

**DENISE TORBOLO ARAUJO
PAULA FERRAZ GODINHO
YURI GONÇALVES TANAKA**

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA VERIFICAÇÃO DE
SELAMENTO DE FISSURAS E INCREMENTO DE RESISTÊNCIA EM
CONCRETO AUTOCICATRIZANTE**

SÃO CAETANO DO SUL

2018

DENISE TORBOLO ARAUJO
PAULA FERRAZ GODINHO
YURI GONÇALVES TANAKA

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA VERIFICAÇÃO DE
SELAMENTO DE FISSURAS E INCREMENTO DE RESISTÊNCIA EM
CONCRETO AUTOCICATRIZANTE**

Trabalho de Graduação apresentado à Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Civil.

Área de concentração: Engenharia de Civil

Orientadora: Profa. Dra. Heloísa Cristina
Fernandes Cordon

SÃO CAETANO DO SUL

2018

A688d

Araújo, Denise Torbolo

Desenvolvimento de metodologia para verificação de selamento de fissuras e incremento de resistência em concreto autocicatrizante / Denise Torbolo Araújo, Paula Ferraz Godinho, Yuri Gonçalves Tanaka – São Caetano do Sul : CEUN/EEM, 2018.
56 f.

Trabalho de Conclusão de Curso Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2018.

Orientador: Prof. Dra. Heloisa Cristina Fernandes Cordon

1. Aditivo cristalizante 2. Material cimentício 3. Fissuras estáticas
I. Godinho, Paula Ferraz II. Tanaka, Yuri Gonçalves
III. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. IV. Título.

Dedicamos este trabalho aos nossos familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Profa. Dra. Heloísa Cristina Fernandes Cordon, nossa orientadora, pelo auxílio nesta jornada acadêmica e contribuição para a realização deste trabalho.

Aos profissionais da Votorantim Cimentos, Engemix e MC-Bauchemie, em especial ao Sr. Marcus Coimbra, Sr. Mike Avelino, Sra. Luana Scheifer, Sr. Jackson Freitas Nunes, Sr. Marcos Francisco da Silva Leite, Sr. Holger Schmidt, que nos cederam seus laboratórios, equipamentos e materiais.

Por fim, agradecemos aos nossos familiares, sem os quais esse trabalho não seria possível.

RESUMO

O trabalho foi elaborado utilizando como base um produto já existente no mercado, porém pouco utilizado: o concreto autocicatrizante, material com capacidade de “auto selar” suas próprias fissuras através da adição de aditivo cristalizante no momento da sua produção. O aditivo é uma mistura de componentes ativos em pó que reagem com a umidade gerando uma formação cristalina insolúvel nos poros e capilaridades do concreto. O produto é altamente indicado para estruturas em contato com água, como caixas d’água, fundações, estações de tratamento de água e esgoto e estações de metrô. Visando aprofundar os estudos relacionados a materiais com capacidade autocicatrizante foram desenvolvidas duas metodologias a fim de testar suas propriedades de selamento de fissura e incremento de resistência. Com base nos resultados obtidos, foi possível verificar que, para o traço utilizado, o material de fato repara fissuras estáticas de até 0,4mm, reduzindo e estabilizando o fluxo de passagem de água a partir do 25º dia do experimento. Em relação ao aumento de resistência do concreto, nota-se que os resultados são irrisórios, alcançando ganhos de até 2,40% para fissuração à 65% da carga de ruptura e ganhos de até 7,36% para fissuração à 80% da carga de ruptura.

Palavras-chave: Aditivo Cristalizante. Catalisador Cristalino. Resistência à Compressão. Fissuras Estáticas. Autocura. Material Cimentício.

ABSTRACT

The work was elaborated using as base a product already existing in the market, but not commonly used: the autocatching concrete, material with the ability to "self seal" its own cracks through the addition of crystallizing additive at the time of its production. The additive is a mixture of active powder components that react with moisture generating a crystalline formation insoluble in the pores and capillaries of the concrete. The product is highly recommended for structures in contact with water, such as water tanks, foundations, water and sewage treatment plants and subway stations. Aiming to deepen the studies related to materials with self-healing capacity, two methodologies were developed in order to test their crack sealing properties and increase resistance. Based on the results obtained, it was possible to verify that, for the traces used, the material actually repairs static cracks up to 0.4mm, reducing and stabilizing the flow of water from the 25th day of the experiment. In relation to the increase in concrete strength, it is observed that the results are negligible, achieving gains of up to 2.40% for cracking at 65% of the breaking load and gains of up to 7.36% for cracking at 80% of the load of rupture.

Keywords: Crystallizing Additive. Crystalline Catalyst. Resistance to Compression. Static cracks. Self healing. Cementic material.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1— DESEMPENHO COM E SEM MANUTENÇÃO	16
FIGURA 2—DISTRIBUIÇÃO RELATIVA DAS INCIDÊNCIAS DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO APARENTE.....	18
FIGURA 3—ORIGEM DOS PROBLEMAS COM RELAÇÃO ÀS ETAPAS DE PRODUÇÃO DAS OBRAS CIVIS	19
FIGURA 4—FLUXOGRAMA DOS PASSOS PARA INTERPRETAR E ANALISAR PATOLOGIAS NAS EDIFICAÇÕES	21
FIGURA 5—EVOLUÇÃO DOS CUSTOS RELATIVOS DE INTERVENÇÃO AO LONGO DO TEMPO.....	22
FIGURA 6— FISSURAÇÕES EM FUNÇÃO DO TIPO DE SOLICITAÇÃO PREDOMINANTE.....	24
FIGURA 7 — FORMAÇÃO DE FISSURA POR ASSENTAMENTO PLÁSTICO.....	24
FIGURA 8 — FISSURA OCASIONADA PELO DESLOCAMENTO DE ARMADURA ...	25
FIGURA 9 — RECALQUE DIFERENCIAL DOS APOIOS GERA FISSURAÇÃO.....	26
FIGURA 10—ÁGUA PERCOLA PELOS CAPILARES	30
FIGURA 11— SELAGEM DE MICROFISSURAS	31
FIGURA 12—CRISTAIS AO LONGO DA FISSURA	31
FIGURA 13— ESTAÇÃO DE METRÔ – LINHA 4 (RJ)	32
FIGURA 14 — MUSEU DA IMAGEM E DO SOM.....	33
FIGURA 15 — RESERVATÓRIO CONSTRUÍDO COM CONCRETO AUTOCICATRIZANTE.....	33
FIGURA 16— CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS APÓS DESFORMA	39
FIGURA 17 — CORPOS DE PROVA IMERSOS EM ÁGUA.....	39
FIGURA 18 — ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA À COMPRESSÃO	40
FIGURA 19— CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS APÓS DESFORMA	42
FIGURA 20 — TUBOS ACRÍLICOS FIXADOS NOS CORPOS DE PROVA	42
FIGURA 21 — VISÃO SUPERIOR DO TUBO ACRÍLICO	43
FIGURA 22 — RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - FISSURAÇÃO À 65% DE P	47
FIGURA 23 — RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - FISSURAÇÃO À 80% DE P	47
FIGURA 24 — EVIDÊNCIA DE CRISTALIZAÇÃO EM CORPO DE PROVA CILÍNDRICO	49
FIGURA 25 — EVOLUÇÃO DO SELAMENTO DE FISSURAS	50

FIGURA 26 — EVIDÊNCIA DO SELAMENTO DE FISSURAS.....	51
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 — VIDA ÚTIL DE PROJETO MÍNIMA A SER ESTABELECIDADA PELO PROJETISTA.....	17
TABELA 2—INCIDÊNCIAS DE PROBLEMAS SEGMENTADAS CONFORME A ORIGEM PRINCIPAL, EM PESQUISA DESENVOLVIDA EM PAÍSES EUROPEUS	20
TABELA 3—EXIGÊNCIAS DE DURABILIDADE RELACIONADAS À FISSURAÇÃO E À PROTEÇÃO DA ARMADURA, EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL.....	27
TABELA 4—APLICAÇÃO DE VÁRIAS BACTÉRIAS EM ÁREAS DA CONSTRUÇÃO	29
TABELA 5 — TRAÇO COM ADITIVO	36
TABELA 6 — TRAÇO SEM ADITIVO	36
TABELA 7 — PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DOS CORPOS DE PROVA.....	38
TABELA 8 — PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DOS CORPOS DE PROVAS CILÍNDRICOS	41
TABELA 9— TENSÃO MÁXIMA DE RUPTURA COM 7 DIAS DE CURA.....	44
TABELA 10 — TENSÃO MÁXIMA DE RUPTURA COM 28 DIAS DE CURA (CARGA P)	45
TABELA 11 — RESULTADOS OBTIDOS APÓS ROMPIMENTO	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO	14
3	REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1	CONCRETO	15
3.2	DURABILIDADE	15
3.3	VIDA ÚTIL	16
3.4	DESEMPENHO	17
3.5	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	18
3.5.1	Sintomas	18
3.5.2	Mecanismo	19
3.5.3	Origem	19
3.5.4	Causas	20
3.5.5	Terapia	20
3.5.6	Relação entre patologia e economia	21
3.5.7	Relação entre patologia e sustentabilidade	22
3.6	FISSURAÇÃO	23
3.6.1	Tipos de fissuras	23
3.6.2	Fissuração – limites estabelecidos por norma	26
3.7	CONCRETO AUTOCICATRIZANTE	27
3.7.1	Cicatrização microbiana	28
3.7.2	Catalisador cristalino como agente cicatrizante	29
3.7.3	Áreas de Aplicação	32
3.8	REPAROS CONVENCIONAIS	33
3.8.1	Técnica de Injeção de Fissuras	34
3.8.2	Técnica de Selagem de Fissuras	34

3.8.3	Grampeamento	34
3.9	BENEFÍCIOS DA UTILIZAÇÃO DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ADITIVO CRISTALIZANTE	34
4	METODOLOGIA.....	36
4.1	TRAÇO DO CONCRETO.....	36
4.2	MÉTODOS E ENSAIOS	36
4.2.1	Análise quanto ao incremento de resistência – corpos de prova cilíndricos	37
4.2.2	Análise quanto ao selamento de fissuras - corpos de prova prismáticos	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	INCREMENTO DE RESISTÊNCIA	44
5.2	SELAMENTO DE FISSURAS	50
6	CONCLUSÕES.....	52
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais construtivos mais utilizados em construções no mundo. Segundo Pedroso (2009) este material é largamente empregado, pois assemelha-se a uma pedra artificial que se molda à inventividade construtiva do homem. Além disso, é um material de baixo custo, que apresenta propriedades versáteis e grande durabilidade.

O concreto está sujeito ao aparecimento de anomalias, que são defeitos ou problemas que podem causar alterações na funcionalidade do projeto. Uma das manifestações patológicas mais comuns é a fissuração, que pode ocorrer devido a inúmeras causas: deficiência de projeto, contração plástica, perda de aderência, movimentação de escoramento e/ou formas, retração, deficiências de execução, reações expansivas, corrosão das armaduras, recalques diferenciais, variações de temperatura e ações aplicadas (SOUZA e RIPPER, 1998).

É válido ressaltar que caracterizar as fissuras como defeito estrutural, depende da origem, intensidade e magnitude do quadro existente, uma vez que o concreto tem baixa resistência à tração e fissurará por natureza, sempre que as tensões de tração superarem a sua resistência última à esse tipo de esforço (SOUZA e RIPPER, 1998).

Em alguns casos a presença de fissura pode comprometer a durabilidade e a resistência da estrutura, aumentando a permeabilidade e a vulnerabilidade a agentes agressivos.

Quando da verificação de um problema patológico na estrutura, faz-se necessária a adoção de métodos para recuperação ou reforço.

A fim de evitar a necessidade de grandes reparos, foi desenvolvido o concreto auto cicatrizante. Os primeiros estudos de propriedades autocicatrizantes nos materiais à base de cimento foram registrados em 1990, desde então, o desenvolvimento do concreto com capacidade de se auto regenerar têm sido objeto de pesquisa (TAKAGI, 2013).

Algumas abordagens estão sendo exploradas para o desenvolvimento do concreto autocicatrizante, dentre elas: utilização de bactérias para remediação de fissuras (JONKERS, 2011) e a utilização de aditivos de cristalização integral. O último será objeto de estudo do presente trabalho, pois nota-se a necessidade de avançar nos estudos de novas metodologias

que ajudem a preencher a lacuna a respeito da metodologia de ensaios que demonstrem o comportamento dos materiais cimentícios com capacidade autocicatrizante.

2 OBJETIVO

Desenvolvimento de metodologia de ensaio para análise do incremento de resistência à compressão e selamento de fissuras através da comparação de corpos de prova de concreto de mesma composição, com e sem aditivo cristalizante, ambos em contato com água.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste item serão apresentadas referências relevantes ao tema concreto autocicatrizante. Serão apresentadas definições sobre durabilidade e desempenho, patologias nas edificações, fissurações e por último o conceito do concreto autocicatrizante.

3.1 CONCRETO

Concreto, no sentido mais abrangente, é qualquer produto produzido a partir do uso de um meio cimentante, via de regra esse meio é o produto da reação entre um cimento hidráulico e água. É um material constituído por cimento, agregados graúdos e miúdos, água, adições minerais e aditivos químicos (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Um dos principais motivos para o largo emprego do concreto é a sua constituição como material cerâmico, cuja sua matéria prima existe em praticamente todos os lugares do mundo. As grandes vantagens desse material o tornam o carro-chefe da construção civil, adaptando-se a todos os locais e circunstâncias em vista de suas propriedades, como versatilidade, durabilidade e desempenho, que proporcionam vida útil adequada às construções a um custo competitivo com outros materiais estruturais (ISAIA, 2011).

Um material de construção pode ser considerado bom quando apresenta duas características básicas: resistência e durabilidade. A pedra natural tem resistência à compressão e durabilidade muito elevadas, entretanto, tem baixa resistência à tração. O aço, por sua vez, tem resistências elevadas, mas requer proteção contra a corrosão. Pode-se dizer que o concreto armado pode ter surgido da necessidade de unir as qualidades da pedra (resistência à compressão e durabilidade) com as do aço (resistências mecânicas), com as vantagens de poder assumir qualquer forma, com rapidez e facilidade, e proporcionar a necessária proteção do aço contra a corrosão (BASTOS, 2006).

3.2 DURABILIDADE

O conceito de durabilidade, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), está vinculado à capacidade de a estrutura resistir a fatores ambientais previstos e definidos pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no princípio da elaboração do projeto. Além disso, prescreve que as estruturas devem atender requisitos de qualidade, com base em normas técnicas, de modo a conservar sua

capacidade resistente, sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

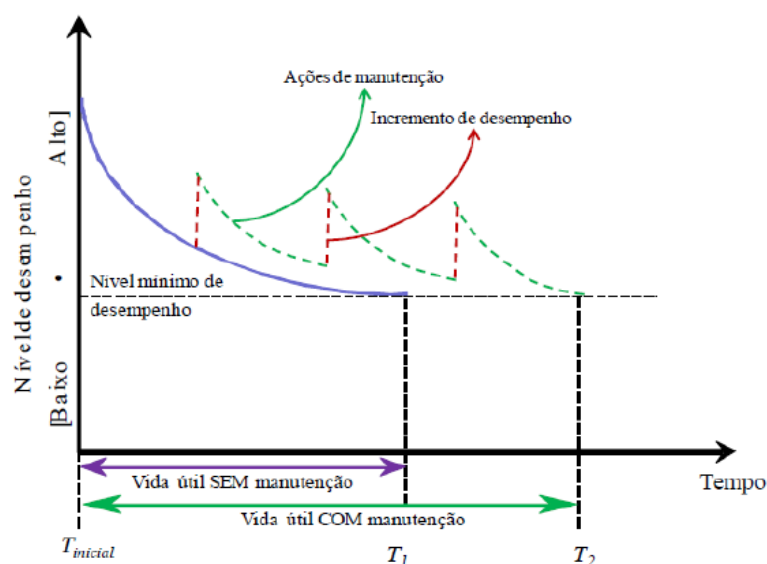
Para a ISSO 13823 (ISO, 2008) durabilidade é a capacidade de uma estrutura ou dos componentes da estrutura, cumprirem com os requisitos de desempenho estabelecidos em projeto, considerando a necessidade de manutenções planejadas, por um período estipulado de tempo.

3.3 VIDA ÚTIL

Compreende-se como vida útil de projeto o período de tempo durante o qual as características das estruturas de concreto são conservadas. O conceito aplica-se ao todo e às partes da estrutura (ABNT, 2014).

A vida útil refere-se ao período de tempo que abrange desde o início da operação e uso de uma edificação até a fase em que o seu desempenho deixa de atender as exigências de projeto, sendo diretamente influenciada pelas atividades de manutenção e reparo e pelo ambiente de exposição (POSSAN e DEMOLINER, 2013).

FIGURA 1— DESEMPENHO COM E SEM MANUTENÇÃO



FONTE: (POSSAN e DEMOLINER, 2013).

Na FIGURA 1 observa-se que o aumento do nível de desempenho da estrutura sofre influência direta das ações de manutenção, fato este que garante o prolongamento da vida útil de projeto.

O projeto deve especificar o valor teórico para a Vida Útil de Projeto (VUP) para cada um dos sistemas que o compõem, não permitindo que estes sejam inferiores aos estabelecidos pela NBR 15575 (ABNT, 2013):

TABELA 1 — VIDA ÚTIL DE PROJETO MÍNIMA A SER ESTABELECIDADA PELO PROJETISTA

Sistema	VUP mínima em anos
Estrutura	segundo ABNT NBR 8681-2003
Pisos internos	≥13
Vedação vertical externa	≥40
Vedação vertical interna	≥20
Cobertura	≥20
Hidrossanitário	≥20
* Considerando periodicidade e processos de manutenção especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à ABNT NBR 5674.	

FONTE: (ABNT, 2013).

Ainda para a NBR 15575 (ABNT, 2013), para atingir a VUP mínima faz-se necessário o atendimento, de forma concomitante, dos cinco aspectos abaixo descritos:

- a) emprego de componentes e materiais de qualidade compatível com a VUP;
- b) execução com técnicas e métodos que possibilitem a obtenção da VUP;
- c) cumprimento em sua totalidade dos programas de manutenção corretiva e preventiva;
- d) atendimento aos cuidados preestabelecidos para se fazer um uso correto do edifício;
- e) utilização do edifício em concordância ao que foi previsto em projeto.

3.4 DESEMPENHO

O desempenho é caracterizado como o comportamento em serviço de cada produto ao longo de sua vida útil e este, depende do resultado das etapas de projeto, construção e manutenção. É válido ressaltar que uma estrutura com desempenho insatisfatório não está necessariamente condenada, esta ocasião demanda intervenção técnica imediata com a finalidade de reabilitação (SOUZA e RIPPER, 1998).

O desempenho também pode ser caracterizado como o comportamento em uso. Para as edificações, está associado às condições mínimas de habitabilidade necessárias para que um ou mais indivíduos possam utilizar a edificação durante um período de tempo (POSSAN e DEMOLINER, 2013).

3.5 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

O termo Patologia, cujo sentido é “estudo das doenças”, deriva do grego pathos, que significa doença, e logos, que significa estudo.

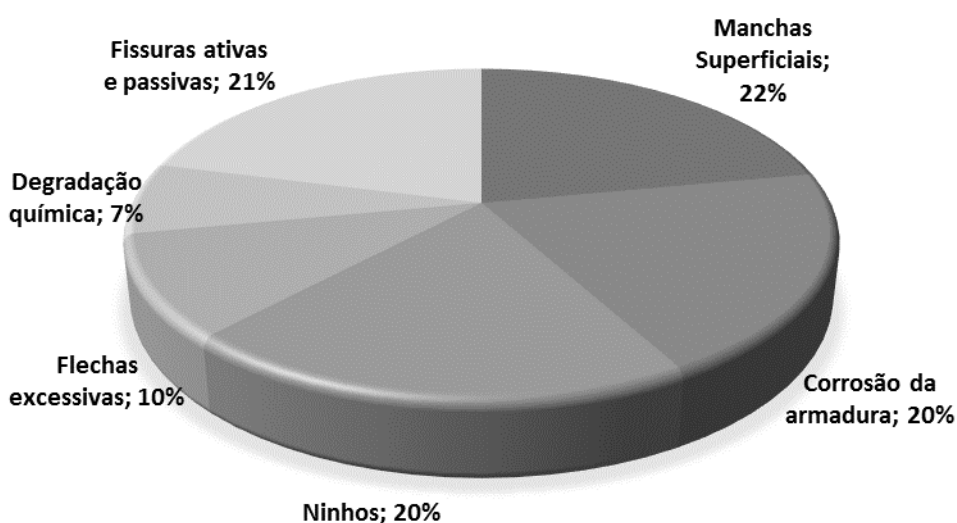
Entende-se como patologia a parte da engenharia especializada no estudo dos sintomas, dos mecanismos, das causas e das origens dos defeitos da construção civil. Refere-se ao estudo das partes que compõe o diagnóstico do problema (HELENE, 1992).

A aplicação do termo, em especial para as estruturas em concreto, tem origem no tratamento de problemas com a finalidade de reabilitação (ISAIA, 2011).

3.5.1 SINTOMAS

Os problemas patológicos, com algumas exceções, apresentam sintomas. Esta terminologia refere-se as manifestações externas pelas quais é possível relacionar a natureza da patologia, sua origem e os mecanismos dos fenômenos envolvidos, possibilitando um primeiro diagnóstico. A distribuição relativa das incidências de manifestações patológicas mais comuns é apresenta da na FIGURA 2 (HELENE, 1992).

FIGURA 2—DISTRIBUIÇÃO RELATIVA DAS INCIDÊNCIAS DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO APARENTE.



FONTE: (HELENE, 1992).

3.5.2 MECANISMO

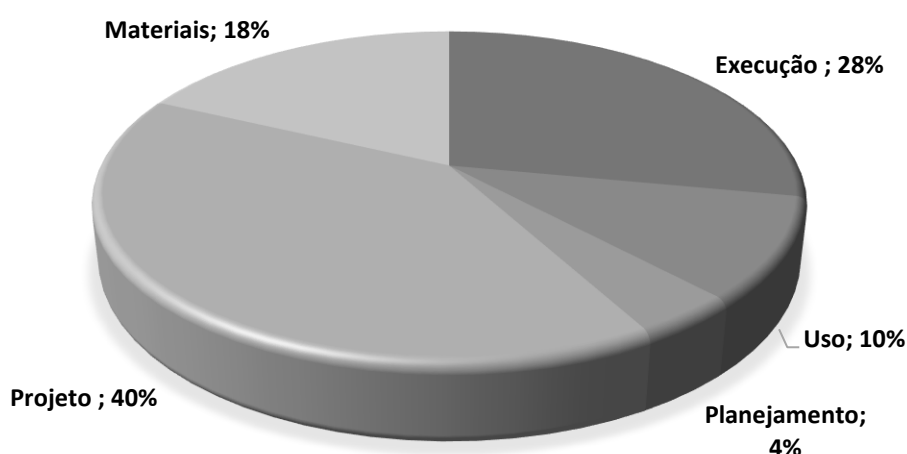
Os problemas patológicos ocorrem partindo de um mecanismo. Ter conhecimento sobre este processo é fundamental para um tratamento adequado. Por exemplo, é imprescindível saber que as sobrecargas devem ser limitadas ou as vigas devem ser reforçadas quando a ocorrência de fissuras provém de um momento fletor, neste caso não seria suficiente a injeção das fissuras, pois as mesmas reapareceriam em locais próximos das iniciais (HELENE, 1992).

3.5.3 ORIGEM

As patologias podem ocorrer tanto nas fases de construção como durante o período de uso. Por este motivo, é muito importante identificar em qual fase do processo construtivo foram criadas condições que favoreceram o aparecimento e desenvolvimento das mesmas (ISAIA, 2011).

Uma elevada percentagem das manifestações patológicas é oriunda das etapas de planeamento ou de projeto e são mais graves do que falhas referentes a qualidade do material ou má execução (HELENE, 1992).

FIGURA 3—ORIGEM DOS PROBLEMAS COM RELAÇÃO ÀS ETAPAS DE PRODUÇÃO DAS OBRAS CIVIS



FONTE: (HELENE, 1992).

TABELA 2—INCIDÊNCIAS DE PROBLEMAS SEGMENTADAS CONFORME A ORIGEM PRINCIPAL, EM PESQUISA DESENVOLVIDA EM PAÍSES EUROPEUS

FASE	ALEMANHA	BÉLGICA	DINAMARCA	ROMÊNIA
PROJETO	40,1%	49,0%	36,6%	34,0%
MATERIAIS	29,3%	22,0%	22,2%	24,2%
EXECUÇÃO	14,5%	15,0%	25,0%	21,6%
USO	9,0%	9,0%	8,7%	12,2%
OUTRO	7,1%	5,0%	7,5%	8,0%

FONTE: (HELENE, 1992).

3.5.4 CAUSAS

Os agentes causadores das manifestações patológicas podem ser: cargas, variações de umidade, variações térmicas (intrínsecas e extrínsecas), agentes biológicos e atmosféricos, incompatibilidade de materiais, entre outros. A cada causa compete uma terapia mais adequada e mais duradoura (HELENE, 1992).

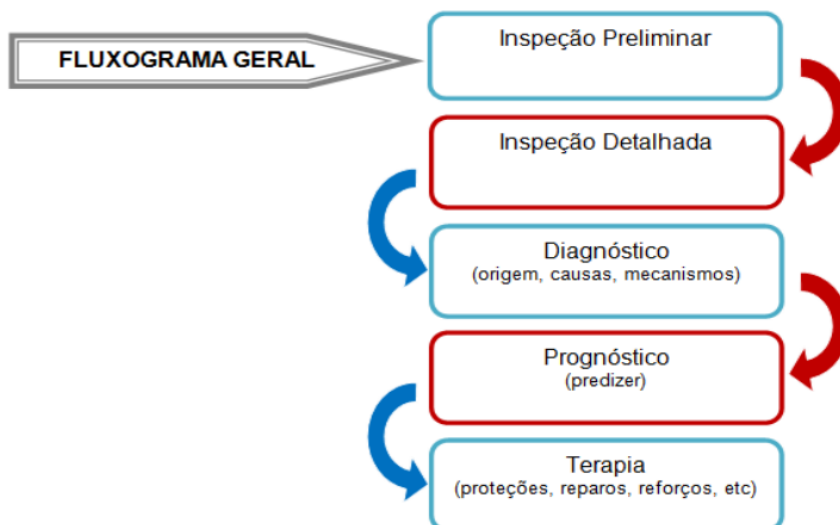
3.5.5 TERAPIA

Terapia relaciona-se com o estudo de métodos de correção e solução dos problemas patológicos, está diretamente relacionada a um estudo precedente bem conduzido e a um diagnóstico adequado (HELENE, 1992).

Após a conclusão da fase de diagnóstico e prognóstico, é necessário definir as possíveis intervenções ao problema. Essas intervenções podem ser concluídas sob três diferentes aspectos: reparo (consiste em corrigir pequenos danos da estrutura), recuperação (visa devolver a estrutura o desempenho original perdido) e reforço (tem por finalidade aumentar o desempenho da estrutura) (VIERIRA, 2016).

Sendo assim, na FIGURA 4 abaixo tem-se uma visão expandida dos passos a serem realizados para interpretar e analisar a incidência de problemas patológicos nas edificações:

FIGURA 4—FLUXOGRAMA DOS PASSOS PARA INTERPRETAR E ANALISAR PATOLOGIAS NAS EDIFICAÇÕES



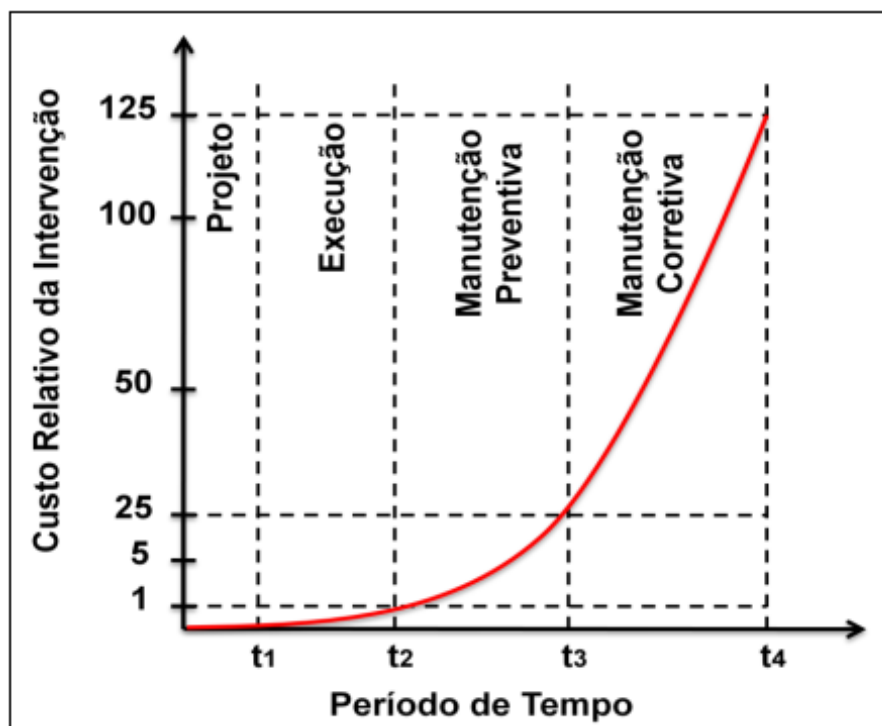
FONTE:(TUTIKIAN e PACHECO, 2013).

3.5.6 RELAÇÃO ENTRE PATOLOGIA E ECONOMIA

A norma NBR 5674 (ABNT, 2012), que regulamenta a manutenção de edificações, considera manutenção como sendo o conjunto de atividades necessárias a serem realizadas com a finalidade de conservar ou recuperar a capacidade funcional da edificação e de suas partes constituintes de atender as necessidades e segurança dos seus usuários. O escopo da norma visa preservar ou recuperar as condições ambientais adequadas ao uso previsto para as edificações.

No entanto, se os elementos deficientes geradores de manutenção e as intervenções preventivas necessárias ao longo da vida útil da edificação fossem antevistos na etapa de projeto, os custos com manutenção poderiam ser minimizados, conforme demonstra a Lei de Sitter, ilustrada na FIGURA 5 (HELENE, 1992):

FIGURA 5—EVOLUÇÃO DOS CUSTOS RELATIVOS DE INTERVENÇÃO AO LONGO DO TEMPO



FONTE: (HELENE, 1992).

Com base na FIGURA 5 que interpreta a evolução dos custos de manutenção é possível afirmar que as correções seriam mais duráveis, efetivas e com custos mais baixos quanto antes fossem executadas (HELENE, 1992).

A lei de Sitter esclarece que adiar uma intervenção significa aumentar os custos diretos em progressão geométrica de razão cinco.

Os custos aplicados em recuperação e reabilitação de estruturas são consideráveis, alcançando cerca de 40% dos recursos aplicados na área de construção (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

3.5.7 RELAÇÃO ENTRE PATOLOGIA E SUSTENTABILIDADE

As patologias demandam intervenções com finalidade de reabilitação da estabilidade e segurança das estruturas. Estas intervenções promovem o dispêndio de mão-de obra, materiais e equipamentos, além da produção de insumos que necessitam de energia para transformação das matérias-primas em cimento e aço, o que envolve a exploração de jazidas naturais de rochas e areias para fabricação de agregados e o consumo de água. Com o crescente consumo de

materiais aplicados a retrabalhos de correções de defeitos em obras há uma contribuição negativa para as questões relacionadas a sustentabilidade (ISAIA, 2011).

3.6 FISSURAÇÃO

Fissuras são consideradas manifestações características de estruturas de concreto, sendo este o dano de ocorrência mais frequente e que mais chama a atenção de leigos. É válido ressaltar que caracterizar a fissuração como uma deficiência estrutural depende de fatores como intensidade, origem e magnitude da ocorrência, uma vez que o concreto tende a fissurar naturalmente em alguns casos (SOUZA e RIPPER, 1998).

A fissuração é uma manifestação patológica que acomete estruturas quando tensões de tração superam a capacidade resistente do concreto (ISAIA, 2011).

As fissuras no concreto podem ocorrer no estado plástico ou em início de endurecimento e no estado endurecido, sendo listadas abaixo as ações mais comuns causadoras de fissuração (ISAIA, 2011):

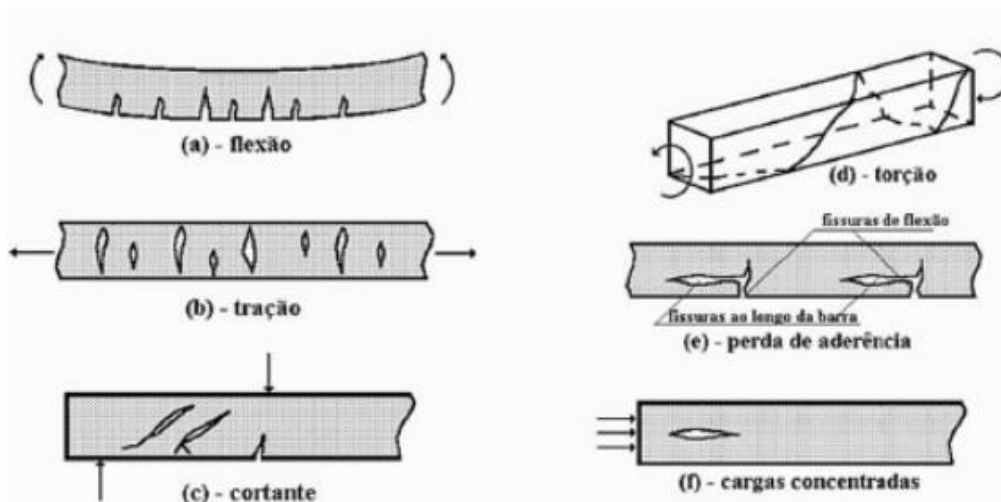
- Assentamento dos componentes em concretos plásticos;
- Retração de volume por perda de água de amassamento através de evaporação;
- Cargas atuantes excessivas;
- Concentrações de esforços devido a falhas de execução;
- Recalques diferenciais das fundações;
- Variações da temperatura;
- Expansão do concreto devido à reatividade dos componentes;
- Corrosão das armaduras internas do concreto armado;
- Ação do fogo nas estruturas.

3.6.1 TIPOS DE FISSURAS

A configuração das fissuras pode variar em função das causas motivadoras do seu surgimento (SOUZA e RIPPER, 1998):

- a) Deficiências de Projeto – As falhas que ocorrem em projetos estruturais poder ser diversas, resultando em fissuras de configuração própria em função do tipo de esforço:

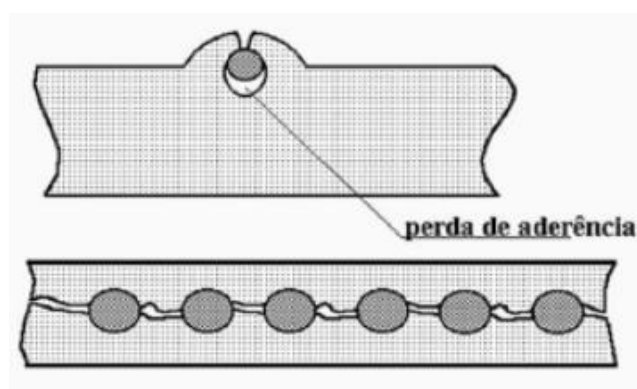
FIGURA 6— FISSURAÇÕES EM FUNÇÃO DO TIPO DE SOLICITAÇÃO PREDOMINANTE



FONTE: (SOUZA e RIPPER, 1998)

- b) Contração Plástica do Concreto – Ocorre antes do início da pega do concreto. Relaciona-se a rápida perda de água por evaporação e, como consequência, à contração irreversível da pasta de concreto.
- c) Assentamento do Concreto / Perda de Aderência das barras da Armadura – Ocorre quando o movimento da massa de concreto é impossibilitado devido à presença de fôrmas ou de barras da armadura.

FIGURA 7 — FORMAÇÃO DE FISSURA POR ASSENTAMENTO PLÁSTICO

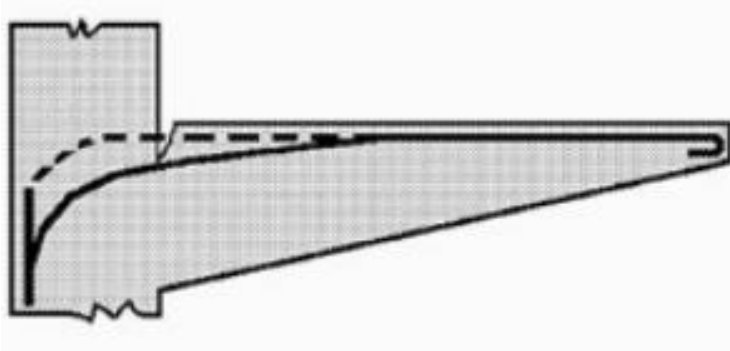


FONTE: (SOUZA e RIPPER, 1998)

- d) Movimentação de Fôrmas e Escoramentos - Pode-se relacionar com uma deformação acentuada da peça que gera alterações em sua geometria e consequente perda de resistência ou com a deformação das fôrmas que mal posicionadas permitem a criação de juntas de concretagem não previstas.

- e) Retração do concreto – Relaciona-se ao movimento natural da massa que é contrariada pela presença de obstáculos internos e externos.
- f) Deficiências de Execução – Bastante semelhante aos casos de fissuração por deficiência de projeto, porém ocasionados por falta de cuidado, por incompetência, entre outros.

FIGURA 8 — FISSURA OCASIONADA PELO DESLOCAMENTO DE ARMADURA



FONTE: (SOUZA e RIPPER, 1998)

- g) Reações Expansivas – Fissuras podem ser geradas pelas reações álcalis-agregado que são um processo químico onde alguns constituintes mineralógicos do agregado reagem com hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, etc.). Esta reação é favorecida pelas temperaturas e umidades altas e pelo fator a/c elevado.
- h) Corrosão das Armaduras – Ocorre em casos de cobrimentos insuficientes ou de concretos mal adensados. As armaduras ficam sujeitas à presença de água e de agentes prejudiciais, desencadeando o processo de corrosão de armaduras, que tende a abranger toda a sua extensão.
- i) Recalques Diferenciais – Neste caso, as fissurações são ocasionadas por incorreções na interação entre o solo e a estrutura e podem ocorrer tanto nas etapas de projeto, execução e utilização.

FIGURA 9 — RECALQUE DIFERENCIAL DOS APOIOS GERA FISSURAÇÃO



FONTE: (SOUZA e RIPPER, 1998)

- j) Variação da Temperatura – As fissurações são geradas por contração e dilatação térmica, pois, em ambos os casos, criam-se tensões superiores à capacidade resistente ou de deformação das peças.
- k) Ações Aplicadas – Fissuras podem ser provenientes de ações aplicadas, como choques de veículos ou cargas de vigas e pilares.

3.6.2 FISSURAÇÃO – LIMITES ESTABELECIDOS POR NORMA

Na TABELA 3, retirada da NBR 6118 (ABNT, 2014), são dados os valores-limites da abertura característica w_k das fissuras com a finalidade de garantir a proteção adequada das armaduras quanto à corrosão em função da classe de agressividade ambiental. Embora as estimativas de abertura de fissuras devam respeitar esses limites, não há garantias de que as aberturas de fissuras reais correspondam estritamente aos valores estimados, isto é, fissuras reais podem eventualmente ultrapassar esses limites.

TABELA 3—EXIGÊNCIAS DE DURABILIDADE RELACIONADAS À FISSURAÇÃO E À PROTEÇÃO DA ARMADURA, EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	—
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação frequente

^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm (Figura 3.1).

NOTAS

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

FONTE: (ABNT, 2014)

3.7 CONCRETO AUTOCICATRIZANTE

A formação de microfissuras no concreto é um fenômeno que raramente pode ser evitado. Pequenas trincas dificilmente afetam a integridade da estrutura de forma direta, porém contribuem para uma maior porosidade e permeabilidade do material, causando danos capazes de afetar sua resistência. A fim de evitar grandes reparos e minimizar as manifestações patológicas, há a necessidade do desenvolvimento de mecanismos alternativos, mais sustentáveis e econômicos, como o Concreto Autocicatrizante.

A autocicatrização pode ser definida como sendo a capacidade de o material reparar ou curar seus danos de forma autônoma (ZWAAG, 2007).

Os autocicatrizantes são materiais que se encaixam na categoria de estruturas inteligentes, pois contêm agentes de cura que são encapsulados e liberados quando ocorre a fissura, prolongando a vida útil do material (GHOSH, 2008).

A autocicatrização em materiais cimentícios divide-se em dois grupos: autocicatrização autógena (autocicatrização intrínseca) e autocicatrização autônoma (baseada em cápsulas e autocicatrização vascular) (BLAISZIK e KRAMER, 2012).

A cicatrização autógena utiliza de componentes que já pertencem a composição do concreto, como o cimento não hidratado, adições pozolânicas e outros químicos, porém permanecerá sempre com eficácia limitada a pequenas fissuras estáticas (TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

No processo de cicatrização autônoma, são utilizados materiais não convencionais específicos, como silicato de cálcio, agentes expansivos e bactérias, que, em função de suas propriedades, potencializam a capacidade de autocicatrização do concreto (WU, JOHANNESSON e GEIKER, 2011).

Existem duas metodologias mais conhecidas para o desenvolvimento do Concreto autocicatrizante, utilizando o processo de cicatrização autônoma: cicatrização microbiana e cicatrização por catalisador cristalino.

3.7.1 CICATRIZAÇÃO MICROBIANA

As bactérias são organismos unicelulares relativamente simples que podem ser utilizados na autocura do concreto, pois agem como um catalisador que tem a capacidade de precipitar carbonato de cálcio na presença de qualquer fonte de carbonato. Para isto, as bactérias devem estar aptas para realizar a selagem efetiva das fissuras a longo prazo (ADAK, 2015; JONKERS, 2011).

Os micro-organismos utilizados são não patogênicos e não nocivos ao meio ambiente. A aplicação de algumas bactérias vem sendo amplamente utilizada em várias áreas da construção por diferentes autores, conforme a TABELA 4 (VEKARIYA e PITRODA, 2013):

TABELA 4—APLICAÇÃO DE VÁRIAS BACTÉRIAS EM ÁREAS DA CONSTRUÇÃO

Aplicação	Organismo	Referência
Argamassa de cimento e concreto	<i>Bacillus cereus</i>	Le Metayer-Leverel et al (1999)
	<i>Bacillus</i> sp. CT-5	Achal et al, 2011
	<i>Bacillus pasteurii</i>	Ramachandran et al (2001)
	<i>Shewanella</i>	Ghosh et al (2005)
	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Achal et al (2011)
Remediação de fissuras em concreto	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Bang et al (2001)
	<i>Bacillus pasteurii</i>	Ramachandran et al (2001)
	<i>Bacillus pasteurii</i>	Ramakrishnan (2007)
	<i>Bacillus sphaericus</i>	De Belie et al (2008)
	<i>Bacillus sphaericus</i>	D Muynck et al (2008)
Autocicatrização	<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Jonkers et al (2007)
	<i>Bacillus cohnii</i>	Jonkers et al (2007)

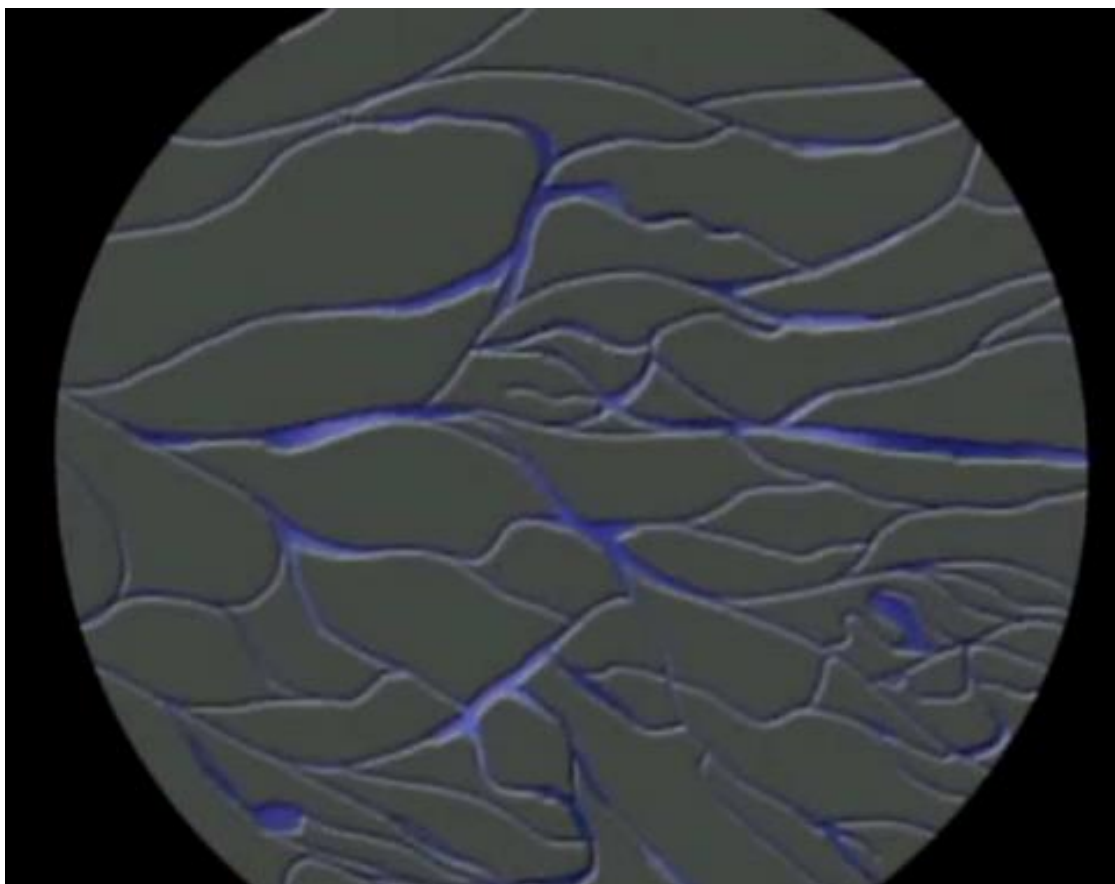
FONTE: (VEKARIYA e PITRODA, 2013).

3.7.2 CATALISADOR CRISTALINO COMO AGENTE CICATRIZANTE

Uma mistura de componentes ativos em pó que reagem com a umidade do concreto para catalisar uma estrutura cristalina insolúvel. Os milhões de cristais formados penetram profundamente no concreto, selando os poros, capilares e fissuras de retração da penetração de água (CASAL, 2017).

Uma matriz convencional do concreto tem uma infinidade de microfissuras, poros e capilares através dos quais a água penetra. A água percola pelos capilares e microfissuras do concreto, conforme FIGURA 10. Os poros têm tipicamente larguras entre 0,1 a 0,4mm (CASAL, 2017).

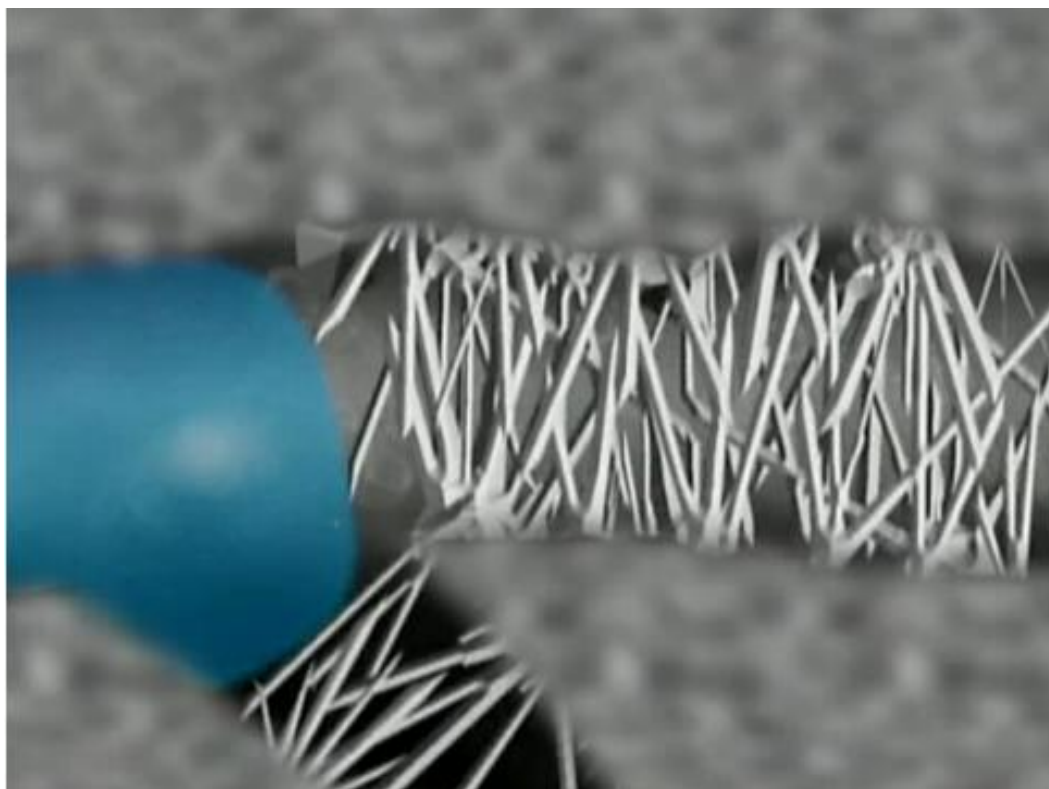
FIGURA 10—ÁGUA PERCOLA PELOS CAPILARES



FONTE: (CASAL, 2017).

Os aditivos cristalizantes reagem com a água, hidróxido de cálcio e alumínio como também com vários outros óxidos metálicos e sais presentes no concreto. De forma simplificada, quando o cristalizante é adicionado ao concreto as substâncias ativas reagem com a umidade do concreto fresco e com os subprodutos da reação de hidratação do cimento, causando uma reação catalítica. Esta reação gera uma formação cristalina insolúvel nos poros e capilaridades do concreto, a água é incapaz de passar através dessa formação cristalina e como resultado o concreto se torna menos permeável e também protegido contra a deterioração mesmo em condições ambientais severas, conforme pode ser visto na FIGURA 11 e FIGURA 12. Se novas fissuras estáticas surgirem durante a vida do concreto, os cristais se desenvolverão ao longo das mesmas, selando os caminhos de percolação da água (MC-BAUCHEMIE, 2018; CASAL, 2017).

FIGURA 11— SELAGEM DE MICROFISSURAS



FONTE: (CASAL, 2017).

FIGURA 12—CRISTAIS AO LONGO DA FISSURA



FONTE: (OURIVES, 2009).

Devido ao fato da água e dos contaminantes transportados por ela penetrarem o concreto principalmente por meio de absorção capilar e pressão hidrostática, combater este problema demanda uma solução “a nível molecular”. A formulação do concreto autocicatrizante considera o empacotamento granulométrico dos agregados, a baixa permeabilidade e a

propriedade de autocura com objetivo de dificultar a penetração de agentes agressivos e assim conferir maior durabilidade ao concreto (OURIVES, 2009).

3.7.3 ÁREAS DE APLICAÇÃO

As áreas de aplicação mais comuns são estruturas em contato com água e que apresentem fissuras estáticas, como caixas d'água, cisternas, fundações em contato com água ou solos agressivos, construções em áreas litorâneas, estações de tratamento de água e esgoto, estações de metrô, lajes de subpressão, parede diafragma, lajes de cobertura, entre outros (ENGEMIX, 2018).

O concreto autocicatrizante foi aplicado nas lajes de fundo das estações Praça Nossa Senhora da Paz, Jardim de Alá e Antero de Quental, da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro e na laje do Museu da Imagem e do Som (MIS), conforme FIGURA 13 e FIGURA 14 (VOTORANTIM CIMENTOS, 2017).

FIGURA 13— ESTAÇÃO DE METRÔ – LINHA 4 (RJ)



FONTE: (VOTORANTIM CIMENTOS, 2017)

FIGURA 14 — MUSEU DA IMAGEM E DO SOM



FONTE: (ITAMBÉ, 2016)

Na FIGURA 15 há um exemplo de utilização do concreto autocicatrizante em um reservatório de água, a primeira imagem retrata o período após o enchimento do tanque e a segunda 14 dias após o início da selagem das fissuras:

FIGURA 15 — RESERVATÓRIO CONSTRUÍDO COM CONCRETO AUTOCICATRIZANTE



FONTE: (CASAL, 2017).

3.8 REPAROS CONVENCIONAIS

O reparo de estruturas fissuradas está diretamente associado à identificação da causa da fissuração, visando com o tratamento criar uma barreira ao transporte de agentes nocivos, como

líquidos e gases, para dentro das fissuras, impedindo a contaminação do concreto e das armaduras (SOUZA e RIPPER, 1998).

3.8.1 TÉCNICA DE INJEÇÃO DE FISSURAS

Injeção é a técnica que garante o perfeito enchimento do espaço formado entre as bordas de uma fenda. Para restabelecer fendas passivas são injetados materiais rígidos, como epóxi ou grouts, já para a vedação de fendas ativas são injetadas resinas acrílicas ou poliuretânicas (SOUZA e RIPPER, 1998).

3.8.2 TÉCNICA DE SELAGEM DE FISSURAS

Técnica de vedação dos bordos das fissuras ativas pela utilização de um material aderente, resistente mecânica e quimicamente, não retrátil e com módulo de elasticidade suficiente para adaptar-se à deformação da fenda (SOUZA e RIPPER, 1998).

3.8.3 GRAMPEAMENTO

O sistema de reforço por grampeamento consiste na colocação de grampos de aço que atuam como pontes entre as duas partes do concreto que foram divididas pela fissura. As garras dos grampos se introduzem em furos feitos previamente preenchendo-se os vazios existentes entre as garras e os furos por meio de uma resina epóxi ou com argamassas isentas de retração (CÁNOVAS, 1988).

3.9 BENEFÍCIOS DA UTILIZAÇÃO DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ADITIVO CRISTALIZANTE

As principais vantagens dos aditivos cristalizantes são: menor permeabilidade, alta resistência a pressões hidrostáticas positivas e negativas, selamento de microfissuras estáticas de até 0,4mm, resistência a ataques químicos (principalmente de cloretos), aumento da durabilidade da estrutura, redução de etapas de impermeabilização da obra e incremento de resistência a compressão (ENGEMIX, 2018).

Estima-se que o custo do concreto autocicatrizante possa aumentar consideravelmente o orçamento final uma construção, dado que o custo deste concreto é 30% maior que o custo do

convencional. Mas, se for comparado com a quantidade de manutenções necessárias em peças moldadas com o material tradicional, pode-se dizer que a escolha é mais vantajosa. Além disso, outra vantagem do material é a durabilidade. Ele dura cerca de 20 a 30 anos mais do que o concreto tradicional, assim, o custo inicial acaba sendo diluído pela baixa necessidade de manutenção (VOTORANTIM CIMENTOS, 2017).

A capacidade de autocura que este concreto possui facilita a manutenção de estruturas enterradas ou em áreas de difícil acesso. A vedação das fissuras traz diversos benefícios, em termos ambientais, estéticos e térmicos a uma construção a título de arquitetura sustentável (VOTORANTIM CIMENTOS, 2017).

4 METODOLOGIA

Os materiais utilizados para o desenvolvimento dos ensaios foram: cimento CP II E 40, areia média, areia de brita, brita tipo 0 e tipo 1, fibra de aço de 0,5mm, aditivo cristalizante de impermeabilização, proteção e melhoria da qualidade do concreto e aditivo hiperplastificante redutor de água de alta performance para concreto.

4.1 TRAÇO DO CONCRETO

Foi elaborado um traço de concreto pelo método do Ibracon com resistência a compressão característica de 40 MPa, ao qual foi adicionado aditivo cristalizante.

TABELA 5 — TRAÇO COM ADITIVO

Traço unitário em massa (materiais secos)							
CP II E 40	Areia Média	Areia de Brita	Brita 0	Brita 1	Hiperplastificante	Cristalizante	a/c
1,000	1,131	1,086	0,906	2,106	0,006	0,010	0,500

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

TABELA 6 — TRAÇO SEM ADITIVO

Traço unitário em massa (materiais secos)						
CP II E 40	Areia Média	Areia de Brita	Brita 0	Brita 1	Hiperplastificante	a/c
1,000	1,131	1,086	0,906	2,106	0,006	0,500

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Para os ensaios com corpos de provas prismáticos, foram adicionados 50kg de fibra de aço de 0,55mm por m³ de concreto.

4.2 MÉTODOS E ENSAIOS

Foram realizados dois ensaios para verificação do comportamento do concreto autocicatrizante em contato com a água, o primeiro utilizando corpos de provas cilíndricos com a finalidade de analisar o incremento de resistência no concreto fissurado ao longo do tempo e o segundo utilizando corpos de provas prismáticos a fim de comprovar o selamento das fissuras.

É válido ressaltar que para o experimento de verificação de incremento de resistência foi desenvolvida uma metodologia baseada em ensaios normatizados, já a experiência de análise do selamento de fissuras utilizou métodos totalmente desenvolvidos pelo grupo.

4.2.1 ANÁLISE QUANTO AO INCREMENTO DE RESISTÊNCIA – CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

No primeiro experimento foram moldados 84 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10x15cm, sendo 42 deles com aditivo cristalizante XYPEX¹ e os outros 42 sem aditivo cristalizante.

Após 7 dias de cura em câmara úmida (ABNT, 2006), 6 corpos de provas (3 com aditivo e 3 sem aditivo) foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2007).

Após 28 dias de cura em câmara úmida (ABNT, 2006), foram rompidos outros 6 corpos de provas conforme a (ABNT, 2007) (3 com aditivo e 3 sem aditivo) visando a determinação de sua carga máxima de ruptura (P). Em seguida, foram fissurados 36 corpos de provas (18 com aditivo e 18 sem aditivo) aplicando uma carga equivalente a 0,65P e outros 36 corpos de provas (18 com aditivo e 18 sem aditivo) aplicando uma carga equivalente a 0,80P.

Após a fissuração, os corpos de prova foram mantidos submersos em água.

Após 14 dias, 12 corpos de provas (3 de 0,65P com aditivo, 3 de 0,65P sem aditivo, 3 de 0,80P com aditivo, 3 de 0,80P sem aditivo) foram rompidos para determinação de sua carga de ruptura. O processo foi repetido para 21, 28 e 35 dias.

Dos 84 corpos de prova moldados, 24 foram utilizados para testes e não foram considerados nos resultados.

As atividades estão descritas TABELA 7 e as imagens dos procedimentos realizados são apresentadas na FIGURA 16, FIGURA 17 e FIGURA 18.

¹ Aditivo Cristalizante produzido pela MC-Bauchemie.

TABELA 7 — PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DOS CORPOS DE PROVA

Tempo (dias)	Atividade	Com XYPEX	Sem XYPEX
0	Molde CPs	42 	42 
7	Rompimento CPs com cura de 7 dias cura	3 	3 
28	Rompimento CPs com cura de 28 dias	3 	3 
	Fissuração com 65%P com cura de 28 dias	18 	18 
	Fissuração com 80%P com cura de 28 dias	18 	18 
28+14	Rompimento CPs 65%P com cura de 14 dias imersão	3 	3 
	Rompimento CPs 80%P com cura de 14 dias imersão	3 	3 
28+21	Rompimento CPs 65%P com cura de 21 dias imersão	3 	3 
	Rompimento CPs 80%P com cura de 21 dias imersão	3 	3 
28+28	Rompimento CPs 65%P com cura de 28 dias imersão	3 	3 
	Rompimento CPs 80%P com cura de 28 dias imersão	3 	3 
28+35	Rompimento CPs 65%P com cura de 35 dias imersão	3 	3 
	Rompimento CPs 80%P com cura de 35 dias imersão	3 	3 

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

FIGURA 16— CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS APÓS DESFORMA



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA – LABORATÓRIO ENGEMIX.

FIGURA 17 — CORPOS DE PROVA IMERSOS EM ÁGUA



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA – LABORATÓRIO ENGEMIX.

FIGURA 18 — ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA À COMPRESSÃO



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA – LABORATÓRIO ENGEMIX.

4.2.2 ANÁLISE QUANTO AO SELAMENTO DE FISSURAS - CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

No segundo experimento foram moldados 6 corpos de provas prismáticos 15x15x51cm com fibras de aço, sendo 3 deles com aditivo e 3 sem aditivo. Os CPs foram mantidos em cura em câmara úmida durante 28 dias (ABNT, 2006).

Após este período, os corpos de prova foram fissurados por tração na flexão (ABNT, 2010) e os dois CPs (um com aditivo e um sem aditivo) que se aproximaram mais das fissuras desejadas (até 0,4mm) foram escolhidos para dar continuidade ao experimento.

Em seguida, foram colados dois tubos acrílicos, de diâmetro de 15cm e altura de 1m (h), um sobre cada CP fissurado, que foram então preenchidos com água até a altura de 0,9h, formando uma coluna d'água sobre o corpo de prova.

O ensaio foi monitorado diariamente pelos próximos 65 dias. A água foi repostada uma vez ao dia permitindo a verificação da evolução da fissura através do acompanhamento e registro da altura do nível d'água.

As atividades estão descritas TABELA 8 e as imagens dos procedimentos realizados são apresentadas na FIGURA 19, na FIGURA 20 e na FIGURA 21.

TABELA 8 — PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DOS CORPOS DE PROVAS CILÍNDRICOS

Tempo (dias)	Atividade	Com XYPEX	Sem XYPEX
0	Molde CPs	3 	3 
28	Fissuração CPs com cura de 28 dias	3 	3 
28	Fixação do tubo acrílico	1 	1 
	Acompanhamento	1 	1 

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

FIGURA 19— CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS APÓS DESFORMA



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA – LABORATÓRIO ENGEMIX.

FIGURA 20 — TUBOS ACRÍLICOS
FIXADOS NOS CORPOS DE PROVA



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

FIGURA 21 — VISÃO SUPERIOR DO TUBO ACRÍLICO



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão apresentados os resultados dos experimentos realizados.

5.1 INCREMENTO DE RESISTÊNCIA

Após 7 dias de cura em câmara úmida foram obtidas as resistências à compressão apresentadas na TABELA 9.

TABELA 9— TENSÃO
MÁXIMA DE
RUPTURA COM 7
DIAS DE CURA

Com Aditivo (MPa)	
1º	46,3
2º	48,0
3º	48,0
Média	47,4

Sem Aditivo (MPa)	
1º	43,0
2º	44,0
3º	41,4
Média	42,8

FONTE: AUTORIA
PRÓPRIA.

Aos 28 dias de cura os corpos de prova ganharam resistência, sendo os resultados obtidos demonstrados na TABELA 10.

TABELA 10 — TENSÃO MÁXIMA DE RUPTURA OM 28 DIAS DE CURA (CARGA P)

Com Aditivo (MPa)	
1º	52,0
2º	58,4 = P'
3º	52,9
Média	54,4 = P

Sem Aditivo (MPa)	
1º	54,8 = P'
2º	49,8
3º	48,7
Média	51,1 = P

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Onde P refere-se a carga média de ruptura de cada concreto e P' a carga máxima de ruptura de cada concreto.

Pelos valores obtidos, nota-se que com 7 dias de cura em câmara úmida os corpos de provas atingiram resistências superiores à 40MPa em ambos os traços. Além disso, é possível observar que a utilização do aditivo cristalizante conferiu 11% a mais de resistência à compressão.

Após 28 dias de cura a resistência atingiu valores ainda maiores. Percebe-se ainda que os corpos de prova com aditivo apresentaram 7% a mais de resistência à compressão ao serem comparados aos sem aditivo.

Quando comparados entre si com idades de 7 e 28 dias, as tensões máximas de ruptura aumentaram ao longo do tempo confirmando o comportamento esperado, uma vez que quanto maior for o tempo de cura, ou seja, quanto mais a água do concreto for impedida de sair, melhores serão as características deste em relação à resistência. Para o traço com aditivo houve um acréscimo de 15% nos resultados de 7 para 28 dias de cura, já para o traço sem aditivo o aumento foi de 19%.

Após a determinação da carga P (obtida através dos resultados da ruptura do concreto aos 28 dias de cura), fissuração dos corpos de provas com 65% e 80% de P, imersão dos mesmos em

água e ruptura de amostras após 14, 21, 28 e 35 dias, obteve-se os resultados apresentados na TABELA 11:

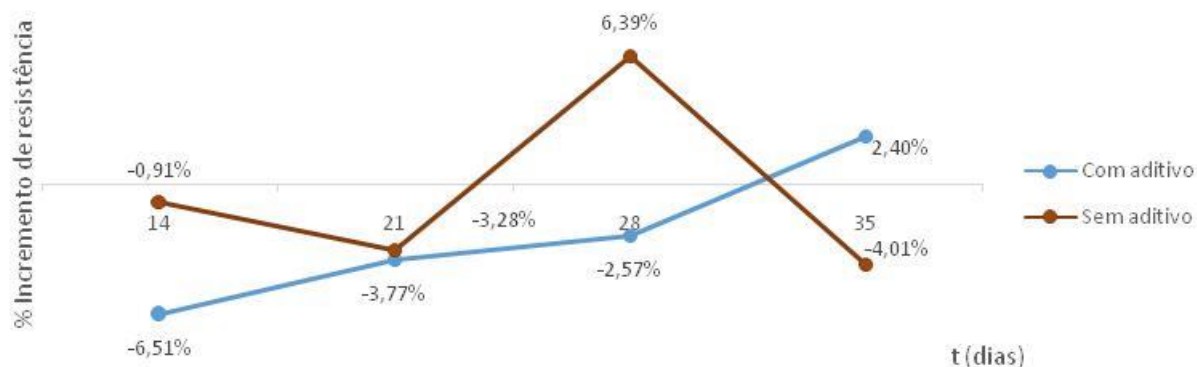
TABELA 11 — RESULTADOS OBTIDOS APÓS ROMPIMENTO

Dias de imersão	Fissuração	P = 54,4 / P' = 58,4		P = 51,1 / P' = 54,8	
		Com aditivo		Sem aditivo	
14	65%	54,6	53,5	50,3	50,0
		54,0		54,3	
		51,8		45,4	
	80%	54,7	47,1	53,0	51,6
		50,6		49,2	
		35,9		52,6	
21	65%	55,7	52,5	48,6	50,7
		45,7		53,0	
		56,2		50,4	
	80%	47,1	52,2	51,0	50,4
		58,0		50,0	
		51,4		50,2	
28	65%	56,9	53,7	55,6	56,4
		53,0		55,3	
		51,2		58,3	
	80%	62,7	57,8	50,5	54,7
		59,5		57,8	
		51,3		55,7	
35	65%	59,8	56,6	52,6	48,4
		50,9		42,8	
		59,1		49,9	
	80%	56,2	55,4	55,2	56,4
		52,0		53,8	
		58,0		60,1	

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

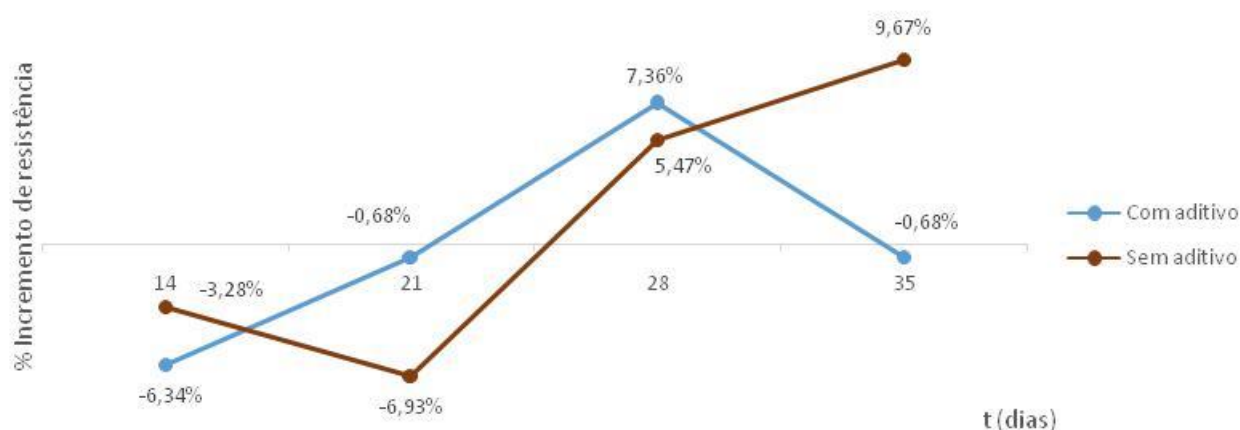
Com base nos dados gerados, foi possível analisar graficamente a evolução da resistência conforme FIGURA 22 e FIGURA 23.

FIGURA 22 — RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - FISSURAÇÃO À 65% DE P



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

FIGURA 23 — RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - FISSURAÇÃO À 80% DE P



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Apesar de a carga P ter sido estipulada como a média entre as cargas obtidas no rompimento com 28 dias de cura e ter sido utilizada para as fissurações à 65% e a 80% da carga de ruptura, os gráficos foram gerados através de comparação com a carga P' (maior carga obtida aos 28 dias de cura) e levaram em consideração somente os maiores valores obtidos de resistência à compressão destacados na TABELA 11.

Em ambos os gráficos é possível observar um comportamento linear de incremento da resistência ao longo do tempo para o concreto com aditivo cristalizante enquanto o sem aditivo não apresenta tal regularidade. Inicialmente os corpos de prova não atingiram o valor de ruptura estabelecido pela carga P, portanto não houve acréscimo de resistência. Conforme o aumento do tempo de imersão em água pode-se notar que, tanto para 65% como para 80%, as resistências foram crescendo gradativamente até superaram a tensão de ruptura, ou seja, houve incremento de resistência.

Os resultados que destoam deste comportamento podem ser justificados por alguns fatores:

- 1) Método de imersão em água utilizado no experimento não retratou de forma adequada o ambiente em que a utilização do concreto autocicatrizante é indicada;
- 2) Apesar dos corpos de prova terem sido moldados utilizando a mesma composição, foi necessário a produção em duas etapas, esta condição pode ter causado variação na tensão de ruptura dos mesmos, o que impossibilita a garantia de que a carga P determinada pode ser aplicada para todos os corpos de prova;
- 3) Escolha inadequada da realização da fissuração à 80% de P, uma vez que a variação da tensão de ruptura mencionada no item 2 implicou em perda de área da seção transversal de vários corpos de prova influenciando diretamente nos resultados de resistência à compressão, além disso, a imprecisão do equipamento pode ter ocasionado a variação dos resultados do experimento dado que o percentual de fissuração foi muito elevado;
- 4) Permanência de todos os corpos de prova, com e sem aditivo, imersos em um mesmo recipiente, considerando que o aditivo é solúvel em água e pode ter migrado para os outros materiais, com mais facilidade para os corpos de provas fissurados a 80% de P, já que possuem fissuras maiores.

Com base nos resultados e análises acima, pode-se afirmar que a fissuração com 80% da carga de ruptura apresentou resultados mais significativos quanto ao incremento de resistência à compressão quando comparado com o traço sem aditivo, o que não ocorre de forma relevante na fissuração com 65%. Isso pode ser explicado, porque quando fissurados a 80%, os corpos de prova apresentam fissuras maiores permitindo que água percole pelos seus capilares com mais facilidade aumentando o potencial do material para o selamento das microfissuras estáticas (FIGURA 24) e consequente aumento da resistência.

FIGURA 24 — EVIDÊNCIA DE
CRISTALIZAÇÃO EM CORPO DE
PROVA CILÍNDRICO

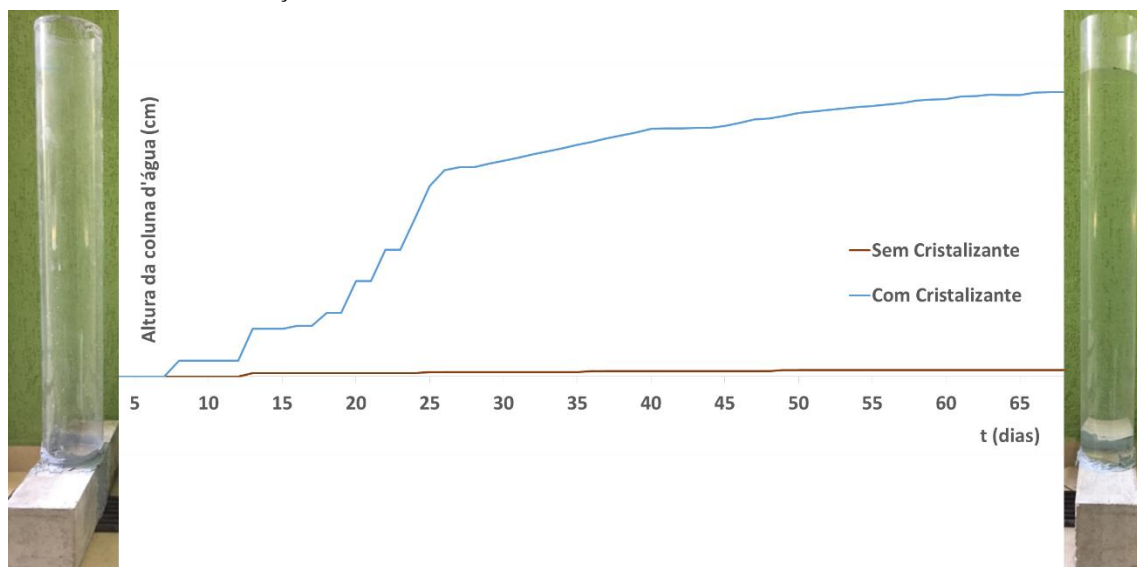


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

5.2 SELAMENTO DE FISSURAS

Os corpos de prova prismáticos foram fissurados e submetidos à pressão da coluna d'água por 65 dias, resultando na análise apresentada na FIGURA 25 — EVOLUÇÃO DO SELAMENTO DE FISSURAS FIGURA 25:

FIGURA 25 — EVOLUÇÃO DO SELAMENTO DE FISSURAS



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Os resultados obtidos demonstram que o concreto autocicatrizante é capaz de reduzir consideravelmente a permeabilidade da estrutura. A partir do 25º dia, o fluxo de água passante no concreto com aditivo começou a reduzir e estabilizar. A presença do cristalizante no traço causou o selamento das fissuras (FIGURA 26) de forma a inibir a passagem de água ao longo dos dias, enquanto no traço sem aditivo não houve mudança significativa e a água permaneceu escoando constantemente durante todo o experimento.

FIGURA 26 — EVIDÊNCIA DO SELAMENTO DE FISSURAS



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

6 CONCLUSÕES

O presente estudo possibilitou o desenvolvimento de metodologias capazes de verificar o comportamento do concreto autocicatrizante quanto às propriedades de selamento de fissuras e incremento de resistência.

A metodologia para verificação do selamento de fissuras foi executada considerando as condições em que a utilização do concreto autocicatrizante é indicada e apresentou resultados satisfatórios. Em uma análise comparativa com o traço convencional sem aditivo, observou-se um desempenho muito superior do concreto com aditivo que estabilizou o fluxo de passagem de água a partir do 25º dia do experimento, enquanto no corpo de prova sem aditivo a passagem de água continuou ocorrendo ininterruptamente.

Em relação à metodologia desenvolvida para verificação do incremento de resistência verificou-se que os procedimentos adotados não foram eficientes a ponto de garantir com exatidão a confiabilidade dos resultados pelos motivos discutidos no item 5.1. O aditivo incorporou resistência ao concreto, alcançando ganhos de até 2,40% para fissuração à 65% da carga de ruptura e ganhos de até 7,36% para fissuração à 80% da carga de ruptura, porém o incremento foi irrisório e também foi obtido no concreto sem o aditivo cristalizante.

Neste sentido, os resultados obtidos comprovam que o acréscimo do aditivo no traço do material efetivamente repara fissuras estáticas com até 0,4 mm, porém a propriedade de incremento de resistência não deve ser considerada como um diferencial do material.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para experimentos que visem utilizar a metodologia adotada neste presente trabalho, indica-se que sejam realizadas algumas mudanças:

1. Ensaio de verificação de incremento de resistência:
 - a. A imersão dos corpos de provas deve ser realizada em tanque com maior profundidade visando obter um cenário mais próximo do adequado para a utilização do concreto autocicatrizante.
 - b. Os corpos de prova com aditivo e sem aditivo devem ser armazenados em tanques distintos.
 - c. A determinação da carga de ruptura P deve ser realizada através da média de um número maior de amostras de corpos de prova.
 - d. As porcentagens definidas para fissuração dos corpos de prova devem ser inferiores às adotadas neste trabalho, sugere-se que sejam de no máximo 70%.
2. Ensaio de verificação de selagem de fissuras:
 - a. Recomenda-se que a reposição da água no tubo acrílico seja realizada através de um sistema de bomba garantindo que a passagem de água pelo corpo de prova seja contínua.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 9479: Câmara úmida e tanques para cura de corpos de prova e argamassa e concreto.** [S.l.], p. 1-2. 2006.
- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** [S.l.]. 2007.
- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12142: Concreto- Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** [S.l.]. 2010.
- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5674: Manutenção de edificações.** [S.l.]. 2012.
- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 15575: Desempenho de edificações habitacionais.** [S.l.]. 2013.
- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** [S.l.]. 2014.
- ADAK, A. **Self Healing Concrete.** Jagannath University. Chaksu, p. 1-15. 2015.
- BASTOS, P. S. D. S. **Fundamentos do concreto armado.** UNESP. Bauru, p. 1-98. 2006.
- BLAISZIK, B. J.; KRAMER, S. Autonomic restoration of electrical conductivity. **Advanced Materials**, Weinheim, p. 398-401, Dezembro 2012.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado.** 1ª. ed. São Paulo: Pini, 1988.
- CASAL, R. **Durabilidade de estruturas de concreto protegidas por sistema de cristalização integral.** Penetron - Total Concrete Protection. Lorena, p. 1-49. 2017.
- ENGEMIX. **Informativo Técnico - Concreto autocicatrizante para estruturas em contato com água (Cristalmix).** Engemix. São Paulo, p. 1-9. 2018.

GHOSH, S. K. **Self-healing materials: Fundamentals, Design Strategies and Applications**. [S.l.]: Wiley-VCH, 2008.

HELENE, P. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2ª. ed. São Paulo: Pino, 1992.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, v. I, 2011.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, v. II, 2011.

ISO. **International Organization for Standardization 13823: General principles on the design of structures for durability**. [S.l.]. 2008.

ITAMBÉ. Cimento Itambé. **Massa Cinzenta**, 2016. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/brasil-concreto-cicatrizante/>>. Acesso em: 4 Junho 2018.

JONKERS, H. M. **Bacteria-based self-healing concrete**. Delft University of Technology. Delft, p. 1-12. 2011.

MC-BAUCHEMIE. **Aditivo para impermeabilização e proteção do concreto**. MC-Bauchemie. São Paulo. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2ª. ed. [S.l.]: Brookman, 2013.

OURIVES, C. N. Avaliação do desempenho dos sistemas de impermeabilização por cristalização capilar do concreto. **Concreto & Construções**, n. 55, p. 1-100, Julho - Agosto - Setembro 2009. ISSN 1809-7197.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Técnico -científica do CREA-PR**, Paraná, n. 1, p. 1-14, Outubro 2013. ISSN 2358-5420.

SOUZA, V. C. M. D.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1ª. ed. São Paulo: Pini, 1998.

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos. 2013.

TITTELBOOM, K. V.; DE BELIE, N. **Self-Healing in Cementitious Materials - A Review**. National Center for Biotechnology Information. Maryland, p. 2182-2217. 2013.

TUTIKIAN, B.; PACHECO, M. Inspeção, diagnóstico e prognóstico na construção civil. **ALCONPAT Internacional**, Mérida, p. 1-17, Março 2013.

VEKARIYA, M. S.; PITRODA, J. Bacterial Concrete: New Era For Construction Industry. **IJETT**, Gujarat, v. 4, Setembro 2013.

VIERIRA, M. A. Patologias construtivas: conceito, origens e método de tratamento. **Especialize**, Goiânia, v. I, n. 12ª, Dezembro 2016. ISSN 2179-5568.

VOTORANTIM CIMENTOS. Votorantim Cimentos. **Mapa da Obra**, 2017. Disponível em: <<http://www.mapadaobra.com.br/negocios/concreto-autocicatrizante-ganha-espaco-na-construcao-civil/>>. Acesso em: 4 Junho 2018.

WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. **Construction and Building Materials**, Trontêmio, p. 571-583, Dezembro 2011.

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