low porosity and low exudation rate (such properties are desired in grout injections). Finally, the importance of this investigation for the area of rehabilitation of historical heritage is highlighted, as it allows for a maximization of the restorative processes.

Keywords: Injection grouts; Self-healing concrete; Rehabilitation.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	6
1.1. Objetivo	7
1.2. Justificativa.....	8
1.3. Conteúdo e estrutura da tese	8
2. CONCRETO AUTOCICATRIZANTE.....	9
2.1. Autógenos	10
2.1.1. Cinzas volantes.....	15
2.1.2. Utilização de polímeros superabsorventes (SAP).....	20
2.2. Autônomos	27
2.3. Ensaio para avaliação da capacidade de cura	42
3. CALDAS DE INJEÇÃO	44
3.1. Propriedades	44
3.2. Materiais utilizados	45
3.3. Aplicação e Ensaio	47
4. PLANO DE TRABALHO	53
4.1. Seleção dos Métodos	53
4.2. Composição base.....	54
4.3. Cinzas Volantes.....	54
4.4. Polímeros superabsorventes	55
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	57
5.1. Considerações finais	57
5.2. Trabalhos futuros.....	57
6. REFERÊNCIAS	59

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - TÉCNICAS DE ENCAPSULAMENTO COM AGENTES BACTERIANOS (ADAPTADO DE AMRAN <i>ET AL.</i> , 2022)	35
TABELA 2 - TÉCNICAS DE ENCAPSULAMENTO COM AGENTES QUÍMICOS (ADAPTADO DE AAMAR DANISH <i>ET AL.</i> , 2020)	40
TABELA 3- PROPRIEDADES NECESSÁRIAS PARA CALDAS DE INJEÇÃO (ADAPTADO DE LUSO <i>ET AL.</i> , 2007)	46
TABELA 4 - COMPOSIÇÕES PARA ESTUDOS COM CINZAS VOLANTES	55

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - PROCESSO DE SELAGEM, FISSURA REALIZADA COM IDADE DE 3 DIAS, ABERTURA INICIAL DE 50 MM (ADAPTADO DE JAROENRATANAPIROM E SAHAMITMONGKOL, 2011)	12
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DAS ABERTURAS EM CONCRETO COM 1 MÊS E A/C 0,60 (ADAPTADO DE GAGNÉ E ARGOUGES, 2012)	13
FIGURA 3 - EVOLUÇÃO DAS ABERTURAS EM CONCRETO COM 1 MÊS E A/C 0,45 (ADAPTADO DE GAGNÉ E ARGOUGES, 2012)	13
FIGURA 4 - EVOLUÇÃO DAS ABERTURAS EM CONCRETO COM 1 MÊS E A/C 0,35 (ADAPTADO DE GAGNÉ E ARGOUGES, 2012)	14
FIGURA 5 - EVOLUÇÃO DAS ABERTURAS EM CONCRETO COM 6 MESES E A/C 0,60 (ADAPTADO DE GAGNÉ E ARGOUGES, 2012)	14
FIGURA 6 - EVOLUÇÃO DAS ABERTURAS EM CONCRETO COM 6 MESES E A/C 0,35 (ADAPTADO DE GAGNÉ E ARGOUGES, 2012)	15
FIGURA 7 - VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA (F'C) E PERMEABILIDADE (RCPT) ANTES DO PROCESSO DE CICATRIZAÇÃO (ADAPTADO DE ŞAHMARAN <i>ET AL.</i> , 2008)	16
FIGURA 8 - VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA (F'C) E PERMEABILIDADE (RCPT) APÓS 15 DIAS DE CICATRIZAÇÃO (ADAPTADO DE ŞAHMARAN <i>ET AL.</i> , 2008)	17
FIGURA 9 - VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA (F'C) E PERMEABILIDADE (RCPT) APÓS 30 DIAS DE CICATRIZAÇÃO (ADAPTADO DE ŞAHMARAN <i>ET AL.</i> , 2008)	17
FIGURA 10 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO CAPILAR (ADAPTADO DE ŞAHMARAN <i>ET AL.</i> , 2008)	18
FIGURA 11 - QUANTIDADE DE C-S-H PRODUZIDO COM DIFERENTES TAXAS DE CINZAS VOLANTES (ADAPTADO DE TERMKHAJORNKIT <i>ET AL.</i> , 2006)	19
FIGURA 12 - SISTEMA DE AUTO SELAGEM UTILIZANDO SAP (ADAPTADO DE LEE <i>ET AL.</i> , 2015)	20
FIGURA 13 - PROCEDIMENTO DO TESTE DE OBSERVAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO DE CRISTAIS AO REDOR DA FIBRA. A) DIVISÃO DA VIGA EM DUAS METADES. B) IMERSÃO DAS METADES EM ÁGUA. C) OBSERVAÇÃO E MENSURAÇÃO DAS FIBRAS. (ADAPTADO DE NISHIWAKI <i>ET AL.</i> , 2012)	22
FIGURA 14 - IDENTIFICAÇÃO DAS PARTES ELETRONEGATIVAS DENTRO DAS COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DAS FIBRAS ESTUDADAS (ADAPTADO DE NISHIWAKI <i>ET AL.</i> , 2012)	22
FIGURA 15 - ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO EM CADA UM DOS GRUPOS DE FIBRAS ESTUDADOS (ADAPTADO DE NISHIWAKI <i>ET AL.</i> , 2012)	23
FIGURA 16 - RELAÇÃO DE TEMPO E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE ÁGUA PARA AS SÉRIES PP E C-PP (ADAPTADO DE NISHIWAKI <i>ET AL.</i> , 2012)	24
FIGURA 17 - RELAÇÃO DE TEMPO E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE ÁGUA PARA AS SÉRIES POM E EVOH (ADAPTADO DE NISHIWAKI <i>ET AL.</i> , 2012)	24
FIGURA 18 - RELAÇÃO DE TEMPO E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE ÁGUA PARA AS SÉRIES PVA-I E PVA-II (ADAPTADO DE NISHIWAKI <i>ET AL.</i> , 2012)	25
FIGURA 19 - OBSERVAÇÃO VIA MICROSCÓPIO DE PRECIPITAÇÃO AO REDOR DAS FISSURAS (ADAPTADO DE NISHIWAKI <i>ET AL.</i> , 2012)	26
FIGURA 20 - SISTEMA DE AUTO CICATRIZAÇÃO UTILIZANDO FIOS DE SMA (ADAPTADO DE KUANG E OU, 2008)	27
FIGURA 21 - A) DEFLEXÃO MÁXIMA. B) APÓS DESCARREGAMENTO A FISSURA DIMINUI, APROXIMANDO DO ASPECTO ANTES DO CARREGAMENTO (ADAPTADO DE KUANG E OU, 2008)	28
FIGURA 22 - A) FISSURA APARECE PRÓXIMA AO CENTRO DA VIGA. B) AGENTE CICATRIZANTE FLUI ATÉ O EXTERIOR E PREENCHE A FISSURA. C) FISSURA REPARADA. D) A FISSURA NÃO SE ABRE, PORÉM, OUTRA FISSURA SE FORMA NAS PROXIMIDADES (ADAPTADO DE KUANG E OU, 2008).	29

FIGURA 23 - A) FIBRAS REVESTIDAS COM CERA E PREENCHIDAS COM METILMETACRILATO. B) A CERA DERRETE DEVIDO AO CALOR, METILMETACRILATO É LIBERADO DAS FIBRAS PARA AS FISSURAS. C) METILMETACRILATO POLIMERIZA E FECHA AS FISSURAS (ADAPTADO DE DRY, 2000)	30
FIGURA 24 - PERMEABILIDADE POR NÚMERO DE FIBRAS, AMOSTRAS CURADAS POR 7 DIAS, AQUECIDAS A 100°C POR 30 MINUTOS (ADAPTADO DE DRY, 2000)	31
FIGURA 25 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM AMOSTRAS COM DIFERENTES NÚMEROS DE FIBRAS. METILMETACRILATO APLICADO EM FIBRAS E NO TOPO DA AMOSTRA (ADAPTADO DE DRY, 2000)	31
FIGURA 26 - PRINCIPAIS FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA COM AGENTE CICATRIZANTE ENCAPSULADO (ADAPTADO DE JOSEPH <i>ET AL.</i> , 2010)	32
FIGURA 27 - IMAGEM MICROSCÓPICA DA AMOSTRA DE CONTROLE (A) E DA AMOSTRA COM AGENTES BACTERIANOS (B). NA DIREITA ANTES DO PROCESSO DE AUTO CICATRIZAÇÃO E NA ESQUERDA APÓS DUAS SEMANAS SUBMERSA EM ÁGUA, COM PROCESSO DE AUTO CICATRIZAÇÃO REALIZADO (ADAPTADO DE JONKERS)	35
FIGURA 28 - AMOSTRA INDICANDO A FISSURA E OS FIOS DE FERRO ATRAVÉS DA MESMA (PELLETIER <i>ET AL.</i> , 2011)	38
FIGURA 29 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORROSÃO (ADAPTADO DE PELLETIER <i>ET AL.</i> , 2011)	38
FIGURA 30 - SISTEMA PARA INJEÇÃO SOB PRESSÃO (F. VAN RICKSTAL, 2001)	48
FIGURA 31 - SISTEMA MONTADO PARA A REALIZAÇÃO DO TESTE DE INJEÇÃO (BERIL <i>ET AL.</i> , 2013)	49
FIGURA 32 - EXEMPLO DE CURVA DAS TRÊS CLASSIFICAÇÕES PARA UMA COLUNA COM ALTURA TOTAL DE 360MM (INDICADA PELA LINHA TRACEJADA). EM VERDE A COLUNA PARA A CALDA DE FÁCIL INJEÇÃO (E), EM VERMELHO A COM POSSÍVEL INJEÇÃO (F) E EM AZUL A COM DIFÍCIL INJEÇÃO (D) (ADAPTADO DE BERIL <i>ET AL.</i> , 2013)	50
FIGURA 33 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO TESTE PADRÃO ASTM C 940 (ADAPTADO DE ASHOKREDDY <i>ET AL.</i> , 2021)	51
FIGURA 34 - TESTE DE TRAÇÃO (A) E AMOSTRA TESTADA ROMPIDA (B) (BERIL <i>ET AL.</i> , 2013)	52
FIGURA 35 - SISTEMA DO ENSAIO MONTADO, O PLÁSTICO TEM A FUNÇÃO DE RETER A EVAPORAÇÃO DE ÁGUA (BERIL <i>ET AL.</i> , 2013)	52

1. INTRODUÇÃO

Patrimônios históricos, como as antigas construções de alvenaria, são um documento histórico frágil, pois são expostos a intemperismos naturais e antropogênicos. Estas construções representam a materialidade histórica, os quais guardam os caminhos do desenvolvimento de uma cidade ou vila com o passar do tempo. (Domingues *et al*, 2018).

A Europa possui variadas estruturas de alvenarias de pedra, as quais muitas vezes apresentam baixa compacidade (devido à presença de vazios internos e fissuras) e ligações inadequadas (Jorne e Henriques, 2016). Estas estruturas possuem um enorme valor patrimonial, cultural e arquitetônico, o que torna a reabilitação destas estruturas uma questão de grande interesse público (Roque, 2003).

A reabilitação, uma das áreas da construção civil, trata da recuperação de estruturas danificadas a partir de uma série de protocolos, ensaios e técnicas. O Conselho Nacional dos Monumentos e Sítios (ICOMOS) recomenda a aplicação de caldas de injeção, como primeira instância, para reabilitação das construções de alvenaria de pedras (ICOMOS, 2004).

A injeção de caldas ou *grouts* é uma das técnicas mais usadas para reparo e reforço de construções de alvenaria (Kalagri *et al.*, 2010). Este método contempla a aplicação de uma argamassa ou calda fluida nas aberturas das estruturas, com o objetivo de preencher os vazios e restabelecer suas propriedades e aspectos originais.

Este trabalho pretende investigar a utilização dos métodos de aplicação da tecnologia autocicatrizante dentro das caldas de injeção. A auto cicatrização é o resultado da reação de compostos presentes em dado material, que permite a recuperação de fissuras.

Com base na revisão bibliográfica existente da aplicação de métodos autocicatrizantes em concretos, pretende-se avaliar quais os métodos mais indicados para a aplicação em caldas de injeção e apresentar agentes cicatrizantes, cujas características resultantes da sua reação de cicatrização colaboram com as propriedades almejadas em caldas de injeção.

1.1. Objetivo

Avaliar processos de auto cicatrização existentes que podem ser aplicados em caldas de injeção para então utilizar em restaurações de alvenarias antigas a base de cal.

1.1.1. Objetivos Gerais

- Apresentar o conceito e história do concreto autocicatrizante, explicando sua origem e finalidade;
- Classificar os processos de auto cicatrização e discorrer sobre seus métodos de aplicação, sendo os principais estudados neste tema:
 - Com a aplicação de cinzas volantes;
 - Com a aplicação de polímeros superabsorventes;
 - Utilizando fibras;
 - *Shape Memory Alloy* (Ligas com Memória de Forma);
 - Com agentes encapsulados;
 - Sistemas vasculares;
- Discorrer sobre a importância da preservação de monumentos históricos e apresentar as caldas de injeção como uma das formas de reabilitação;

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar uma revisão de literatura sobre os métodos de auto cicatrização em concretos existentes;
- Avaliar os métodos existentes no campo do auto cicatrização em concretos que sejam compatíveis com o método de aplicação de caldas de injeção;
- Apontar agentes cicatrizante que possam apresentar resultados favoráveis para o uso em caldas, agregando com as propriedades desejáveis para o material.

1.2. Justificativa

O estudo da tecnologia autocicatrizante já é realizado há décadas em diversos materiais, incluindo o concreto. No entanto, pouco são os estudos cujo objetivo é focado em desenvolver as técnicas em argamassas e menor ainda em sua aplicação a caldas de injeções. Desta forma, é possível observar que existe uma lacuna nesta área de pesquisa.

Obras arquitetônicas e painéis de alvenaria frequentemente precisam de ações corretivas, muitas vezes se utilizando de ensaios destrutivos para sua reabilitação. Com o uso de técnicas autocicatrizantes em caldas de injeções é possível não apenas reabilitar essas estruturas sem intervenções agressivas, mas também aplicar um material que se reabilite automaticamente sem nenhuma ou mínima intervenção humana.

Além disso, este estudo ressalta a importância da preservação de patrimônios históricos, mais especificamente das estruturas de alvenaria, as quais guardam os caminhos do desenvolvimento da sociedade do tempo passado até a atualidade.

1.3. Conteúdo e estrutura da tese

Além deste primeiro capítulo introdutório, este trabalho apresentará mais 4 capítulos: Concreto Autocicatrizante, Pasta de Injeção, Análises e Conclusões e Trabalhos Futuros.

O capítulo 2, Concreto Autocicatrizantes, apresenta o que é a tecnologia autocicatrizante e sua importância para a construção civil. Nesta seção é apresentado seis técnicas de auto cicatrização em concreto, sendo estes subdivididos em dois grupos, conforme sua classificação. Além dos principais ensaios utilizados para avaliar o processo de autocura.

O capítulo 3, Pastas de Injeção, expõem a importância deste mecanismo de reabilitação e descreve uma série de ensaios que podem ser realizados nestes materiais.

O capítulo 4, Plano de Trabalho, porém a metodologia a ser seguida para obter resultados a respeito das aplicações do auto cicatrização em caldas de injeção.

Por fim, o capítulo 5 é dedicado a comentar sobre as conclusões obtidas e propõem uma série de estudos para seguir e aprofundar os estudos sobre este tema.

2. CONCRETO AUTOCICATRIZANTE

O processo de auto cicatrização é definido como a capacidade de um material recuperar danos provocados a sua estrutura, sejam os danos causados por meio de impactos mecânicos, variações de cargas ou variações térmicas. Nestes materiais, as propriedades e sua integridade são automaticamente recuperadas, parcialmente ou completamente, devido reações químicas que ocorrem dentro de sua matriz.

A origem dos estudos sobre mecanismos de auto cicatrização no âmbito das ciências dos materiais não é precisa, no entanto sabe-se que Maliskii *et al.* (1969) incorporou pela primeira vez esta ideia em materiais poliméricos. No final da década de 1970 trabalhos foram publicados mencionando os mecanismos de auto cicatrização em polímeros semicristalinos, polímeros vítreos amorfos e copolímeros em bloco (Wool 1979; Wool, 1981).

Somente na década de 1990 Dry (1994) aplicou o conceito de mecanismos auto cicatrização para um material diferente: o concreto. O concreto autocicatrizante, bem como o próprio nome indica é o concreto com a capacidade de cicatrizar, selar, fechar suas fissuras, contudo sem apresentar necessariamente a recuperação das condições iniciais do material, como resistência à compressão, à tração e porosidade.

Para ocorrer o processo de auto cicatrização é essencial a presença do agente cicatrizante e na maioria dos casos do catalisador. O agente cicatrizante é o principal elemento da reação de auto cicatrização, o qual pode ser de origem biológica, como bactérias do gênero *Bacillus*, ou de origem química como epóxi ou até mesmo o cimento anidro da matriz cimentícia. A energia da formação das fissuras ativa o agente cicatrizante que devido a reações químicas com o meio e o material se expande e preenche as lacunas inicialmente geradas. O catalisador é responsável por acelerar as reações químicas envolvidas, possibilitando uma recuperação mais rápida do material fissurado (Wang *et al.*, 2019).

O concreto pode ser categorizado como auto regenerante quando, além de reparar fissuras ele possui a capacidade de retomar suas propriedades mecânicas iniciais (Wang e Yang, 2015).

Os concretos autocicatrizantes também são classificados com base na origem do processo de cicatrização, sendo estes: autógenos ou autônomos. Os autógenos são concretos que utilizam em sua composição apenas materiais convencionais, sem a aplicação específica de qualquer componente cuja finalidade seja exclusivamente relacionada ao processo de auto cicatrização. Os autônomos apresentam a utilização de agregados ou elementos com o objetivo específico de realizar ou potencializar a reabilitação do concreto.

2.1. Autógenos

A auto cicatrização autógena é uma propriedade do concreto convencional, isto porque ela não ocorre através de agregados específicos cujo principal objetivo é a cicatrização. Ela é resultado de reações que são comuns na matriz cimentícia, que podem ser potencializadas com a utilização de agregados convencionais como cinzas volantes, polímeros superabsorventes e fibras. Segundo Tittleboom e Belie (2013), a auto cicatrização do concreto ocorre devido principalmente a dois fatores primários:

- Hidratação das partículas não hidratadas do cimento;
- Dissolução e consequente carbonatação de $Ca(OH)_2$.

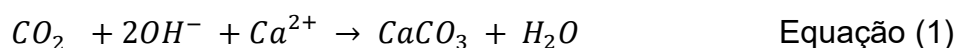
Além desses mecanismos, Hearn (1998), também apresenta outros fatores que podem contribuir para uma auto cicatrização autogênica, como: expansão da matriz cimentícia, bloqueio das fissuras por impurezas presentes na água ou então partículas de concreto solto.

Em concretos com menor idade, há maior quantidade de cimento anidro, isto é, cimento não hidratado. Portanto, a hidratação tem um papel maior na auto cicatrização do concreto. Posteriormente, com os concretos mais velhos e as partículas de cimento hidratadas, a precipitação de carbonato de cálcio se apresenta como o mecanismo principal de auto cicatrização.

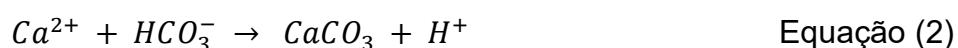
A carbonatação só ocorre em um sistema com a presença de CO_2 . Para a precipitação de $CaCO_3$ (calcita) ser realizada são necessários ciclos molhados-seco de cura, enquanto a hidratação contínua de cimento anidro é um mecanismo primordial em condições submersas (Hearn, 1998).

Hearn (1998) utilizou o termo auto cicatrização apenas para a precipitação de calcita, enquanto para hidratação contínua ou entupimento das fissuras por pequenas partículas físicas, é classificada como “self-sealing” ou SSE, terminologia utilizada por apenas fechar a fissura e reduzir a porosidade do concreto e não restabelecer a resistência inicial do material. Esta categorização foi estabelecida em 1926 (Breugel, 2007).

Conforme a equação 1, para pH alcalinos, superiores a 8, um mol de dióxido de carbono reage com 2 mols de íon hidróxido e um mol de cálcio resultando em 1 mol de água e um mol carbonato de cálcio, mineral insolúvel em água (Edvardsen, 1999; Jooss, 2001):



E para pH entre 7 e 8 a reação ocorre conforme a equação 2, soluções nessa faixa de pH contém baixa concentração de íons de hidrogênio, permitindo a formação de íons de bicarbonato na presença de dióxido de carbono e água. Em contato com íon de cálcio presentes na matriz cimentícia resulta na formação de calcita e íons de hidrogênio (Edvardsen, 1999):



A capacidade máxima de fechar a fissura ainda é discutida, a faixa de valores está entre 5 µm até 300 µm (Tittleboom e Belie, 2013). No estudo de Heide e Schlangen (2007) comparou-se fissuras geradas em diferentes idades do concreto, 20, 24, 48 e 72 horas, observou-se que as produzidas em menores idades proporcionam melhor eficiência do processo de auto cicatrização autógena.

Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011) focam em fissuras produzidas em 3 e 28 dias. Na primeira idade, fissuras de até 5 µm foram fechadas pelo processo autogênico de cicatrização, de carbonatação e hidratação tardia, em 12 dias; as com espessura entre 100 e 200 µm em 29 dias e as compreendidas entre 200 e 300 µm em 44 dias. Nas fissuras realizadas com concreto de 28 dias de idade, fissuras com espessuras menores de 50 µm foram seladas também em 12 dias, no entanto fissuras com aberturas maiores não foram fechadas. Para verificar esses

resultados foi marcado uma linha sobre a fissura, no dia da realização da fissura e após 3, 7, 12, 19, 29 e 44 dias respectivamente foi aferido a abertura da fissura (Figura 1) através de um microscópio digital.

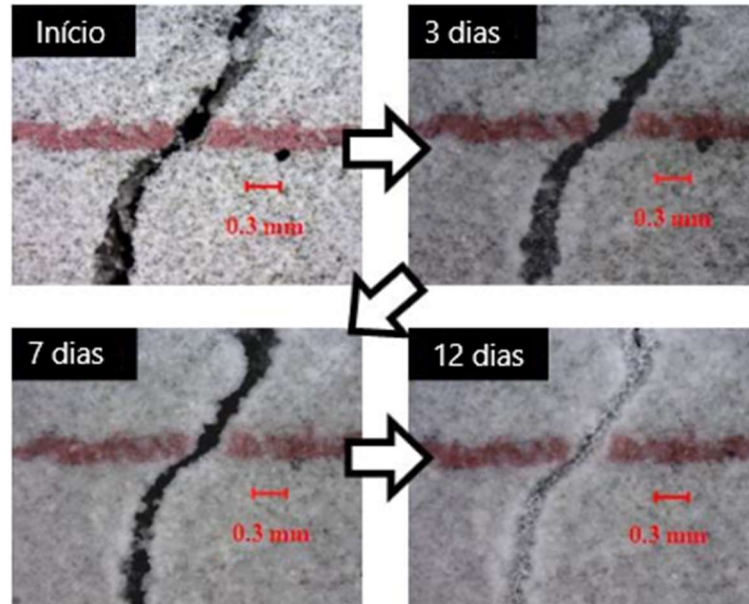


Figura 1 - Processo de selagem, fissura realizada com idade de 3 dias, abertura inicial de 50 μm (Adaptado de Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2011)

Gagné e Argouges (2012) realizaram um estudo com idades ainda mais avançadas de 1 e 6 meses e foram monitoradas via microscópio digital as espessuras das fissuras a cada mês no decorrer de cinco meses após sua abertura. Neste estudo os autores além de trabalharem com a idade que as fissuras foram provocadas (1 e 6 meses após a moldagem), também variaram os tamanhos das fissuras produzidas (finas: entre 41 e 61 μm ; médias: entre 93 e 118 μm ; e grandes: entre 190 e 254 μm) e a relação água/cimento, utilizando três valores para as de 1 mês, 0,60 (Figura 2), 0,45 (Figura 3) e 0,35 (Figura 4), e dois valores para de 6 meses, 0,60 (Figura 5) e 0,35 (Figura 6).

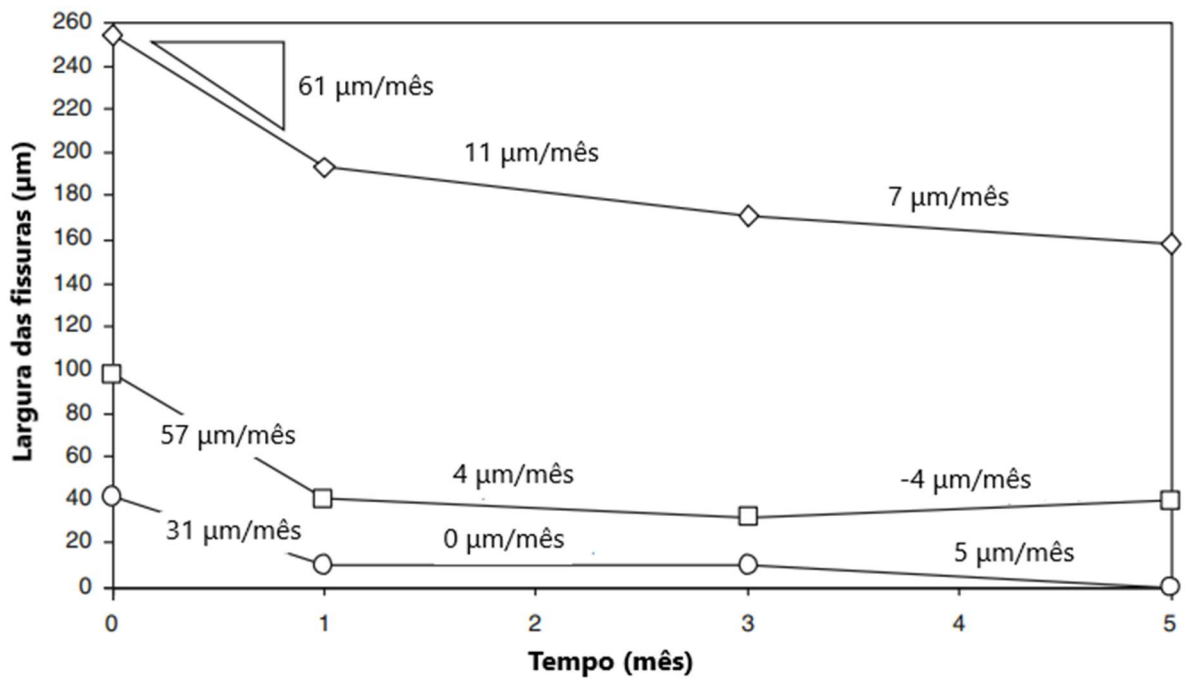


Figura 2 - Evolução das aberturas em concreto com 1 mês e a/c 0,60 (Adaptado de Gagné e Argouges, 2012)

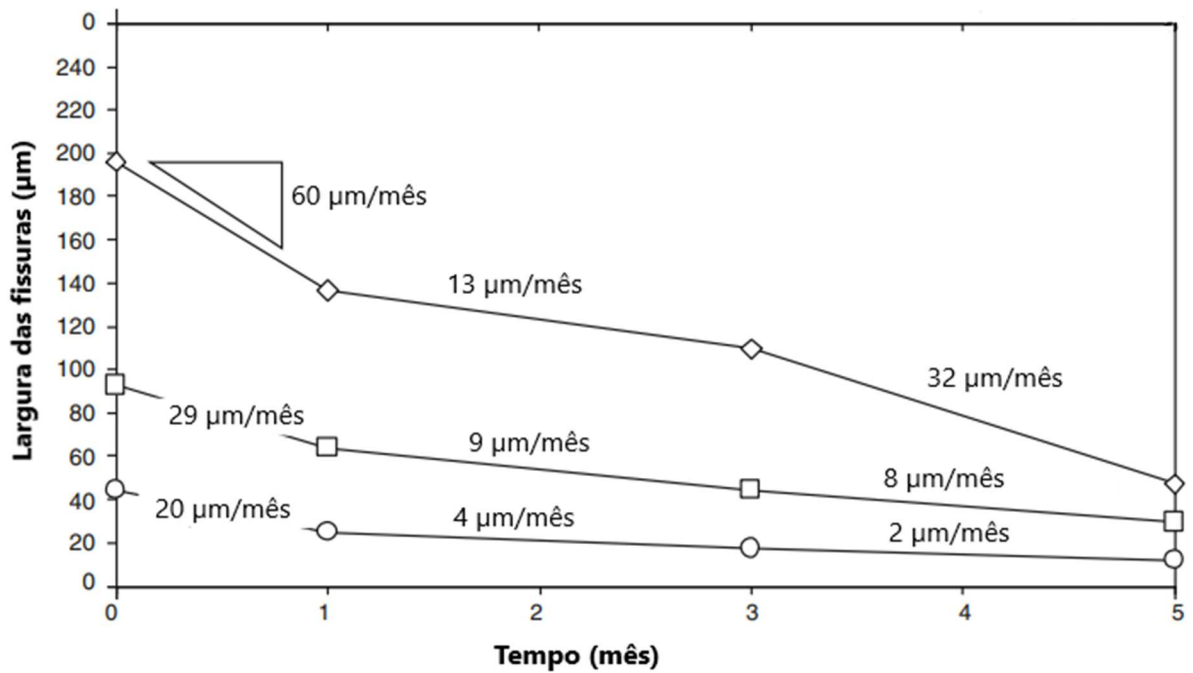


Figura 3 - Evolução das aberturas em concreto com 1 mês e a/c 0,45 (Adaptado de Gagné e Argouges, 2012)

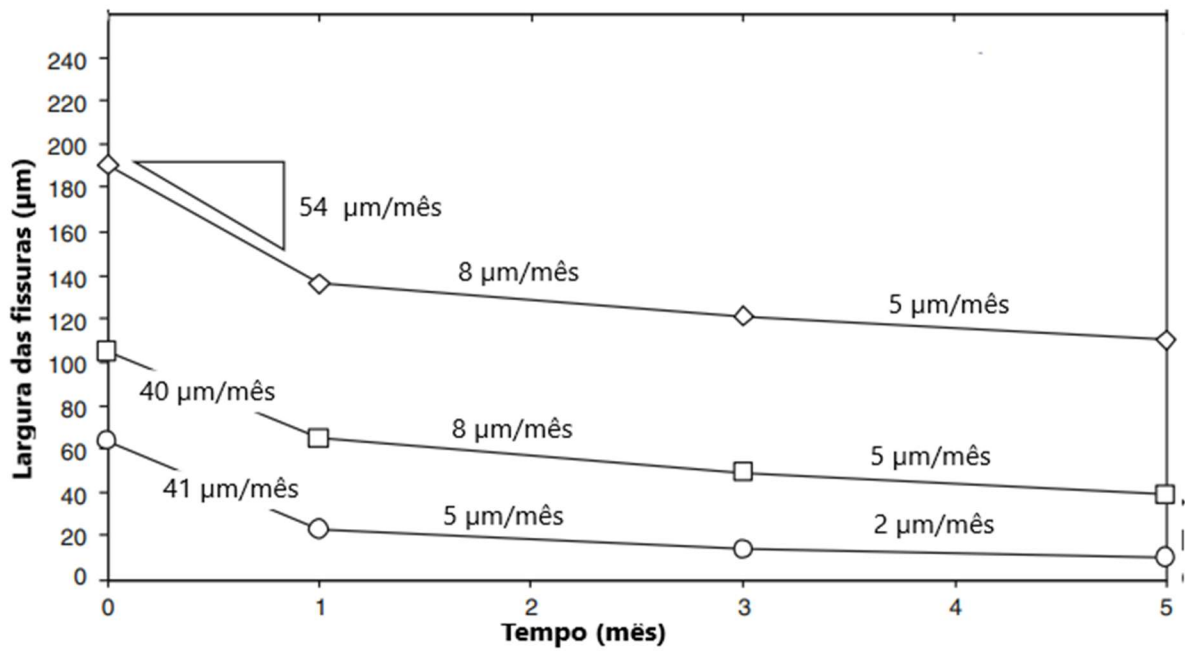


Figura 4 - Evolução das aberturas em concreto com 1 mês e a/c 0,35 (Adaptado de Gagné e Argouges, 2012)

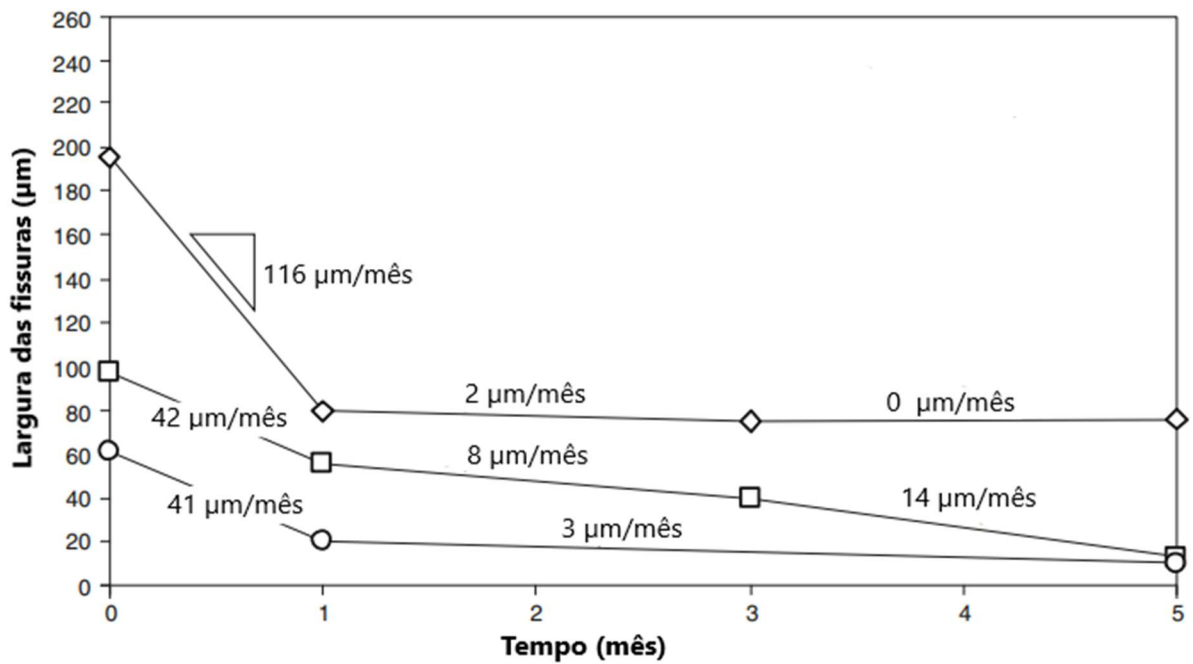


Figura 5 - Evolução das aberturas em concreto com 6 meses e a/c 0,60 (Adaptado de Gagné e Argouges, 2012)

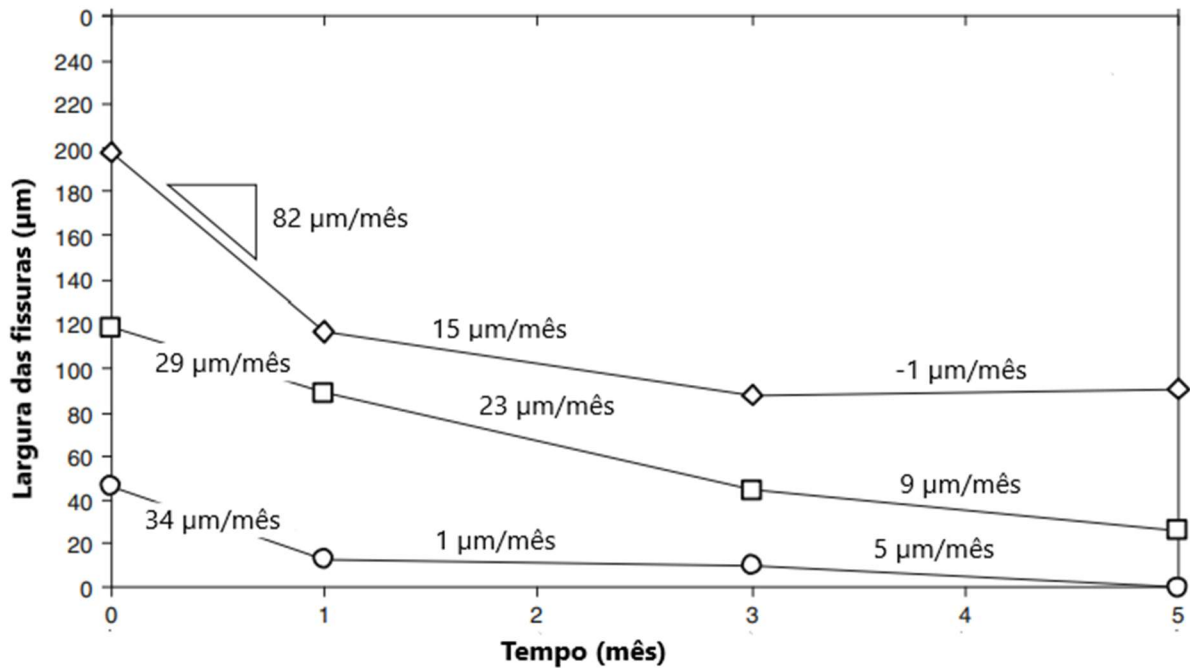


Figura 6 - Evolução das aberturas em concreto com 6 meses e a/c 0,35 (Adaptado de Gagné e Argouges, 2012)

Os resultados mostraram que:

- Em fissuras feitas a partir do terceiro mês, este parâmetro acaba sendo um fator minoritário;
- O primeiro mês mostra maior eficácia no processo de cicatrização, por apresentar maior quantidade de reagente, como cimento anidro, este cimento se transforma em uma densa camada nas paredes da fissura, reduzindo sua porosidade e reduzindo a velocidade de agentes externos (água e CO_2);
- Quanto maior a abertura, maior a relação de selamento $\mu\text{m}/\text{mês}$, devido ao maior espaço e conseqüentemente mais rápida difusão de CO_2 e água.

2.1.1. Cinzas volantes

Cinza volante é um material produzido a partir da combustão de carvão pulverizado, que quando misturado com água e cimento resulta em um material semelhante ao cimento hidratado, porém com estrutura mais densa e menor permeabilidade (Nath *et al.*, 2011). Şahmaran *et al.* (2008) aponta alternativas para

potencializar a capacidade de cicatrização autogênica, uma destas comparou os resultados de um concreto substituindo diferentes quantidades de cimento por cinzas volantes, 0%, 35% e 55%, ambas com relação água/cimento de 0,35. As amostras foram submetidas a força de compressão uniaxial com cargas de 70% e 90% do valor de resistência máxima característica do concreto, a fim de criar fissuras (Figura 7, 8 e 9).

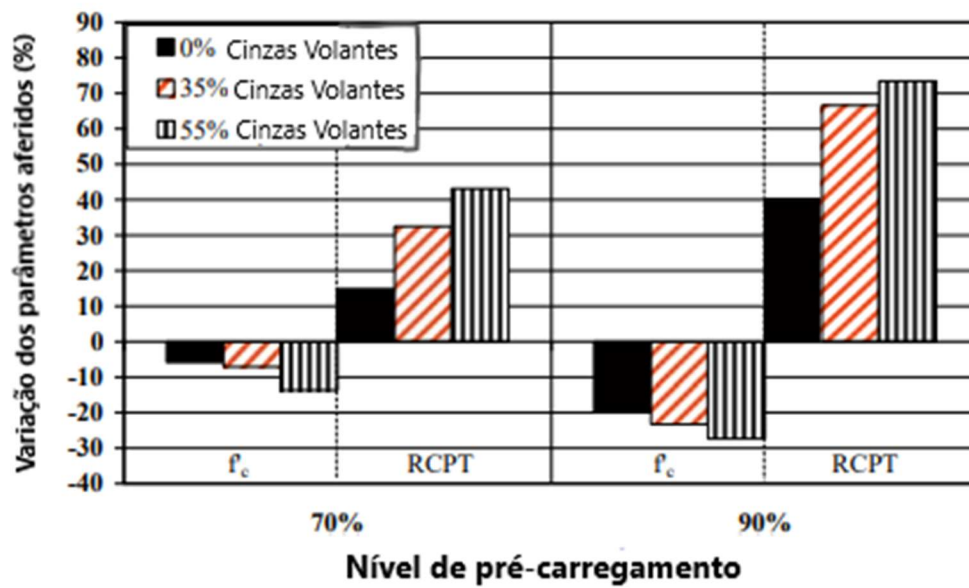


Figura 7 - Variação de resistência (f'_c) e permeabilidade (RCPT) antes do processo de cicatrização (Adaptado de Şahmaran et al., 2008)

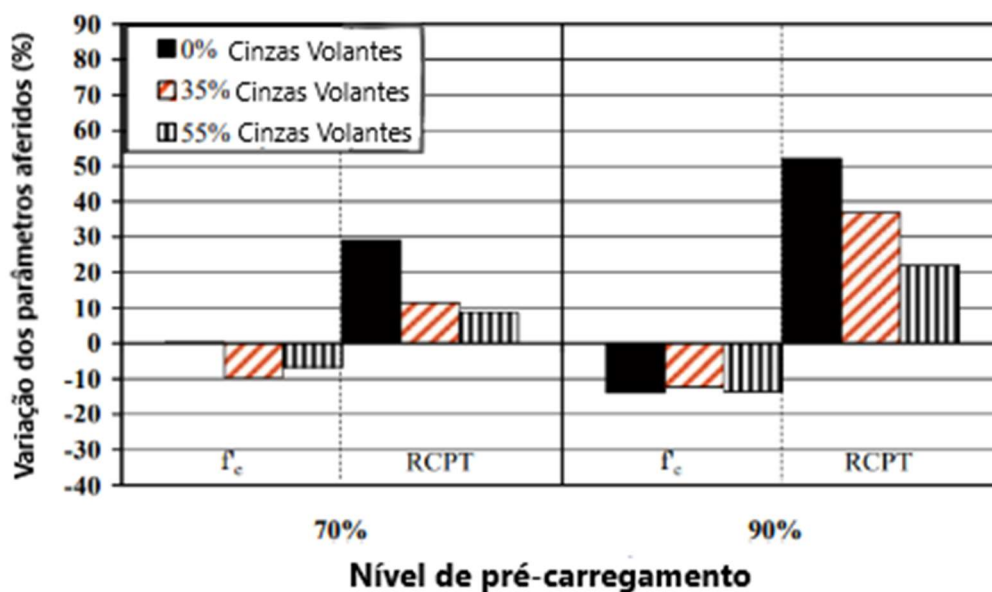


Figura 8 - Variação de resistência (f'_c) e permeabilidade (RCPT) após 15 dias de cicatrização (Adaptado de Şahmaran et al., 2008)

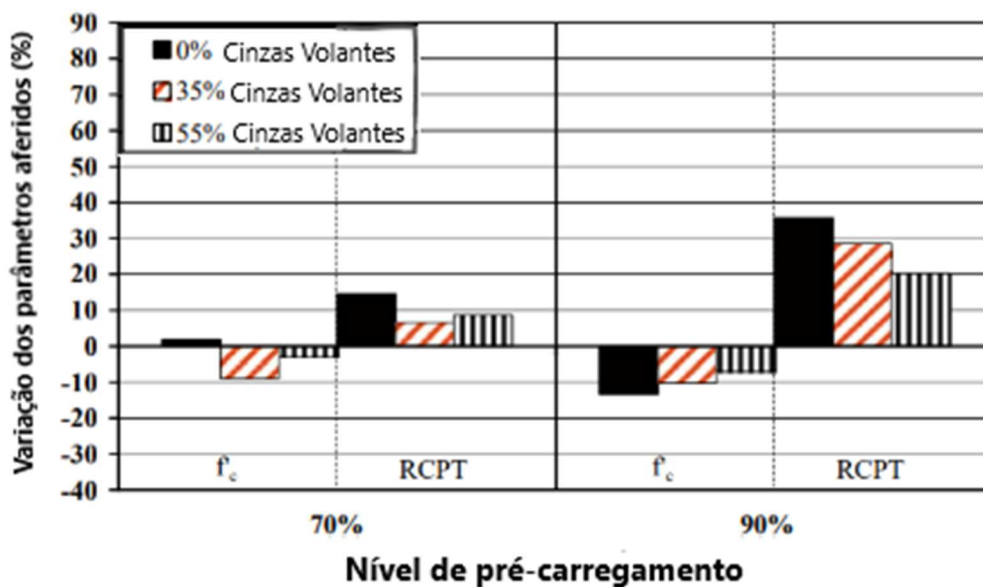


Figura 9 - Variação de resistência (f'_c) e permeabilidade (RCPT) após 30 dias de cicatrização (Adaptado de Şahmaran et al., 2008)

Após este pré-carregamento, foram observados a redução da resistência e aumento da permeabilidade. Em seguida as amostras foram armazenadas durante um mês em condições submersas e após este período foram monitoradas as mudanças de propriedades a cada duas semanas.

Para avaliar a resistência foi realizado teste de compressão e para o obter os valores de permeabilidade foi realizado o teste baseado na norma ASTM C 1585.

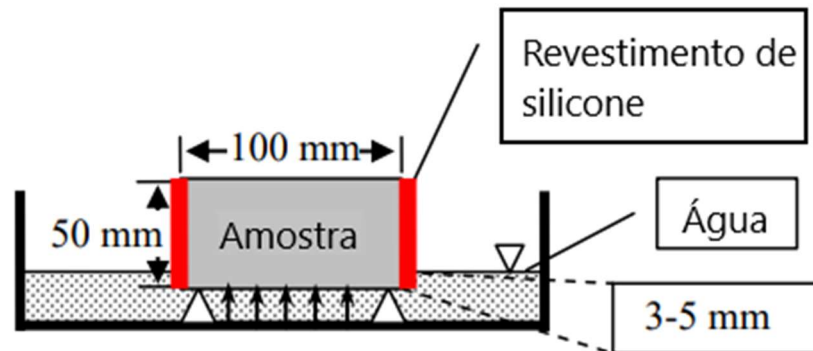


Figura 10 - Esquema representativo do ensaio de absorção capilar (Adaptado de Şahmaran *et al.*, 2008)

Os resultados obtidos apontaram que quanto maior a quantidade de cinzas volantes, maiores foram as reduções de resistência à compressão e aumento da permeabilidade. As amostras sem a utilização de cinzas volantes sofreram menor decréscimo de resistência, porém sua taxa de recuperação foi menor que das amostra com o aditivo.

A mesma conclusão foi obtida por Na *et al.* (2012) que sugere um intervalo ótimo de substituição de cimento por cinzas volantes, esta taxa é chamada de coeficiente de substituição. Para concreto com relação água/cimento de 0,50 a 0,55 aponta-se a taxa entre 10% e 15%, enquanto para relação de 0,55 a 0,60, um valor entre 11% e 20%.

Esse mecanismo se deve ao fato de que o material pozolânico reage com $Ca(OH)_2$ e produz o gel C-S-H, com essa adição a reação é menos dependente de água do que a hidratação apenas pela reação do cimento (Termkhajornkit *et al.*, 2006). Dessa forma quanto maior a quantidade de cinzas volantes, maior a produção de gel de C-S-H (Figura 11).

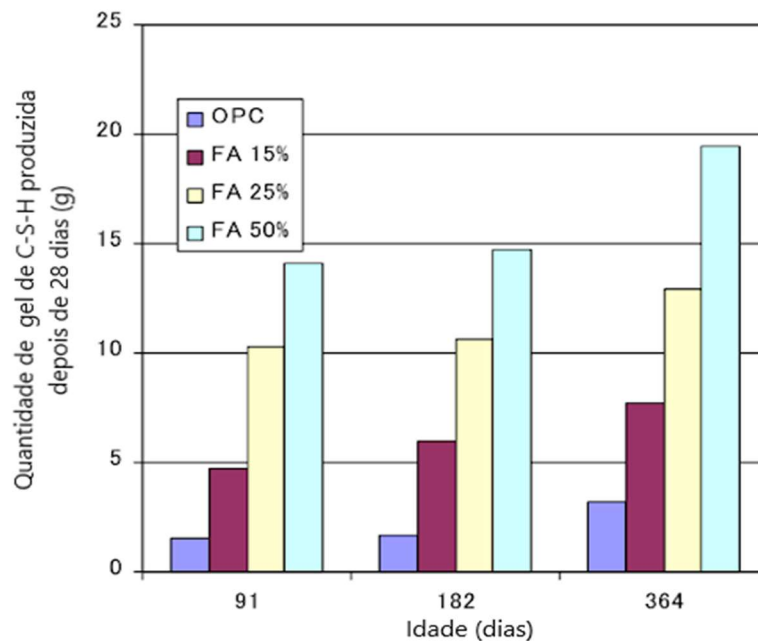


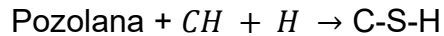
Figura 11 - Quantidade de C-S-H produzido com diferentes taxas de cinzas volantes (adaptado de Termkhajornkit et al., 2006)

O estudo de Gupta *et al.* (2017) evidencia o processo de hidratação da pozolana como mais lenta ao comparar com cimento e assim como este também tem a capacidade de auto cicatrização. Explicada também por Mehta e Monteiro (2008), que descreve ambas as reações para a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), com esta análise é possível observar as diferenças entre o cimento Portland e o cimento Portland com adição de pozolana.

A reação de hidratação do trissilicato de cálcio para formação de C-S-H é descrita na equação 3. Esta reação é considerada rápida e é responsável pelo incremento inicial da resistência à compressão do concreto. (Cimento Portland, rápida):



A formação de C-S-H a partir da reação entre pozolana e hidróxido de cálcio (CH) é apresentada na equação 4. A formação de C-S-H é mais lenta, devido o material pozolânico ser menos reativo comparado a trissilicato de cálcio, sendo responsável pelo ganho de resistência em idades mais avançadas do concreto e diminuição dos poros do concreto.



Equação (4)

2.1.2. Utilização de polímeros superabsorventes (SAP)

Os polímeros superabsorventes (SAP) são aditivos com capacidade de absorver grandes quantidades de líquido e transformar-se em um gel insolúvel. Lee *et al.* (2015) também apresenta as propriedades do SAPs de expandir.

Desta forma a taxa de água necessária é reduzida, diminuindo a ocorrência de fissuras em decorrência da retração a partir da evaporação de água. Estes aditivos são utilizados para a elaboração de traços que visam a alta resistência do concreto, principalmente em concreto auto adensável. O qual se beneficia da melhor trabalhabilidade que os superabsorventes proporcionam.

Na preparação do concreto, são inseridos dentro de microcápsulas durante sua dosagem, estas permitem que eles se mantenham inertes e protegidos da matriz cimentícia. Quando o concreto é fissurado as microcápsulas são rompidas, com a infiltração de água pela abertura o SAP reage com o líquido, resultando em sua expansão e evitando maior penetração de água (Figura 12).

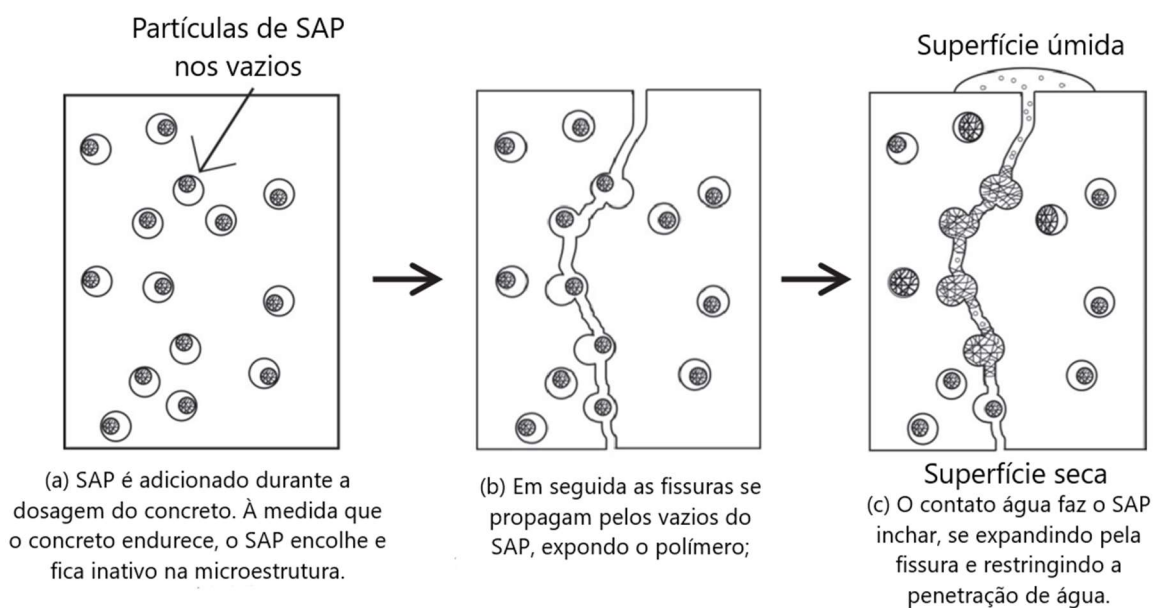


Figura 12 - Sistema de auto selagem utilizando SAP (adaptado de Lee *et al.*, 2015)

Com grandes quantidades de armazenamento de água dentro do concreto, o período de carbonatação é prolongado, pois o SAP serve como fornecedor de água para os materiais não hidratados. Observa-se que amostras com SAP apresentaram maior taxa de depósito de carbonato de cálcio do que amostras sem o aditivo. Devido à maior retenção de água no concreto, quanto maior a quantidade de SAP para absorver a água, melhor o desempenho na questão do auto cicatrização (Chindasiriphan *et al*, 2020).

2.1.3. Utilização de fibras

Visto que a auto cicatrização autogênica apresenta a abertura da fissura como um dos fatores limitantes algumas soluções foram propostas e estudadas, a fim de elevar a eficiência do mecanismo autogênico diminuindo o tamanho de suas aberturas. Visto que o processo de cicatrização autógena apresenta o tamanho das fissuras como fator limitante, as fibras podem potencializar a ação cicatrizante devido sua capacidade de controlar a propagação de fissuras através de conexões de fibras. Li *et al.* (1998) apresentou a aplicação de fibras de polietileno e comprovou que o controle das dimensões das fissuras auxilia no auto cicatrização autogênica.

Homma *et al.* (2009) nomeiam este concreto como FRCC, uma abreviação para composto cimentício reforçado por fibras (“fibre reinforced cementitious composites”). Foram comparadas amostras reforçadas com polietileno, cordões de aço e com a aplicação dos dois simultaneamente. Assim como no estudo de Li *et al.* (1998), os FRCC’s apresentaram facilidade em promover a auto cicatrização, devido, como cita o autor, ao pequeno espaço entre as fibras. As amostras que continham fibras de aço, exclusivamente, ou mista com polietileno, apresentaram recuperação da resistência à tração, porém menor capacidade de fechar as fissuras, devida a corrosão do aço dentro da mesma.

Nishiwaki *et al.* (2012) comparou outros tipos de FRCC utilizando fibras sintéticas. Neste estudo foi analisada a aplicação de fibras de álcool polivinílico, este sendo dividido em dois grupos conforme o diâmetro das fibras utilizada (PVA-I com 14µm e PVA-II com 37µm), álcool etileno vinílico (EVOH), poliacetal (POM) e polipropileno também separada em dois grupos devido o diâmetro de suas fibras (PP para 11µm e C-PP para µm). Foram realizados dois ensaios, um observando a

precipitação de cristais ao redor das fibras, este primeiro teste depende da polarização das fibras e consiste em três etapas (Figura 13):

- Ruptura da viga de concreto em duas partes, pelo teste de dobra por 3 pontos (“Three-point bending test”);
- Cura imersa em água das metades da peça por 7 dias;
- Aferição dos diâmetros das fibras com precipitação de carbonato de cálcio.

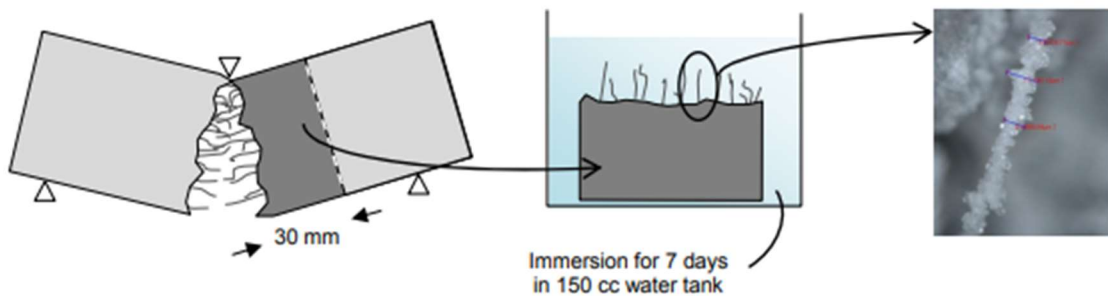


Figura 13 - Procedimento do teste de observação da precipitação de cristais ao redor da fibra. a) Divisão da viga em duas metades. b) Imersão das metades em água. c) Observação e mensuração das fibras. (Adaptado de Nishiwaki et al., 2012)

Este teste está vinculado com a sua propensão de atrair elétrons (eletronegatividade). O oxigênio (O) é um dos elementos mais eletronegativos, visto isso, fibras com este elemento na composição apresentaram maior propensão de atrair íons de Ca^{2+} e conseqüentemente o depósito de carbonato de cálcio (Figura 14).

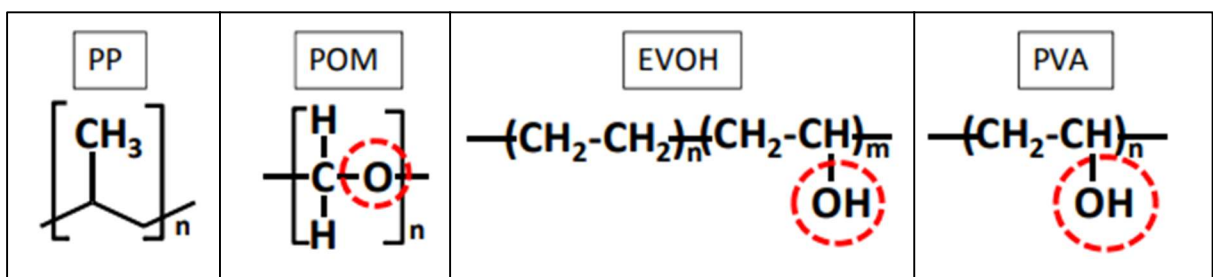


Figura 14 - Identificação das partes eletronegativas dentro das composições químicas das fibras estudadas (Adaptado de Nishiwaki et al., 2012)

Nas fórmulas químicas evidencia que o PVA e EVOH apresentam o radical livre OH em sua extremidade, possibilitando a doação de um elétron e caracterizando como um composto altamente reativo. O fato de o PVA apresentar proporcionalmente mais o grupo hidroxila (OH) que o EVOH, o torna mais eletronegativo. Na figura 15, também se observa o radical O na cadeia do poliacetal.

Por não estar na extremidade da molécula o POM tem menor eletronegatividade que o PVA e EVOH. O polipropileno apresenta apenas dois elementos distintos (Carbono e Hidrogênio), a união destes elementos é devido a ligações covalentes apolar, pois ambos possuem diferença de eletronegatividade baixa.

Ao classificar os FRCC's por forças de polaridade vemos:

1. PVA-I e PVA-II, maior polaridade devido ao radical OH;
2. Seguido pelo EVOH (mistura de PVA e PP);
3. POM, devido ao radical O;
4. Por fim, PP por não apresentar força de polaridade.

Os resultados da figura 15 corresponderam com o grau de polarização descrito anteriormente, quanto maior a eletronegatividade, maior a espessura média precipitada ao longo das fibras.

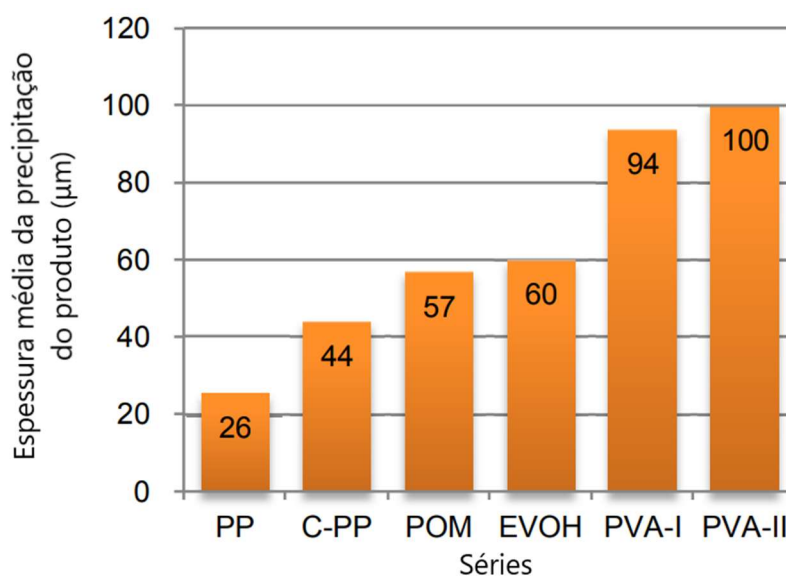


Figura 15 - Índice de precipitação em cada um dos grupos de fibras estudados (Adaptado de Nishiwaki et al., 2012)

O segundo ensaio avaliou a permeabilidade das amostras a partir de um ensaio de tração. Além disso é possível observar a confirmação da auto cicatrização autogênica a partir de verificações visuais com o uso de microscópio. Após seu desmolde, as amostras foram mantidas por 6 dias em condições submersas, em seguida foram submetidas a um ensaio de tração com o intuito de gerar fissuras de 300 µm.

Logo em seguida realizou-se o teste de permeabilidade, cujo objetivo é obter o coeficiente de permeabilidade de água (k) ao atravessar o corpo de prova. Este ensaio se repetiu após 3, 14 e 28 dias.

O resultado (Figuras 16, 17 e 18) do ensaio de tração classificou as amostras à base de PP e PVA como dúcteis e as de POM e EVOH como frágeis. Quanto ao ensaio de permeabilidade, este apresentou redução significativa da velocidade de escoamento das amostras à base de PVA, quase se equiparando a velocidade antes do teste de tração. O corpo de prova com base de fibras PP e com fibras de $18\mu\text{m}$ de diâmetro (C-PP) também apresentou bons resultados, porém abaixo dos enaltecidos anteriormente.

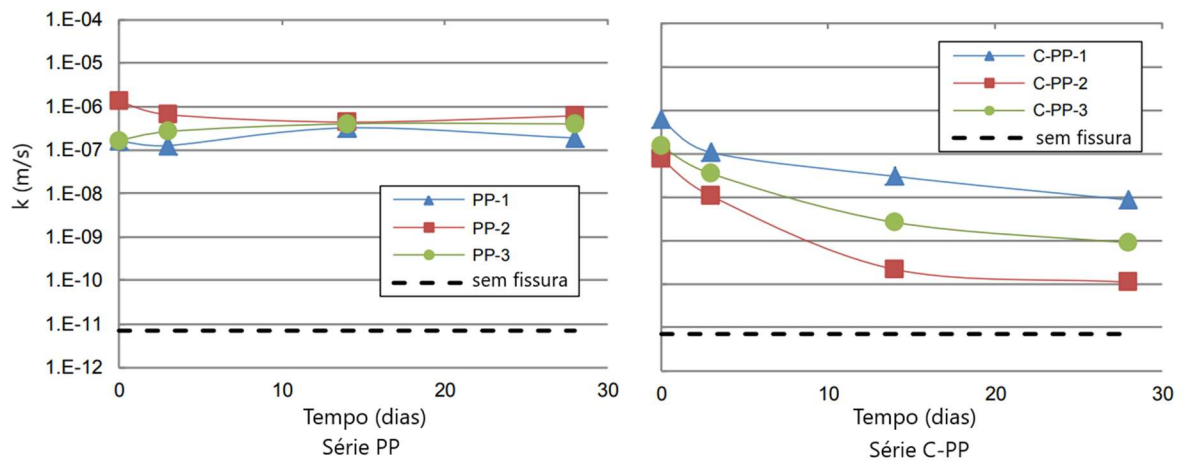


Figura 16 - Relação de tempo e coeficiente de permeabilidade de água para as séries PP e C-PP (Adaptado de Nishiwaki et al., 2012)

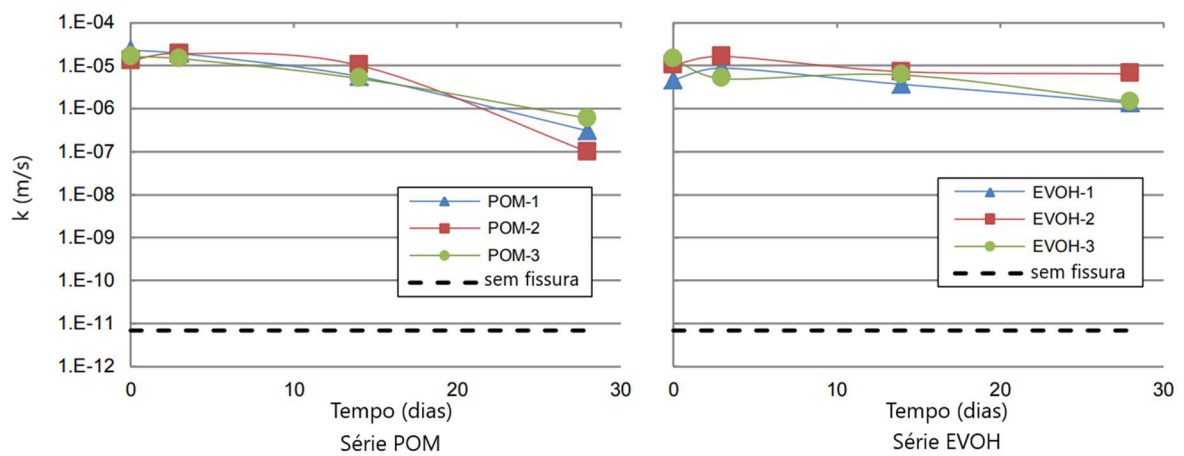


Figura 17 - Relação de tempo e coeficiente de permeabilidade de água para as séries POM e EVOH (Adaptado de Nishiwaki et al., 2012)

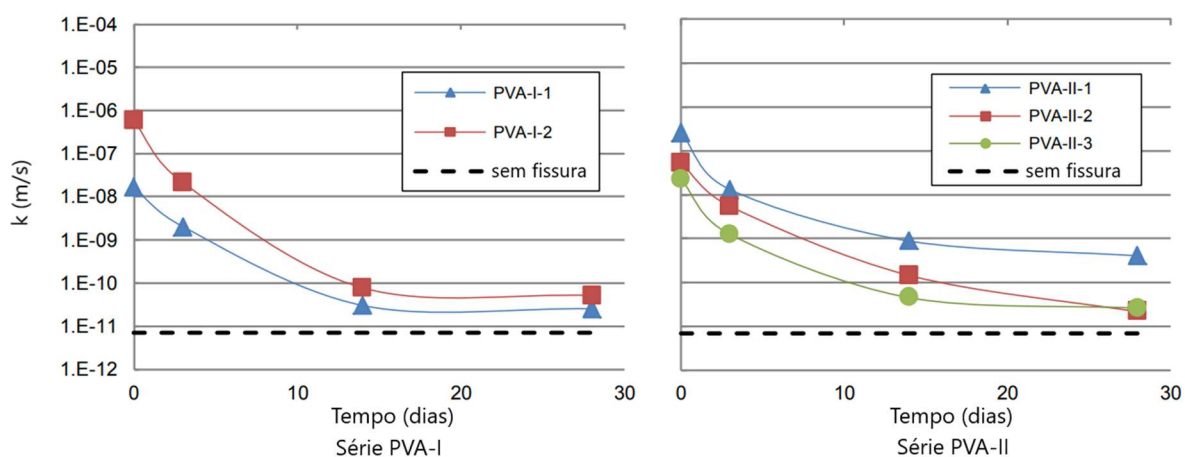


Figura 18 - Relação de tempo e coeficiente de permeabilidade de água para as séries PVA-I e PVA-II (Adaptado de Nishiwaki et al., 2012)

As observações (Figura 19) realizadas com o microscópio confirmaram os demais resultados, em 3 dias as amostras a base de PVA já apresentavam alto grau de auto cicatrização, enquanto nas demais constata-se diferentes níveis de precipitação decorrentes da ação da carbonatação.

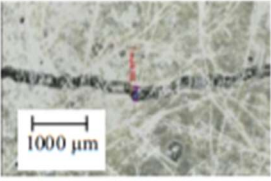

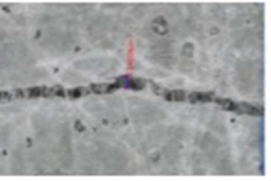
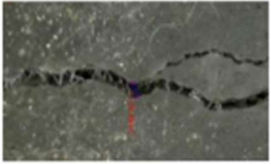

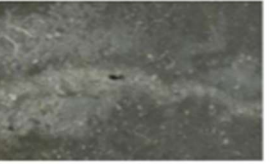
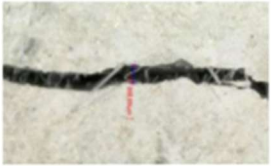


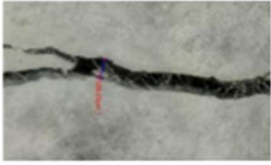



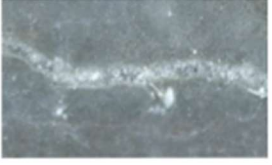

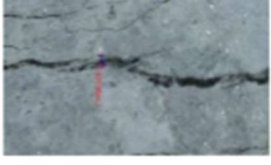


		Dias da segunda etapa de cura		
		0	3	14
Maior abertura da fissura original por série	PP-3 (250 μm)			
	C-PP-1 (301 μm)			
	POM-2 (361 μm)			
	EVOH-2 (399 μm)			
	PVA-I-2 (327 μm)			
	PVA-II-1 (225 μm)			

Figura 19 - Observação via microscópio de precipitação ao redor das fissuras (Adaptado de Nishiwaki *et al.*, 2012)

Observando a maior capacidade de auto cicatrização de FRCC quando comparados com o concreto convencional Mihashi *et al.* (2012) apresentou a possibilidade de preencher essas fibras com agentes cicatrizantes. Com esta adição os autores tinham o objetivo de criar um concreto inteligente. A ideia de um material inteligente foi descrita como compostos capazes de autonomamente reagir a ações e mudanças do meio externo (Shahinpoor *et al.*, 1997).

2.2. Autônomos

Os métodos autônomos de auto cicatrização apresentam maior variedade, pois estes não são vinculados com agregados convencionalmente usados na construção civil. Desta forma diversas tecnologias foram desenvolvidas com conceitos totalmente diferentes umas das outras.

2.2.1. Shape Memory Alloy (Ligas com Memória de Forma)

Shape Memory Alloy (SMA), ou ligas com memória de forma, é um tipo de liga metálica cuja principal característica é a superelasticidade. Esta liga é capaz de recuperar a sua forma original após deformações ou variações de temperatura (Hornbogen, 1991 e Yuji S. *et al.*, 2003).

Essa propriedade é explorada na construção civil em estruturas com a possibilidade de sofrer ações e forças de origens tectônicas, os principais materiais utilizados são ligas de Titânio-Níquel (Nitinol) e Cobre-Alumínio-Níquel. Kuang e Ou (2008) testaram a aplicação dessa tecnologia. Em seu ensaio o SMA foi utilizado em conjunto com adesivos enclausurados dentro de fibras ocas. Essas fibras são conectadas a um tanque externo que armazena o agente cicatrizante (Figura 20), desta forma possibilita-se o reabastecimento do agente.

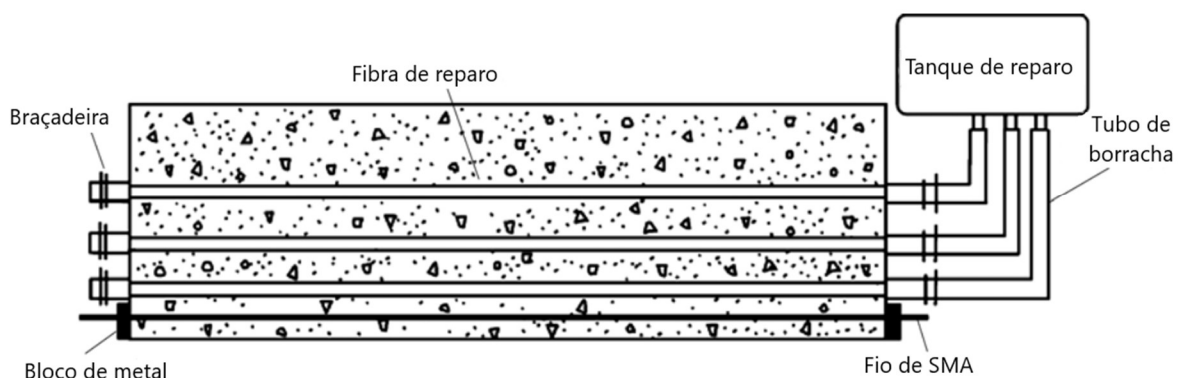


Figura 20 - Sistema de auto cicatrização utilizando fios de SMA (Adaptado de Kuang e Ou, 2008)

O SMA utilizado no experimento foi de Níquel e as fibras preenchidas por agente cicatrizante foram de vidro (Kuang e Ou, 2008). Cinco vigas com diferentes quantidades de SMA e fibras foram submetidas a um teste de flexão de

carregamento cíclico com concreto de 28 dias de idade e foram observadas as fissuras criadas no ponto sob a ação da carga. O conjunto das duas ferramentas apresentou que devido a atuação do SMA as fissuras eram seladas após o descarregamento da carga (Figura 21).



Figura 21 – a) Deflexão máxima. b) Após descarregamento a fissura diminui, aproximando do aspecto antes do carregamento (Adaptado de Kuang e Ou, 2008)

A partir do rompimento das fibras de vidro e a liberação dos adesivos, responsáveis por realizar a auto cicatrização, as fissuras não retornavam a se abrir, contudo novas fissuras eram formadas (Figura 22).

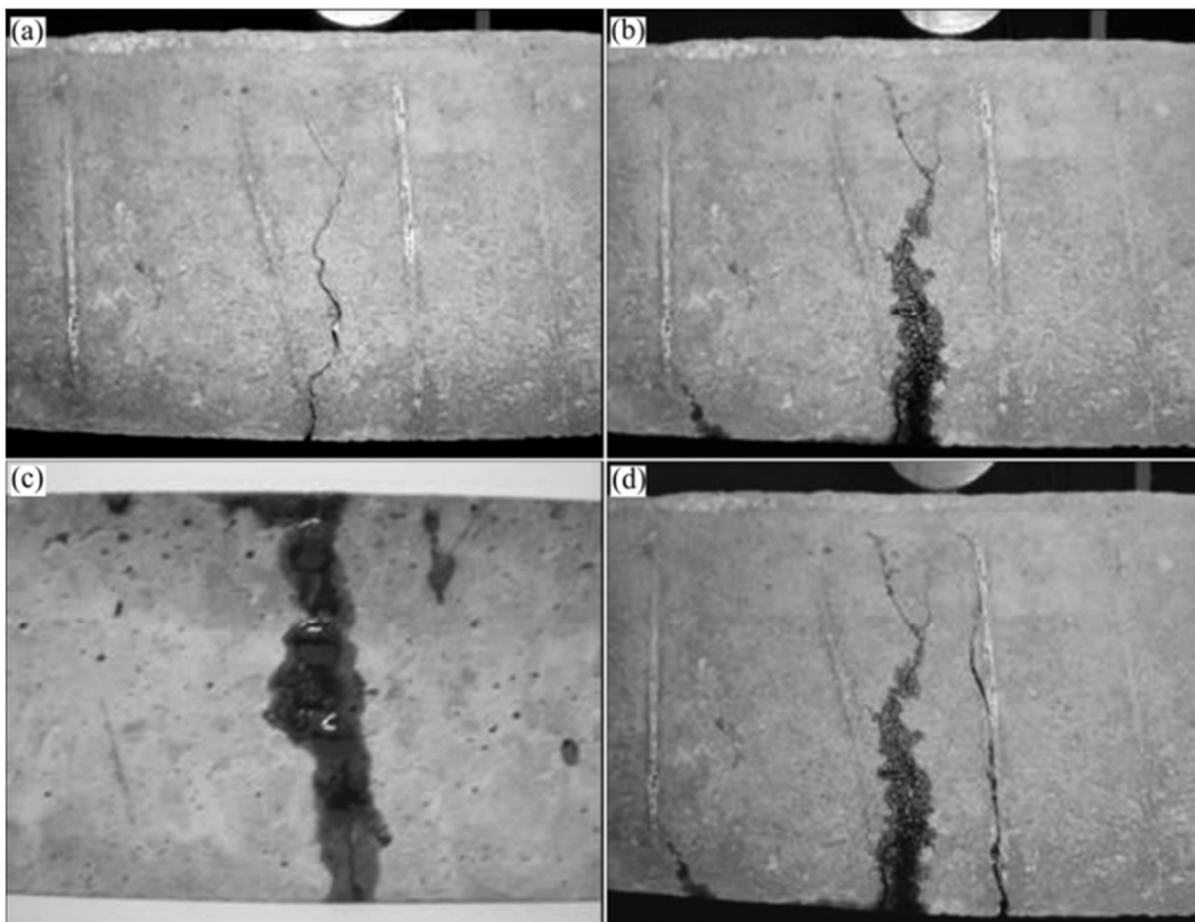


Figura 22 – a) fissura aparece próxima ao centro da viga. b) Agente cicatrizante flui até o exterior e preenche a fissura. c) Fissura reparada. d) A fissura não se abre, porém, outra fissura se forma nas proximidades (Adaptado de Kuang e Ou, 2008).

2.2.2. Cápsulas

O método de encapsulamento apresenta a possibilidade de auto cicatrização autônoma quando utilizadas em conjunto com agentes químicos ou biológicos (Hilloulin *et al.*, 2015). Esta técnica consiste em preencher cápsulas, ou conchas, com agente cicatrizante, responsável pela selagem da fissura. Desta forma o agente fica protegido mecânica e quimicamente devido se manter isolado da matriz cimentícia.

O mecanismo é ativado quando as cápsulas se rompem e o agente cicatrizante é liberado (Souradeep e Kua, 2016). A quebra ou dissolução das conchas pode ocorrer devido a fissuras do concreto, umidade, mudança de temperatura, presença de ar e variação do pH da matriz cimentícia.

Cailleux e Pollet (2009) realizaram encapsulamentos em conchas gelatinosas, com diferentes agentes cicatrizantes: bisfenol-F epoxy, óleo de tungue e hidróxido de cálcio. Para a cicatrização, o óleo de tungue precisa reagir com o ar, e o $Ca(OH)_2$ com dióxido de carbono, ou seja, ambos precisam da presença de ar para ativar o mecanismo.

A partir de observações de um microscópio óptico notou-se que as cápsulas que incorporaram $Ca(OH)_2$ se mantiveram em bom estado, porém algumas contendo óleo de tungue foram rompidas durante o processo de mistura do concreto.

Dry (2000) utilizou-se do calor como método de gatilho da liberação do agente cicatrizante, com cápsulas cilíndricas de polipropileno poroso, revestidas de cera e preenchidas com metilmetacrilato.

Seu modelo consistiu em duas etapas como mostra a Figura 23, a amostra inicialmente era submetida a uma temperatura baixa, porém suficiente para derreter a cera. Desta forma o agente cicatrizante era liberado pelos poros do tubo. Com o aumento do calor esta substância química em contacto com os poros do cimento polimeriza e sela as fissuras.

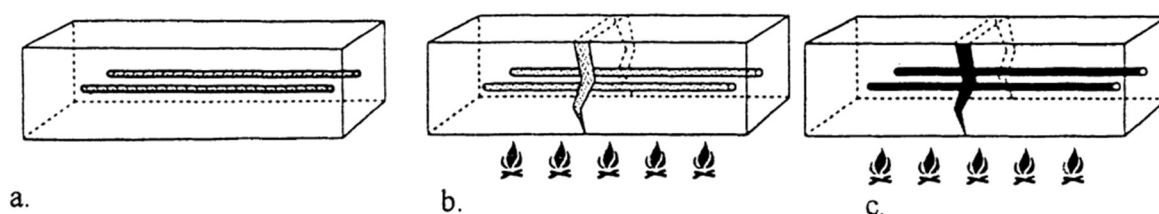


Figura 23 - a) Fibras revestidas com cera e preenchidas com metilmetacrilato. b) A cera derrete devido ao calor, metilmetacrilato é liberado das fibras para as fissuras. c) Metilmetacrilato polimeriza e fecha as fissuras (Adaptado de Dry, 2000)

Os resultados mostraram a redução da permeabilidade (Figura 24) em comparação com a amostra de controle (sem cápsulas) e a resistência à compressão (Figura 25) foi maior do que quando comparada com amostras as quais o agente cicatrizante foi aplicado de forma externa sobre a superfície.

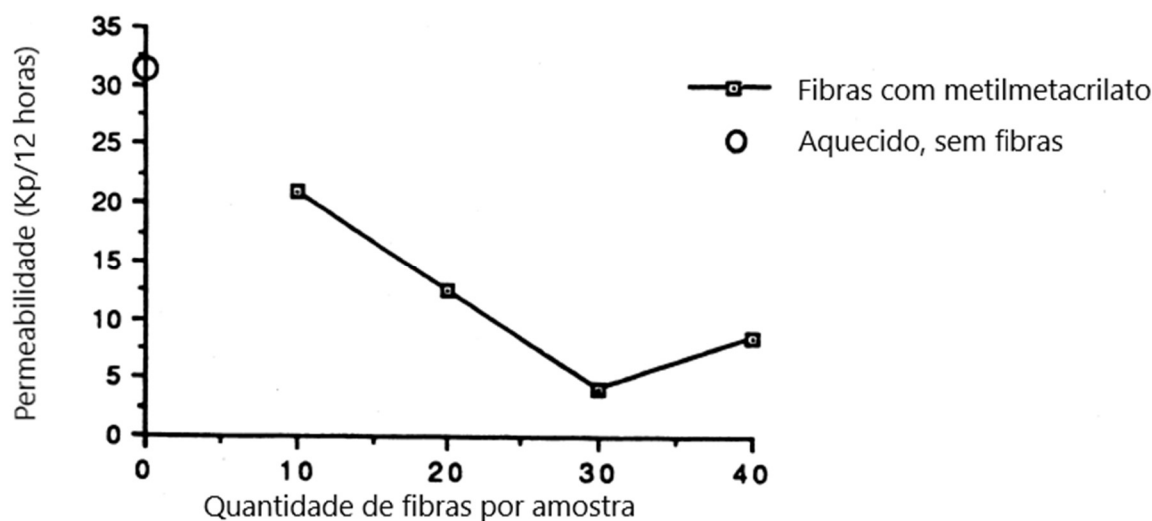


Figura 24 - Permeabilidade por número de fibras, amostras curadas por 7 dias, aquecidas a 100°C por 30 minutos (Adaptado de Dry, 2000)

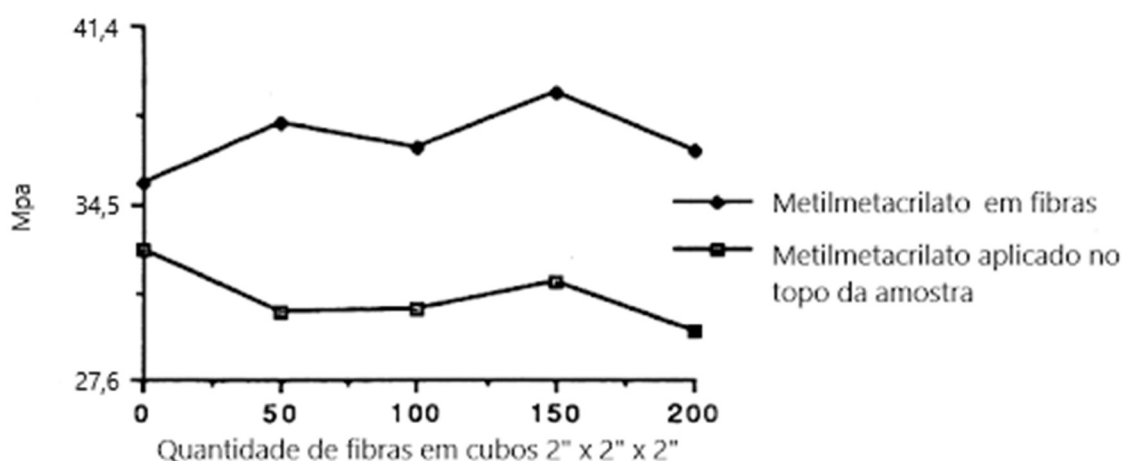


Figura 25 - Resistência à compressão em amostras com diferentes números de fibras. Metilmetacrilato aplicado em fibras e no topo da amostra (Adaptado de Dry, 2000)

Sun *et al.* (2011) avaliaram a capacidade de auto cicatrização autônoma do composto cianoacrilato de etila, as cápsulas utilizadas foram as de fibra de vidro. Foi testada a capacidade de suportar uma carga vertical do centro da viga de concreto e sua resistência à compressão. A carga atingia 75% até 80% da carga limite de ruptura estimada e depois de 5 dias o ensaio era refeito até a ruptura das amostras.

A resistência à flexão foi recuperada em até 63,5% enquanto a resistência à compressão superou o valor inicial em 20%. Joseph *et al.* (2010) também estudaram o composto, porém não teve resultados tão positivos, isto porque observou-se que a rigidez da cúpula cilíndrica formava uma região de pressão negativa em suas extremidades quando quebrada (Figura 26). Sendo assim, a força atrativa de

capilaridade resultante da fissura e o peso do agente não foi suficiente para compensar a pressão negativa e a força de resistência do próprio agente.

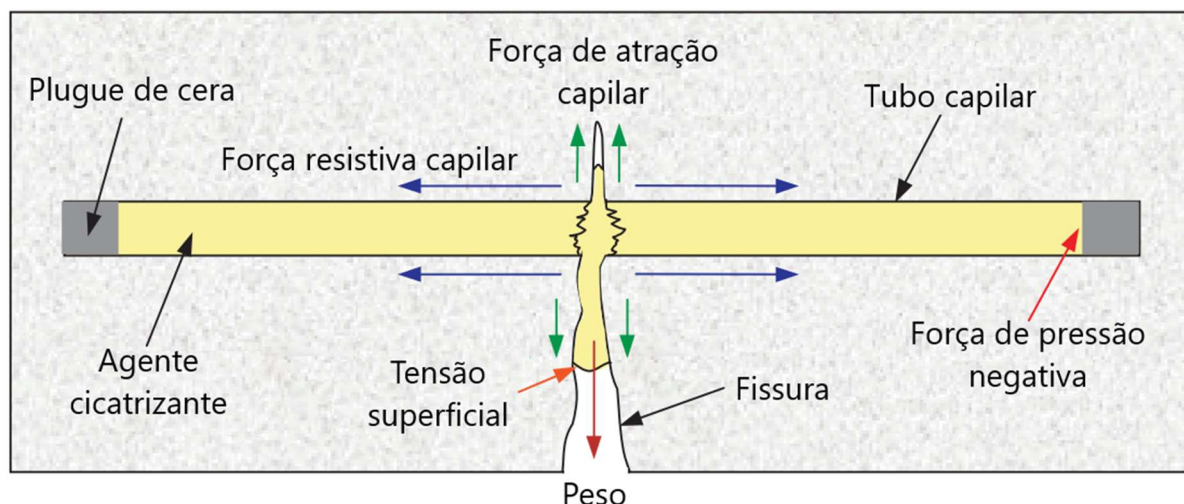


Figura 26 - Principais forças atuantes no sistema com agente cicatrizante encapsulado (Adaptado de Joseph et al., 2010)

Este fenômeno já havia sido levado em consideração por Li *et al.* (1998). Este trabalho contorna este problema utilizando fibras de polietileno, a fim de reduzir a espessuras das fissuras e conseqüentemente aumentar a força de capilaridade das fissuras. Contudo, neste estudo foi observado que em algumas amostras o agente endureceu dentro da cápsula, antes mesmo de sua ruptura.

O composto epóxi POR-15 assim como o cianoacrilato de etila também reage com o ar para realizar a auto cicatrização, sua baixa viscosidade e reatividade menor que o cianoacrilato de etila, garantem que não há enrijecimento do composto dentro das cápsulas. E seus resultados apontaram que a resistência à compressão superou o valor inicial em 30%.

Uma outra alternativa utilizada para tentar contornar o problema envolvendo a pressão negativa formada nas extremidades das conchas foi a utilização de fibras de madeira. No momento em que o concreto sofrer fissuras, a casca do agente cicatrizante será rompida, e então os feixes de madeira de toda a cápsula serão lascados. Desta forma se observa a necessidade de ponderar a resistência das cápsulas, as quais devem ser fortes o suficiente para suportar o processo de mistura na produção de concreto e ao mesmo tempo apresentar rigidez adequada para que haja sua ruptura devido às fissuras.

2.2.2.1. Encapsulamento de bactérias

Um dos materiais utilizados dentro das cápsulas, como agentes cicatrizantes biológicos, são as bactérias (Jonkers *et al.*, 2010). A escolha da bactéria, leva em consideração as condições ambientais em que o concreto será exposto. Algumas das bactérias utilizadas para a auto cicatrização são: *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus pseudo firmus*, *Bacillus sphaericus*, *Pseudomonas aeruginosa* (Jonkers e Schlangen, 2013; Wang *et al.*, 2016; De Muynck *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2018).

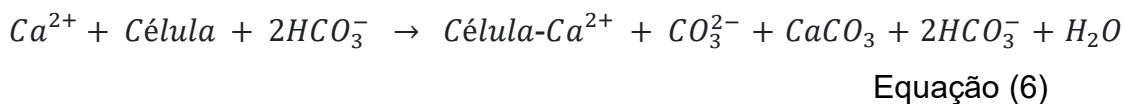
As bactérias mais utilizadas para o processo de auto cicatrização são do gênero bacillus, pois estas são capazes de produzir esporos, isto é, estruturas resistentes capazes de sobreviver em condições adversas por longos períodos de tempo. A bactéria *Bacillus pasteurii*, também conhecida como *Sporosarcina pasteurii*, é uma das mais utilizadas para o processo de auto cicatrização.

Jonkers *et al* (2010) explicou o processo que a bactéria *Bacillus pasteurii* realiza na decomposição de ureia $(NH_2)_2CO$. Neste processo a bactéria possui a enzima urease que catalisa a ureia em carbonato CO_3^{2-} e amônia NH_3 . A formação de carbonato de cálcio resulta após a hidrolização desses componentes em amônio NH_4^+ e ácido carbônico H_2CO_3 .

Esse processo é descrito anteriormente por Tittleboom e Belie (2013). Na equação 5 descreve que, a ureia é transformada em amônia e dióxido de carbono, então, devido a presença de água resulta em íons bicarbonato de amônio.



A *Bacillus pasteurii* alimenta-se de íons de bicarbonato, produzindo íons de carbonato. Assim como citado anteriormente a eletronegatividade corrobora para a precipitação de carbonato de cálcio. A parede da bactéria é carregada por elétrons negativos os quais atraem cátions Ca^{2+} que reagem com os íons de carbonatos e precipitam calcita e soltam gás carbônico (equação 6).



Utilizando este mecanismo de cura autônoma via a bactéria *Bacillus alkalinitrilicus* Wiktor e Jonkers, (2011) apresentaram um sistema envolvendo dois componentes bioquímicos, os esporos da bactéria e lactato de cálcio (equação 7). A adição deste último componente é convertida em carbonato de cálcio devido a atuação do metabolismo bacteriano.



Observa-se que um dos produtos desse processo metabólico é o dióxido de carbono. Dessa forma, além da produção direta de calcita pela equação anterior, também há a produção indireta devido à reação entre dióxido de carbono com hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, presente na matriz cimentícia, que também promove a precipitação de carbonato de cálcio.

Wiktor e Jonkers (2011) inseriu a mistura desses dois componentes dentro de argila expandida, isto deve-se pelo fato da tentativa de ingressar os agentes cicatrizantes dentro de uma cápsula que tenha utilidade como agregado, além de apenas como reservatório e proteção dos agentes da matriz cimentícia. Os resultados apresentaram a capacidade de selar fissuras maiores em relação a amostra de controle. Obtendo o selamento total da fissura de até 0,46mm (Figura 27). Em contrapartida, novamente Jonkers (2013) apresenta que a substituição de agregado leve por argila expansiva reduz a capacidade de resistência à compressão. No estudo em questão 50% de areia e cascalho foi substituído, o que resultou na diminuição de também 50% da sua resistência à compressão após 28 dias de cura do concreto.



Figura 27 - Imagem microscópica da amostra de controle (A) e da amostra com agentes bacterianos (B). Na direita antes do processo de auto cicatrização e na esquerda após duas semanas submersa em água, com processo de auto cicatrização realizado (Adaptado de Jonkers)

Levanta-se também a hipótese de a bactéria ser uma forma de proteger a corrosão de armaduras devido ao seu consumo de oxigênio.

Tabela 1 - Técnicas de encapsulamento com agentes bacterianos (Adaptado de Amran et al., 2022)

Tipo de Bactéria	Processo de auto cicatrização	Características
Bacillus cohnii	C ₆ H ₁₀ CaO ₆	- Bactéria se mantém ativa por meio ano - Sela grandes aberturas
Bacillus subtilis	C ₆ H ₁₀ CaO ₆	- Melhora o processo de cicatrização
Bacillus sphaericus	Precipitação ureolítica de Ca(NO ₃) ₂	- Aumento da resistência à compressão - Aumento do processo de cicatrização - Diminuição da permeabilidade - Maior eficácia em materiais permeáveis - Diminui absorção de água

Bacillus subtilis	Cura por Ureia–2 CaCl ₂	<ul style="list-style-type: none"> - Aumenta resistência a compressão - Aumenta a porosidade - Aumenta a permeabilidade e absorção de água
Bacillus megaterium	Extrato de levedura de uréia, CaCO ₃	<ul style="list-style-type: none"> - Redução permeabilidade - Redução da abertura das fissuras - Aumento de resistência à compressão
Bacillus sphaericus	Precipitação ureolítica de Ca (NO ₃) ₂ , 4H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> - Melhor a eficácia do processo de auto cicatrização - Preenche grandes fissuras - Reduz a permeabilidade - Aumento de resistência à compressão - Redução da absorção de água
Bacillus subtilis	Cristais de uréia CaCO ₃ , extratos de levedura e NaCl	<ul style="list-style-type: none"> - Grande recuperação de força - Aumento da resistência - Diminui o tamanho das fissuras
Bacillus sphaericus	Ureia, nitrato de cálcio e uréia (CO(NH ₂) ₂)	<ul style="list-style-type: none"> - Redução da permeabilidade - Otimização do uso de microcápsulas - Melhora a taxa de auto cicatrização
Lysinibacillus sphaericus	Íon de uréia Ca ²⁺ , uso de CaCl ₂	<ul style="list-style-type: none"> - Melhora das propriedades de argamassas - Reduz a porosidade e a permeabilidade - Aumento de resistência

Observa-se na tabela 1 a prevalência das bactérias do gênero *Bacillus*. Como as características estudadas foram em decorrência de aplicações em estruturas de concreto, muitas dessas propriedades não são fundamentais, ou até mesmo não recomendadas em injeções, como por.

O aumento da resistência à compressão é uma qualidade priorizada quando se trabalha com concreto, no entanto para a reabilitação de alvenaria este fator não é relevante, visto que o material injetado deve ter resistência similar ou menor que a própria alvenaria (Biçer-Simsir & Rainer, 2013).

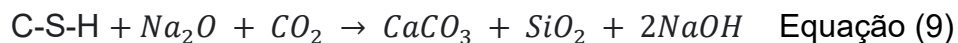
As características priorizadas para a aplicação em injeções devem ser a redução da permeabilidade e da porosidade do material. Desta forma as bactérias das espécies *Bacillus sphaericus*, *Bacillus megaterium* destacam-se por atender este critério.

Lysinibacillus sphaericus, a única bactéria da tabela pertencente a outro gênero, apresenta resultado interessante. Seu processo de cicatrização melhora as propriedades das argamassas, devido a redução da porosidade e absorção de água, logo apresenta maior compatibilidade para a utilização em injeções (Siti Khodijah Chaerun *et al.*, 2020).

2.2.2.2. Encapsulamento de agentes químicos

As cápsulas dos agentes autocicatrizantes podem ser preenchidas com diversos compostos químicos. Na literatura os principais agentes utilizados para o encapsulamento encontrados foram: epóxi, poliuretano, silicato de sódio, polímeros termoplásticos ou termofixos, cimento, água e nutrientes para bactérias (Pelletier *et al.*, 2011; Ju *et al.*, 2015; Bakharev, 2015 e Wang *et al.*, 2019).

Pelletier *et al.* (2011) utilizaram de silicato de sódio como agente cicatrizante, o qual reage com a matriz cimentícia produzindo gel de C-S-H como seguem as equações 8 e 9:



A equação 8 indica a interação entre silicato de sódio e hidróxido de cálcio, elemento resultante da reação entre cimento e água. Na equação 9, os elementos resultantes da equação anterior formam dióxido de silício, hidróxido de cálcio e calcita.

As amostras foram submetidas a alguns testes, entre eles o de corrosão. Neste, foram adicionados três fios de ferros na amostra durante sua moldagem (Figura 28) e em seguida a viga foi submetida a um teste de flexão de três pontos, para produzir fissuras na central região dos fios.



Figura 28 - Amostra indicando a fissura e os fios de ferro através da mesma (Pelletier et al., 2011)

Diretamente na fissura foi aplicado cloreto de sódio, sendo assim o fio de ferro serviu como caminho para a corrosão. Um voltímetro foi conectado às extremidades dos fios para o monitoramento da voltagem durante o tempo, um potencial superior a $-0,200\text{V}$ classifica como baixo risco de corrosão, entre $-0,200\text{V}$ e $-0,350\text{V}$ considera-se risco intermediário, abaixo de $-0,350\text{V}$ alto risco e por fim se atingir $-0,500\text{V}$ considera-se corrosão severa (Figura 29).

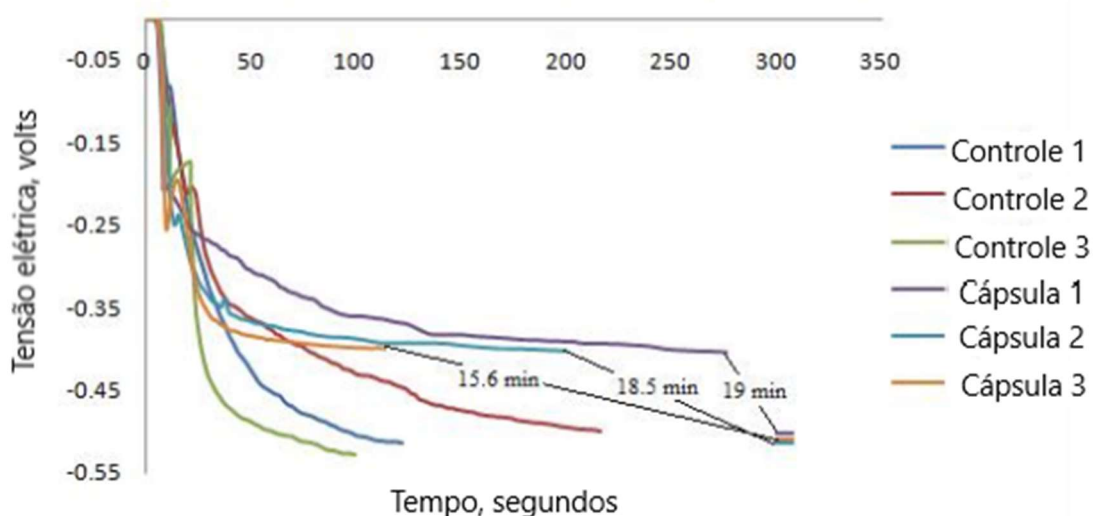


Figura 29 - Resultados dos ensaios de corrosão (Adaptado de Pelletier et al., 2011)

Quanto à corrosão, o grupo de controle levou entre 96 a 212 segundos entre o nível intermediário até o severo de corrosão, enquanto as amostras com silicato de sódio demoram de 15,6 até 19 minutos de duração para realizar este processo. Indicando assim maior inibição do processo de corrosão.

Cailleux e Pollet, (2009) também estudaram a ativação do mecanismo de auto cicatrização autônoma, diferentemente dos trabalhos anteriores, este se utilizou de

dois agentes cicatrizantes para realizar a reação. Um encapsulado e outro disperso na matriz, quando a cápsula do primeiro romper os dois entram em contato e o processo de auto cicatrização é realizado.

O agente encapsulado foi bisfenol-F e no concreto foi inserida uma substância enrijecedora. Com o rompimento da cápsula e o encontro dos dois agentes ocorre a reação química formando polímeros que selam a fissura.

A reação com um segundo componente presente na matriz cimentícia pode ser também aplicada com bactérias. Wang J., *et al.* (2012) incubou a bactéria *Bacillus sphaericus* em diatomito para protegê-la do ambiente alcalino do concreto. Na composição dos corpos de prova também era integrada urea, assim o microrganismo empregado quando em acesso à substância reagem resultando em auto cicatrização autônoma.

Quanto maior a taxa de diatomito utilizada maior a taxa a atividade ureolítica, fissuras entre 0,15 e 0,17mm foram totalmente ou parcialmente fechadas reduzindo a absorção de água capilar em 70% e 50% respectivamente. Além do carbonato de cálcio, menores quantidades de uréia ou nitrato de cálcio foram identificadas no fechamento das fissuras, devido a quantidade excessiva destes compostos.

O sistema utilizando dois componentes encapsulados consiste em um agente cicatrizante e em um catalisador. Com a fissura e o rompimento de ambas as células os componentes escolhidos reagem promovendo a auto cicatrização.

Monômero de metilmetacrilato (MMA) e trietil borano foram estudados para avaliar a reação e compatibilidade desses compostos (Yang *et al.*, 2010). O teste de resistência à compressão foi realizado sem a realização do pré esforço do concreto a fim de gerar fissuras. Os resultados utilizando a técnica de dois compostos encapsulados apresentou resultados de 45,8% e 30,4% superior à amostra de controle de um e 28 dias, respectivamente.

Tittelboom *et al.* (2011) investigou outras propriedades e condições de aplicabilidade do MMA, entre estas a viscosidade ideal. Uma viscosidade muito alta não permite a liberação do agente da cápsula, enquanto uma viscosidade baixa faz com que o material seja absorvido pela matriz cimentícia.

Para isso diversas proporções de MMA com o catalisador PMMA foram utilizadas. Quanto maior a quantidade de PMMA maior a viscosidade sendo assim a

concentração de 80mg PMMA/ ml MMA foi considerada ideal, resultando em uma viscosidade de 0,034 Pa·s.

Utilizando esta concentração foi estudada a concentração ótima entre agente e catalisador, utilizando além de PMMA, peróxido de benzoíla (BPO) e N-dimetil-p toluidina (DMPT). Os resultados apontaram a utilização de 1 mol% de DMPT e 2 mol% de BPO, visando maiores resistências à tração e compressão.

Os componentes químicos apresentados na tabela 2 contém a descrição adicional do material de suas cápsulas.

Tabela 2 - Técnicas de encapsulamento com agentes químicos (Adaptado de Amar Danish et al., 2020)

Cápsula	Agente cicatrizante	Características
Poliuretano/ureia formaldeído	Silicato de sódio	- Reduz a largura das fissuras e transmissão de ondas ultrassônicas
Formaldeído de ureia	Epóxi	-Aumenta compressão, tração força e elástico dinâmico módulo - Reduz a porosidade, difusão de cloretos e permeabilidade
Formaldeído de ureia	Ca (NO ₃) ₂	- Aumenta o módulo de elasticidade e resistividade superficial
Formaldeído de ureia	Silicato de sódio	- Aumenta a rigidez - Reduz absorção capilar
Formaldeído de ureia melamina	Diciclopentadieno	- Aumenta a rigidez
formaldeído de ureia	Epóxi	- Aumenta a resistência à flexão
Álcool polivinílico	Sulfato de cálcio aluminar	- Aumenta a elasticidade dinâmica módulo
Alginato	Ag ⁺	- Melhora a resistência ao cloreto

Assim como nas bactérias destacam-se as propriedades que favoreçam as características das caldas de injeção. Diferente dos agentes bacterianos, poucos agentes químicos colaboram para a diminuição da porosidade e da permeabilidade. Entre estes agentes se destacam o epóxi e o silicato de sódio.

2.2.3. Sistema de auto cicatrização vascular

Este método consiste na construção de canais preenchidos com agentes cicatrizantes no interior do concreto ou argamassa que são conectados ao meio externo. Desta forma o agente pode ser reaplicado por meio da gravidade ou forças capilares, prolongando a vida útil do processo de auto cicatrização evitando o esgotamento do agente.

Dry (1994) utilizou deste princípio, adotando como agente o cianoacrilato, com o objetivo de promover estruturas que resistem a forças sísmicas e conseqüentemente tenham a capacidade de reverter parte dos danos provocados pelo terremoto.

Foi testada a capacidade de flexão de vigas, onde as amostras de controle não continham esta tecnologia. A princípio as amostras foram submetidas a cargas suficientes para promover a ruptura do concreto. E o segundo teste foi realizado uma semana após.

Os resultados apontaram uma maior confiabilidade e capacidade de flexão dos elementos utilizando cianoacrilato. Foi observado que as fissuras seladas após o primeiro teste observaram as forças aplicadas, pois novas fissuras foram abertas em diferentes pontos após a segunda carga.

Imitando a estrutura óssea humana, o concreto com redes porosas apresenta outra ideia no conceito de cicatrização vascular. Assim como os ossos, o material apresenta um núcleo poroso enquanto seu exterior é sólido e rígido.

Sangadji e Schlangen (2012) utilizaram epóxi como agente cicatrizante, além de aplicar corante para obter a coloração e melhor visualização dos resultados. Para o teste de tração, no meio da amostra foi realizado um entalhe para que quando realizasse o ensaio a fissura se apresentasse neste ponto. Após o pré tracionamento a peça foi posta a repousar por 24h para o efeito da auto cicatrização ser executado.

No segundo teste a amostra suportou 5,2kN enquanto o elemento sem epóxi suportou 2,2kN. No teste de flexão o procedimento foi o mesmo e os resultados apresentaram o aumento de 33% da capacidade de carga entre o primeiro e segundo ciclo de teste.

2.3. Ensaios para avaliação da capacidade de cura

2.3.1. Teste de carga

Este experimento busca quantificar o incremento da resistência à compressão do concreto a partir do processo de auto cicatrização. Apesar de ser uma das formas mais utilizadas para verificar a atuação da auto cicatrização, não se apresenta nenhuma norma a qual descreve com rigor e especificidade a metodologia do teste.

Contudo, em suma os ensaios são feitos da seguinte forma: o concreto auto cicatrizante é elaborado e molda-se os corpos de prova. Estes são divididos em dois grupos, os primeiros são submetidos à prensa hidráulica para o teste de resistência à compressão até seu rompimento. No segundo grupo é feito o mesmo processo, no entanto o teste é cessado antes de atingir o ponto de ruptura evidenciado no primeiro grupo, isto é feito a fim de provocar microfissuras no concreto sem que o mesmo seja rompido.

Os corpos de prova são mantidos submersos para cura por período determinado, geralmente 28 dias. Em seguida, as amostras têm novamente sua resistência à compressão testada. Sendo assim possível comparar a variação de resistência entre o primeiro grupo (antes da cura autocicatrizante) e o segundo (após a cura autocicatrizante).

2.3.2. Teste de permeabilidade à água

O processo de auto cicatrização induz o preenchimento dos espaços vazios no concreto, diminuindo sua permeabilidade. A partir desta propriedade alguns testes são realizados a fim de avaliar a atividade autocicatrizante no concreto.

Falling head test é chamado o teste que avalia a absorção de água do concreto a partir da queda constante de gotas de água sobre a espécime. O líquido é armazenado em uma pipeta de 1 cm de diâmetro acima da amostra. Abaixo dela,

outro tubo é posicionado para quantificar o volume de água que atravessou o concreto em intervalos constantes de tempo. Em concretos autocicatrizantes é comparado os resultados deste ensaio em uma amostra de controle.

Elke G. et. al (2016) pré carregou as amostras pré moldadas com um furo horizonte de 5mm de diâmetro para obtenção de fissuras de 150 µm. Após 2 dias debaixo de água e saturadas, as espécies foram seladas com fita alumínio. Um dos lados do furo foi tampado com cola e o outro é conectado a um tubo plástico ligado a um reservatório de água. O líquido percorre a peça e sai através da fissura induzida anteriormente e o volume de água escoada é registrado. Após 28 dias em ciclos secos e molhados é realizado novamente o teste, porém o reservatório é posicionado em uma altura maior para aumentar a pressão da água, avaliando assim a permeabilidade à alta pressão após a auto cicatrização.

2.3.3. Teste de ultrassom

O aparelho de ultrassom consegue avaliar a auto cicatrização da velocidade do seu pulso (Zhu et. al, 2012). Este é provocado no concreto a partir de um transmissor e um gerador, parte do equipamento, chamado receptor mensura a velocidade deste pulso. Quanto mais rápido for percorrido entre o gerador e o receptor, menor são as fissuras e imperfeições dentro do concreto.

Desta forma é possível avaliar concreto com diferentes idades, submetidos a diferentes esforços sem os destruir ou comprometer sua integridade. Este ensaio também pode ser utilizado tanto em amostras, quanto em estruturas em utilização.

3. CALDAS DE INJEÇÃO

A injeção de caldas fluidas, também conhecida como pasta de injeção e como *grout injection*, é uma técnica que consiste em selar fissuras presentes nas paredes por meio de uma injeção realizada através de um pequeno orifício ou fendas já existentes. Este mecanismo de intervenção é pouco intrusivo, no entanto, não é reversível. Sua eficiência é potencializada quando a estrutura receptora possui uma rede comunicante entre os vazios.

Esta injeção possibilita um acréscimo de compacidade da alvenaria na qual foi aplicada pois ela estabelece conexões entre as camadas internas e externas. Esta aplicação também auxilia no aumento da resistência mecânica da alvenaria (Ignoul *et al.*, 2004).

Esta tecnologia pode ser aplicada em diversos casos, como em estruturas existentes ou em construção. Diversos materiais são compatíveis para receber a injeção de caldas, como: diferentes tipos de alvenaria, incluindo blocos de concreto e tijolos cerâmicos.

O Conselho Nacional dos Monumentos e Sítios (ICOMOS) recomenda a aplicação de injeção de caldas como primeira instância quando há necessidade de: consolidar estruturas históricas, impermeabilizar estruturas, preservar elementos decorativos e proteger contra adversidades climáticas (ICOMOS, 2004). Estas estruturas por possuírem um enorme valor patrimonial, cultural e arquitetônico, fazem com que o reforço dessas estruturas seja uma questão de grande interesse público (Roque, 2003).

3.1. Propriedades

Para confeccionar a mistura da calda é fundamental conhecer o substrato em ela será aplicada, dependendo das características diferentes materiais serão utilizados para a sua composição. Alguns parâmetros devem ser avaliados para a produção de uma calda eficiente, segue algumas destas propriedades.

- Resistência mecânica: o conjunto calda e substrato devem apresentar resistências compatíveis, a fim de que o material injetado melhore a resistência do meio onde é aplicado, porém não altere o fluxo de forças (Luso, 2012);
- Injetabilidade: a habilidade de percorrer entre as fissuras, sem que ocorra a obstrução da mesma, o tamanho das partículas das caldas é importante para esse fator, bem como a capacidade de evitar a sua aglomeração (Eriksson, 2002);
- Variação volumétrica: retração a partir da hidratação de CSH resulta em espaços vazios e a expansão a partir da formação de minérios como a etringita acarreta na formação de fissuras a partir da criação de pontos de tensões (Luso, 2012).]

3.2. Materiais utilizados

Existem diversos materiais que são utilizados como base para as caldas de injeção, como o cimento e o cal.

A calda de injeção com base de cimento é uma das mais utilizadas na construção civil (ACPA, 1994). Suas características devem apresentar boa adesão a superfícies, resistência mecânica e baixo grau de retração (Njock et. al, 2018), contudo apresentam limitações quanto ao preenchimento de vazios devido aos diâmetros das partículas do cimento (Kong Sio-Keong, 2005).

A utilização de cimento como base de caldas acarreta em maior resistência mecânica. Desta forma é compatível quando utilizado em estruturas de concreto, no entanto é incompatível para a aplicação em substratos com menores resistências como paredes de alvenaria.

Para a utilização neste substrato, alguns trabalhos na literatura estudam a aplicação de cal em caldas de injeção, no entanto a cal. Uma calda de injeção com base de cal, cinzas volantes e cimento apresentaram bons resultados para consolidação de alvenarias antigas (Toumbakari, 2001; Luso & Lourenço, 2014 e Klosowski, 2018).

O trabalho de Klosowski (2018), investigou a relação entre as caldas de injeção com base de cal nas pedras presentes em edificações históricas

portuguesas. Comparou-se a injeção de caldas com base de cal hidráulica (acrescida de cimento Portland branco) com uma calda de injeção comercial italiana (*Legante Per Iniezioni 790*), visando obter uma calda de fácil obtenção *in loco*. Um dos benefícios encontrados foi a vantagem financeira, visto que, esta calda apresentou um valor quatro vezes menor que a calda comercial.

No entanto, segundo Coutinho (2006), o processo de enrijecimento de cal resulta em sua retração, e conseqüente fissuramento. Brás (2011) aponta a complexidade de fatores durante a execução da injeção de caldas. Para que o processo seja executado corretamente e que a reabilitação seja bem sucedida, o material aplicado deve atender os critérios expressos na tabela 3.

Tabela 3- Propriedades necessárias para caldas de injeção (Adaptado de Luso et al., 2007)

	Pretende-se fluidez durante tempo suficiente e capacidade de penetração uniforme, de modo que todos os vazios sejam preenchidos de igual forma;
Requisitos Reológicos	De preferência ausência de segregação (para evitar heterogeneidades); Mínima exsudação, para diminuir a presença de vazios quando a mistura estiver no estado endurecido.
	Deverá ser capaz de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reações irreversíveis;
Requisitos Químicos	Deverá ser resistente aos sais de sulfato, de modo a evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências; O teor de álcalis deverá ser mínimo;
	O tempo de início de presa deverá ser adequado ao tempo necessário para a execução da injeção;
Requisitos Físicos	O material deve ser insolúvel em água e na presença de humidade deve apresentar a menor variação de volume possível; Pretende-se que a calda tenha uma retração baixa;
Requisitos Mecânicos	As características de resistência mecânica e de rigidez deverão ser similares aos materiais originais ou apenas ligeiramente superiores;

As caldas e argamassas deverão ter boa e adequada aderência ao suporte para o bom funcionamento do conjunto;

Requisitos Térmicos	Pretende-se que a calda tenha baixo calor de hidratação para evitar o desenvolvimento de variações térmicas que possam prejudicar a aderência ao suporte.
--------------------------------	---

Atenta-se que o uso exclusivo da cal hidráulica na calda não apresentou comportamento satisfatório. A aplicação de uma pequena quantidade de cimento portland foi necessária para obtenção de melhoras das propriedades reológicas, físicas, e mecânicas estudadas, sem afetar financeiramente ou a rigidez da estrutura. A calda comercial apresentou as melhores características observadas em estado fresco e endurecido, no entanto a viabilidade econômica pode ser crucial para um trabalho de restauro.

Desta forma é possível entender a importância do estudo a respeito do processo de auto cicatrização, voltados a atender as fragilidades presentes nas caldas. O emprego da tecnologia autocicatrizante visa reduzir a reincidência de fissuras, que podem acontecer devido ao grande número de variáveis presentes no processo de injeção de caldas

3.3. Aplicação e Ensaio

Para a realização da injeção das caldas são necessários alguns equipamentos como, recipiente para mistura (A) e armazenamento (B) da argamassa, bomba (C) e tubos (D) para transporte de material até os furos (quando realizado sob pressão) e garantir o fluxo entre os vazios da estrutura aplicada e por fim, um sistema de admissão (F), que faça a união à os furos realizados na estrutura. É facultativo, porém importante uma segunda mangueira (E) de retorno para o reservatório de armazenamento, caso durante a execução a argamassa fique muito tempo parada dentro do tubo principal.

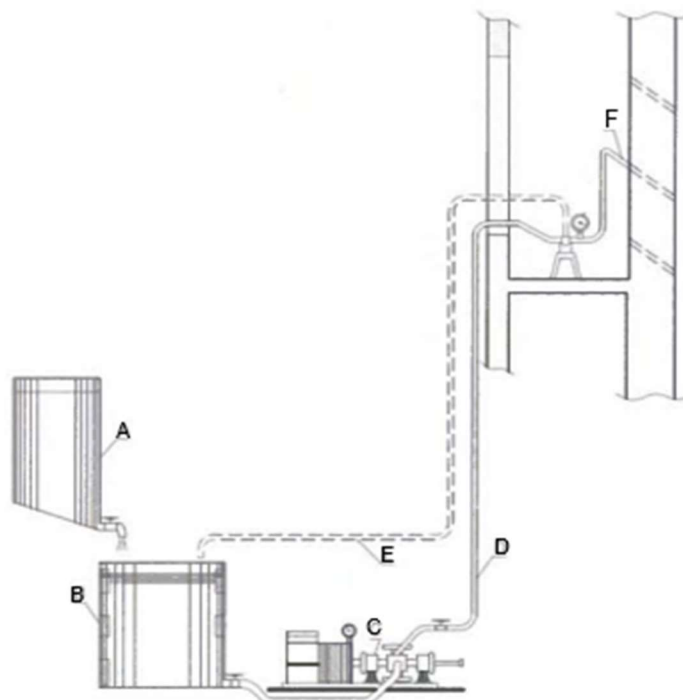


Figura 30 - Sistema para injeção sob pressão (F. Van Rickstal, 2001)

Quando executado sob pressão, são realizados furos nas laterais da estrutura onde é observado a fissura, esses furos também servem como dutos de ventilação, permitindo a fluidez durante a aplicação. A fissura deve ser selada externamente, podendo utilizar resinas, poliuretano, ou até mesmo a própria argamassa a ser injetada. Em seguida os buracos devem ser limpos com água, desta forma já é possível avaliar o caminho que líquido percorre pelos buracos, a fim de avaliar a sequência de aplicação.

Em fissuras horizontais o primeiro ponto de injeção é em umas das extremidades, quando verticais é aplicado de cima para baixo, quando é possível visualizar a calda saindo do próximo furo é trocado o ponto de aplicação para este. O processo é repetido até o último furo, é possível observar no manômetro da bomba que quando as fissuras estão totalmente preenchidas a pressão não abaixa.

Uma alternativa também é a aplicação por gravidade, neste sistema não há a necessidade de bombear a argamassa até o extrato a ser aplicado. Os furos são realizados criando uma malha triangular, para melhor preenchimento dos vazios. A aplicação acontece na camada superior de furos, descendo assim que é observado o escoamento da calda pelo furo da camada inferior.

Para garantir a execução deste processo e a reabilitação adequada, alguns ensaios podem ser feitos para definir os parâmetros necessário da calda, como os que seguem abaixo.

3.3.1. Injetabilidade EN-1771

Este teste consiste na injeção da calda de injeção na face inferior de uma coluna preenchida de material granulado. A pressão para que essa ação ocorra é constante e o tubo onde é injetado apresenta paredes transparentes. Este tubo apresenta marcações de altura (Figura 31), as quais são usadas para plotar um gráfico com relação ao tempo decorrido para a calda atingir cada altura.



Figura 31 - Sistema montado para a realização do teste de injeção (Beril et al., 2013)

O topo do tubo é conectado a um cilindro graduado, este serve para classificar o material injetado como:

Fácil - Caso a coluna seja preenchida e 20 ml do excesso da calda seja coletado na taxa de 1 ml/min no cilindro graduado;

Possível - Caso a coluna seja preenchida, porém a taxa do escoamento do excesso não atinja 1 ml/min;

Difícil - caso o nível fique estagnado em alguma altura do tubo ou se a taxa de elevação seja inferior à 30 mm/min.

A figura x a seguir indica curvas correspondentes aos 3 tipos de classificação.

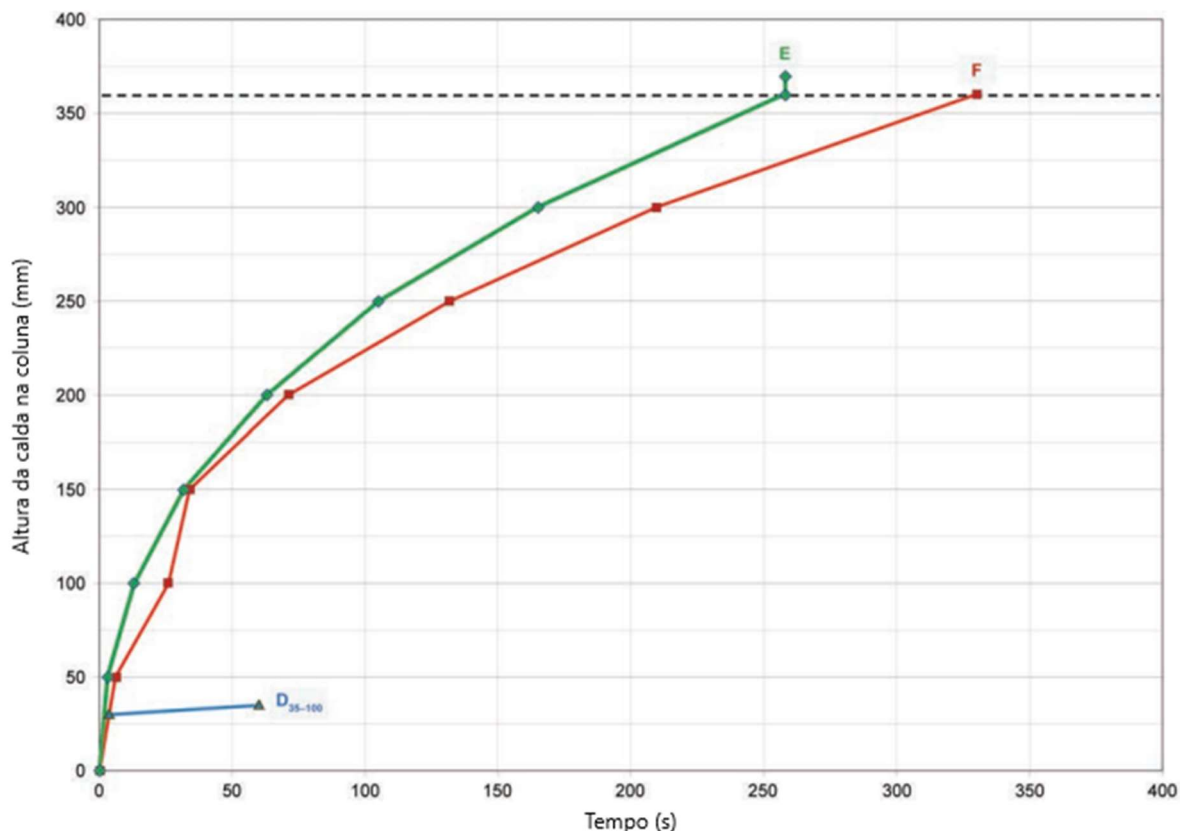


Figura 32 - Exemplo de curva das três classificações para uma coluna com altura total de 360mm (indicada pela linha tracejada). Em verde a coluna para a calda de fácil injeção (E), em vermelho a com possível injeção (F) e em azul a com difícil injeção (D) (Adaptado de Beril et al., 2013)

3.3.2. Expansão e exsudação ASTM C 940

Nesta análise a calda é inserida em um cilindro graduado, com o decorrer do tempo observa-se a separação das fases sólidas e líquidas (Figura 33). Injeções à base cimentícia podem apresentar maior separação de fases devido ao calor de hidratação, por outro lado quando usada a base de cal o teste apresenta resultados mínimos. Caldas de injeção bem traçadas não devem apresentar excesso de água aparente em seu topo, sendo sugerido pelo teste 0.4% de exsudação (ASTM C 940).

O teste permite assim avaliar a quantidade ótima de água para a injeção, evitando assim eventuais entupimentos no processo de injeção.

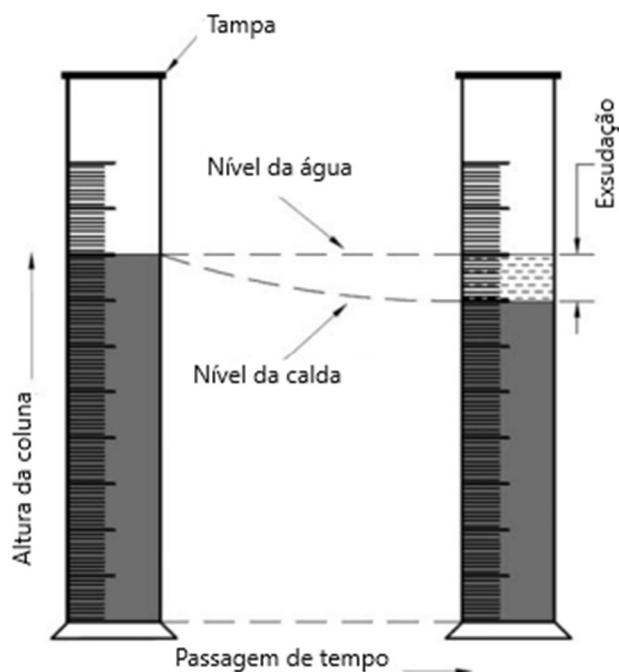


Figura 33 - Esquema representativo do teste padrão ASTM C 940 (Adaptado de Ashokreddy et al., 2021)

3.3.3. Retração por secagem ASTM C 474

Este ensaio tem o objetivo mensurar a diminuição volumétrica do material a partir do processo de secagem. Este parâmetro influencia na durabilidade e adesão do material à estrutura inserida. A diferença de volume antes do processo de secagem deve ser o menor possível sem 4% do seu limite.

Além destes existem ainda diversos ensaios que podem ser executados para definir ainda mais propriedades da calda estudada. Como o teste de resistência a tração onde o material endurecido é posicionado horizontalmente em uma prensa (Figura 34 a). Aplica-se um carregamento constante que faz a amostra se dividir ao meio. E o teste de absorção de água por capilaridade (Figura 35) normatizado pela NORMAL 11/85, este ensaio tem a finalidade de avaliar a compatibilidade do material injetado com o material original.

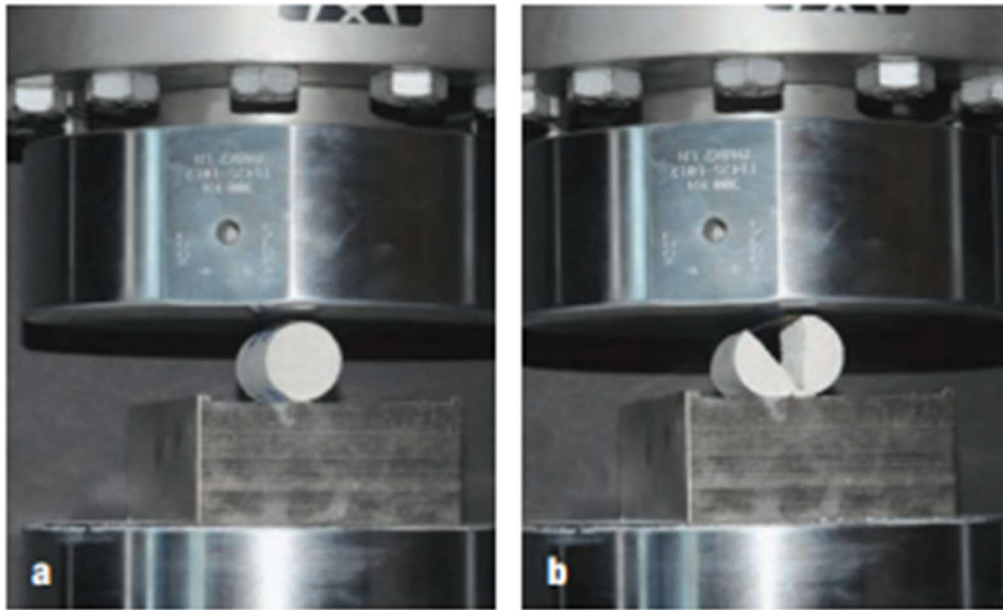


Figura 34 - Teste de tração (a) e amostra testada rompida (b) (Beril et al., 2013)

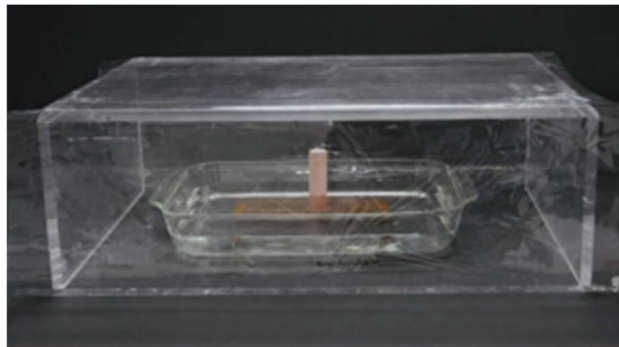


Figura 35 - Sistema do ensaio montado, o plástico tem a função de reter a evaporação de água (Beril et al., 2013)

4. PLANO DE TRABALHO

As informações colhidas e estudadas durante a elaboração deste trabalho foram utilizadas como base para a criação de um plano de trabalho. Este cronograma tem o objetivo servir como roteiro para estudos seguintes a serem realizados a fim de avaliar e viabilizar a utilização de caldas de injeção com a tecnologia de auto cicatrização.

Para isso, foram selecionados os métodos que na bibliografia estudada apresentaram ser mais compatíveis para utilização em caldas. Para cada item selecionado foi observado a necessidade de realizar ensaios que consigam avaliar os mecanismos autocicatrizantes em caldas, propondo as técnicas e agentes cicatrizantes mais adequados para a utilização deste material.

Além da eficácia dos processos de autocura, também é importante identificar se a calda atende os parâmetros desejados. Portanto este estudo inclui no plano de trabalho ensaios que permitam concluir se as caldas de injeção autocicatrizante podem ser executadas.

4.1. Seleção dos Métodos

As cinzas volantes e a utilização de SAP são métodos autogênicos, desta forma ambas não precisam de procedimentos de aplicação diferentes dos agregados comumente utilizados. Ambos os métodos também apresentam características compatível com as desejadas em caldas de injeção, sendo elas a redução da porosidade e diminuição da exsudação.

A fibras também é um método que potencializa a eficácia da ação cicatrizante por reduzir os espaços de aberturas das fissuras. No entanto, devido seu comprimento as fibras podem obstruir a passagem e impedir a aplicação da calda.

A utilização de microcápsulas apresenta uma técnica versátil, pois a cápsula age como uma camada de proteção entre o agente cicatrizante e a matriz do material utilizado.

Redes vasculares e SMA apresentam sua aplicação em peças pré-moldadas, utilizando moldes e procedimentos específicos. Para a reabilitação de alvenarias já existentes estes processos são inviáveis, pois devem ser incorporados a peças durante sua produção. Para injeções seus conceitos são incompatíveis, pois o

sistema de redes vasculares e SMA só pode ser aplicado em peças pré-moldadas. Portanto, não é possível a aplicação das técnicas em estruturas já executadas.

Em suma, o plano de trabalho envolverá os seguintes métodos de aplicação do processo autocicatrizante:

- Cinzas Volantes;
- Polímeros superabsorventes.

4.2. Composição base

Para poder analisar os resultados dos ensaios propostos a seguir é necessária uma composição sem a adição dos agentes cicatrizantes selecionados. Desta forma será possível comparar os dados obtidos a partir das amostras com a presença da tecnologia autocicatrizante e com sua ausência.

Portanto será considerada uma composição base contendo cimento, metacaulino e cal hidratada. A partir dela também será elaborado o traço para as demais caldas com os agentes cicatrizantes.

O ligante será 30% cimento, 65% cal hidratada e 5% de metacaulino e relação ligante/água de 0,6.

4.3. Cinzas Volantes

Este material apesar de consumir maiores volumes de água na composição pode reduzir a exsudação a partir da absorção do líquido para sua hidratação, além disso, como visto anteriormente é responsável em reduzir a porosidade em argamassas em sua idade avançada.

Para avaliar a atividade autocicatrizante sugere-se a realização de dois ensaios. Em seu estado fresco é feito o teste ASTM C 940, após a mistura será realizado o procedimento conforme descreve Beril *et al.*, (2013) utilizando uma amostra para cada calda distinta.

As cinzas volantes apresentam sua reação de hidratação nas primeiras semanas de cura, dessa forma propõe realizar um período de cura de 28 dias para a realização do teste de permeabilidade, *falling head*, estes ensaios devem ser

realizados também em amostras com as cinzas e para as composições base, sendo destinada uma amostra para cada.

Ao fim destes testes deve-se avaliar os resultados obtidos a fim de concluir se as cinzas volantes diminuem o grau de exsudação das caldas e se há a redução da permeabilidade da mistura.

Quando trabalhado com cinzas volantes, o incremento da relação água/ligante melhora os parâmetros reológicos, recomenda-se a adição de 5% a 15% de cinzas volantes (Brás, 2011), neste intervalo é observado o aumento da resistência à flexão. Desta forma, serão realizadas quatro caldas com diferentes intervalos e combinação de água/ligante e cinzas volantes como segue a tabela 4.

Tabela 4 - Composições para estudos com cinzas volantes

	Água/Ligante	Cinzas volantes (%)
Composição Base	0,6	0
C1	0,7	5
C2	0,7	15
C3	0,8	5
C4	0,8	15

4.4. Polímeros superabsorventes

Assim como as cinzas volantes, os SAPs também reduzem a exsudação devido sua capacidade de absorção de líquidos. Este material já é utilizado em compostos cimentícios fluidos como o concreto auto adensável, desse ponto é interessante visto a composição também fluida das caldas.

Entretanto há de ser avaliado o efeito provocado a partir de variações térmicas, sua taxa de retração pode provocar ainda mais fissuras no objeto aplicado. Recomenda-se a realização do teste de exsudação ASTM C 940, seguindo os

mesmos procedimentos descritos na secção 4.2. Também, é proposto a realização do teste de secagem para avaliar o impacto da utilização deste agregado na variação volumétrica da mistura, este ensaio é descrito por Beril *et al.*, (2013), recomenda-se utilizar 18 amostras e ensaiar apenas as composições com SAP.

Chindasiriphan *et al* (2020) apresenta que o aumento do uso do aditivo diminui a fluidez do material, desta forma recomenda-se a execução dos ensaios e da injeção logo após sua mistura. Portanto recomenda-se a mesmas proporções do ligante base (30% cimento, 65% cal hidratada e 5% de metacaulino), contudo se sugere o aumento da quantidade para 0,7 água/ligante e diferente taxas de SAP (2%, 4%, 6% e 8%). É importante apontar que dependendo dos resultados obtidos pode-se ensaiar amostras com quantidades superiores a 8%.

Para análise no quesito auto cicatrização propõe-se a acompanhar o índice de vazios a partir do teste de ultrassom, sendo durante este teste as amostras expostas a diferenças de temperatura e humidade.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Considerações finais

Há um aumento na quantidade de estudos sobre o processo de auto cicatrização em materiais da construção, contudo estes são focados exclusivamente no concreto. As caldas de injeções apresentam outra grande área para estudos e aperfeiçoamento. No entanto, para isso a abordagem dos estudos deve ser diferente, pois, como visto neste documento, as propriedades de caldas de injeção diferem das propriedades do concreto.

Quando se trabalha com caldas, deve-se compreender que sua função é reabilitar paredes de alvenaria, ou seja, preencher os vazios e evitar a formação de novas que voltem a comprometê-las.

Visto que a tecnologia de auto cicatrização foi pouco aplicada em caldas de injeção, o plano de trabalho apresentado possibilita sanar dúvidas a respeito da compatibilidade das técnicas.

Por fim se ressalta a importância deste trabalho para a área de reabilitação de patrimônios históricos. Esta tecnologia é capaz de preservar o contexto histórico de fachadas, painéis artísticos e evitar intervenções destrutivas para paredes de alvenaria.

5.2. Trabalhos futuros

Neste segmento final do trabalho segue uma série de pesquisas sugeridas que permitam comprovar ou não a eficiência das técnicas de auto cicatrização em caldas de injeção.

- Verificar o impacto da utilização de microcápsulas, utilizando a teste de injeção para avaliar os resultados com diferentes diâmetros de cápsulas;
- Avaliar se a utilização de fibras prejudica a aplicação da calda;

- Comparar a exsudação de água da injeção com as bactérias *Bacillus sphaericus*, *Bacillus megaterium*;
- Analisar o índice de porosidade utilizando *Bacillus sphaericus*, *Bacillus megaterium*;
- Verificar as propriedades dos dois estudos anteriores utilizando as bactérias em contato direto com a matriz, uma cimentícia e outra a base de cal;
- Comprovar a redução da porosidade utilizando epóxi;
- Verificar a variação de absorção capilar utilizando silicato de sódio;
- Avaliar o impacto da bactéria *Lysinibacillus sphaericus* e pesquisar outras espécies do mesmo gênero.

6. REFERÊNCIAS

- Amran, Mugahed, Ali M. Onaizi, Roman Fediuk, Nikolai Ivanovich Vatin Raizal Saifulnaz Muhammad Rashid, Hakim Abdelgader, e Togay Ozbakkaloglu. 2022. "Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: A Review". *Materials*.
- Annappareddy, Ashokreddy, Sooraj A O Nair, Akilesh Ramesh, e Radhakrishna Pillai. 2013. "Flowable Grout for Post Tensioned, Segmental Concrete Bridges".
- ASTM International. 2016. "C940 – 16 Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory".
- ASTM International. 2020. "C1585-20 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes".
- Bakharev, T. 2015. "Microencapsulation in self-healing cementitious materials: A review." *Construction and Building Materials* 90. 383-397.
- Biçer-Simsir, Beril, e Leslie Rainer. 2013. "Evaluation of Lime-Based Hydraulic Injection Grouts for Conservation of Architectural Surfaces".
- Bras, A. (2011). Grout optimization for masonry consolidation, Ph.D. Thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa
- Brendler, Isabele Catori. 2020. "ESTUDO DO DESEMPENHO DE CALDAS DE INJEÇÃO. INFLUÊNCIA DO PLASTIFICANTE." Instituto Politécnico de Bragança.
- BREUGEL, K.V. 2007. "Is there a market for self healing cement base materials?" Em *Proceedings of the first international conference on self healing materials*.
- Cailleux, E., e V. Pollet. 2009. "Investigations on the development of self-healing properties in protective coatings for concrete and repair mortars." Em *Proceedings of 2nd International Conference on Self Healing Materials*,.
- Chaerun, Siti Khodijah, Ridwan Syarif, e Ridho Kresna Wattimena. 2020. "Bacteria incorporated with calcium lactate pentahydrate to improve the mortar properties and self-healing occurrence". *Sci Rep*.
- Chindasiriphan, P., H. Yokota, e P. Pimpakan. 2020. "Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability". *Construction and Building Materials*.
- Coutinho, J. (2006). *Materiais de Construção 2: 1a Parte - Ligantes e Caldas*,

Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto

- De Muynck, Willem, Nele De Belie, and Willy Verstraete. 2010. "Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review." *Ecological Engineering* 36 (2): 118-136.
- Domingues, José Carlos, Tiago Miguel Ferreira, João Negrão, e Romeu Vicente. 2018. "Salvaguarda e preservação do Património Edificado em núcleos urbanos antigos: uma reflexão sobre a reabilitação estrutural de edifícios tradicionais em alvenaria de pedra". *Conservar Património* 29 29 (29): 51–62.
- Dry, C.M. 1994. "Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices." *Smart Mater* 3: 118–123.
- . 2000. "Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability." *Cem. Concr. Res.*, 1969–1977.
- Edvardsen, C. 1999. "Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete." *ACI Mater. J.* 96: 448–454.
- Eriksson M. Prediction of grout spread and sealing effect [Internet] [PhD dissertation]. [Stockholm]: Byggetenskap; 2002. (Trita-JOB. PHD).
- Gagné, R., e M. Argouges. 2012. "A study of the natural self-healing of mortars using air-flow measurements." *Mater. Struct. Constr.*, 1625–1638.
- Gao, Yongsheng, Meng Zhang, Ning Han, and Xiaodong Liu. 2018. "The use of bio-based materials for self-healing concrete: A review." *Construction and Building Materials* 181: 224-238.
- Gruyaert, Elke, Brenda Debbaut, Didier Snoeck, Pilar Díaz, Alejandro Arizo, Eirini Tziviloglou, Erik Schlangen, and Nele De Belie. 2016. "Self-healing mortar with pH-sensitive superabsorbent polymers: testing of the sealing efficiency by water flow tests." *Construction and Building Materials* 123: 755-762.
- Gupta, S., S. D. Pang, e H. W. Kua. 2017. "Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents - A review." *Construction and Building Materials* 146: 419–28.
- Hearn, N. 1998. "Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference?" *Mater Struct.*
- Heide, N. T., e diference. Schlangen. 2007. "Selfhealing of early age cracks in

- concrete.” Em *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*.
- Hilloulin, B., K. Van Tittelboom, E. Gruyaert, N. De Belie, e A. Loukili. 2015. “Design of polymeric capsules for self-healing concrete”. *Cement Concr. Compos.* 55: 298–307.
- Homma, D., H. Mihashi, e T. Nishiwaki. 2009. “Self-healing capability of fibre reinforced cementitious composites.” *J. Adv. Concr. Technol.*, 217–228.
- Hornbogen, E. 1991. “Alloys with Shape Memory”. *German Legierungen mit Formgedächtnis*.
- Ignoul, S., Van Rickstal, F., & Van Gemert, D. 2004. "Aplicação de Rejuntas Minerais. Estudo de Caso e Impacto no Comportamento Estrutural: Igreja de St. Catharina em Duisburg (B)." In *Proceedings International Seminar IV 'Structural Analysis of Historical Constructions'*, Pádua, pp. 719-726.
- ICOMOS. 2004. “Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do patrimônio arquitetônico”. *International Council on Monuments and Sites*.
- Jaroenratanapirom, D. Sahamitmongkol, R. 2011. “Self-crack closing ability of mortar with different additives.” *J. Met. Mater. Miner.*, 9–17.
- Jonkers, H.M. 2011. “Bacteria-based self-healing concrete.” *Heron*.
- Jonkers, H. M.; Thijssen, A.; Muyzer, G.; Copuroglu, O.; Schlangen, E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 2, p. 230-235, 2010.
- Jonkers, Henk M., and Erik Schlangen. "Bacteria-based self-healing concrete." *Heron* 58, no. 1/2 (2013): 1-12.
- Jooss, M. 2001. “Leaching of concrete under thermal influence.” *Otto-Graf-Journal* 12: 51–68.
- Jorne, Fernando, e Fernando M.A. Henriques. 2016. “Evaluation of the grout injectability and types of resistance to grout flow”. *Construction and Building Materials* 122: 171–83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.032>.
- Joseph, C., A.D. Jefferson, B. Isaacs, R.J. Lark, e D.R. Gardner. 2010. “Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials.” *Mag. Concr. Res.*, 831–843.
- Ju, Y., et al. 2015. "Self-healing concrete with microencapsulated healing agents: A review." *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 9, no. 3. 243-259.

- Kalagri, A., A. Miltiadou-Fezans, e Calegari. Vintzileou. 2010. "Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures". *Materials and Structures*.
- Klosowski, Bernardo. 2019. "Caracterização De Caldas De Injeção à Base De Cal Hidráulica Para Consolidação De Alvenarias De Pedra." Order No. 29016477, Instituto Politécnico de Bragança (Portugal).
- Kuang, Ya Chuan, e Jin Ping Ou. 2008. "Passive smart self-repairing concrete beams by using shape memory alloy wires and fibers containing adhesives". *Journal of Central South University of Technology (English Edition)* 15 (3): 411–17. <https://doi.org/10.1007/s11771-008-0077-9>.
- Lee, H.X.D., H.S. Wong, e N.R. Buenfeld. 2015. "Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers". *Cement and Concrete Research*, 194–208.
- Lee, Byungmin, Jinyoung Lee, Hae-Kwon Lee, Woosung Kim, and Seungyoung Park. 2019. "Self-healing concrete using capsule-type bacteria activated by magnetization." *Cement and Concrete Composites* 103: 91-100.
- Li, V.C., Y.M. Lim, e Y.-W. Chan. 1998. "Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite." *Compos. Part B Eng.* 29: 819–827.
- Luso, E., P. Lourenço, e R. Ferreira. 2007. "Injecções para consolidação de construções em terra. Revisão do conhecimento e métodos de ensaio". Em *V Semin. Arquit. Terra em Port. Aveiro*.
- Luso, E., e Paulo B. Lourenço. 2014. "Formulação de caldas à base de cal para injeção de alvenaria antiga." Em 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Aveiro.
- Luso, E. & Paulo B. Lourenço (2017): Experimental laboratory design of lime based grouts for masonry consolidation, *International Journal of Architectural Heritage*,
- Luso, E. (2012). *Análise Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga*, Ph.D. Thesis, Universidade Do Minho
- Malinskii, Y.M., V.V. Prokopenko, N.A. Ivanova, e V.A. Kargin. 1969. "Investigation of self-healing of cracks in polymers." *Mekhanika Polim.* 2: 271–75.
- Mehta, P. K., e Paulo J. M. Monteiro. 2008. "Concreto: microestrutura, propriedades e materiais." *IBRACON*.
- Mihashi, Hirozo, e Tomoya Nishiwaki. 2012. "Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete-State-of-the-Art Report". *Journal of*

Advanced Concrete Technology.

- Na, S.H., Y. Hama, M. Taniguchi, O. Katsura, T. Sagawa, e M. Zakaria. 2012. “Experimental investigation on reaction rate and self-healing ability in fly ash blended cement mixtures”. *J. Adv. Concr. Technol.*
- Nishiwaki, T., M. Koda, M. Yamada, H. Mihashi, e T. Kikuta. 2012. “Experimental study on self-healing capability of FRCC using different types of synthetic fibers.” *J. Adv. Concr. Technol.*, 195–206.
- NP EN 13306. 2010. “Norma Portuguesa sobre a Terminologia da Manutenção”.
- Pelletier, Michelle M, Richard Brown, Arun Shukla, e Arijit Bose. 2011. “Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent”. *University of Rhode Island, Kingston, USA*, nº C.
- Şahmaran, M., S.B. Keskin, G. Ozerkan, e I.O. Yaman. 2008. “Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash.” *Cem. Concr. Compos.* 30: 872–879.
- Sakai, Yuji, Yoshikazu Kitagawa, Toshibumi Fukuta, e Masanori Iba. 2003. “Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire”. *Smart Structures and Materials.*
- Sangadji, S., e Sanga ji. Schlangen. 2012. “Self healing of concrete structures—Novel approach using porous network concrete.” *J. Adv. Concr. Technol.*, 185–194.
- Shahinpoor, M., F. Ansari, A. Maji, e C. Leung. 1997. “Intelligent civil engineering materials, structures and systems revisited.” Em *Intelligent Civil Engineering Materials and Structures.*
- Souradeep, G., e H.W. Kua. 2016. “Encapsulation Technology and Techniques in SelfHealing Concrete”. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering.*
- Sun, L., W. Yu, e Q. Ge. 2011. “Experimental research on the self-healing performance of micro-cracks in concrete bridge.” *Adv. Mater. Res.*
- Tavares, M. 2009. “A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos”.
- Termkhajornkit, P, T Nawa, e K Kurumisawa. 2006. “Effect of water curing conditions on the hydration degree and compressive strengths of fly ash–cement paste.” *Cem Concr Compos.*
- Tittelboom, Kim Van, e Nele De Belie. 2013. “Self-Healing in Cementitious

- Materials—A Review". *Materials*.
- Tittelboom, Van, K. Adesanya, K. Dubruel, P. Puyvelde, e N. de Belie. 2011. "Methyl methacrylate as a healing agent for self-healing cementitious materials." *Smart Mater. Struct.*
- Toumbakari, Eleni. 2001. "Lime-Pozzolan-Cement Grouts and their Structural Effects on Composite Masonry Walls." PhD diss., Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Van Rickstal, F.. "Grout Injection of Masonry, Scientific Approach and Modeling / Mörtelinjektion in Mauerwerk, ein wissenschaftlicher Ansatz und Modellbildung" *Restoration of Buildings and Monuments* 7, no. 3-4 (2001): 407-432.
- Wang, J., N. Belie, e W. Verstraete. 2012. "Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete." *Microbiol. Biotechnol.*
- Wang, Jun-Yang, Hannelore Soens, Willy Verstraete, Nele De Belie, and Arne R. Verliefde. 2016. "Evaluating the self-healing capacity of cementitious materials by using encapsulated bacteria." *Journal of Materials in Civil Engineering* 28 (3): 04015134.
- Wang, Kejin, Daniel C. Jansen, and Surendra P. Shah. 1997. "Permeability study of cracked concrete." The NSF Center for Advanced Cement-Based Materials, Northwestern University, 2145 Sheridan Rd., Evanston, Illinois 60208-4400, USA.
- Wang, X., *et al.* 2019. "Self-healing concrete: a review of recent advances." *Journal of Materials Science* 54, no. 14. 10544-10563.
- Wiktor, V., e H.M. Jonkers. 2011. "Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete." *Cem. Concr. Compos.*, 763–770.
- Wool, R.P. 1979. "Crack healing in semicrystalline polymers, block copolymers and filled elastomers." *Adhes. Adsorpt. Polym.*, n° 12A: 341–362.
- . 1981. "O'Connor, K.M. A theory of crack healing in polymers." *J. Appl. Phys.* 52: 5953–5963.
- Yang, Z., J. Hollar, X. He, e X. Shi. 2010. "Laboratory assessment of a self-healing cementitious composite." *J. Transp. Res. Board*, 9–17.
- Zhu, Y., Yang, Y., and Yao, Y. 2012. "Autogenous self-healing of engineered cementitious composites under freeze–thaw cycles." *Construction and Building Materials* 34: 522-530.