

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LAYANA ALVES DE OLIVEIRA

**TECNOLOGIA DOS
CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES**

CRUZ DAS ALMAS - BA

2020

LAYANA ALVES DE OLIVEIRA

**TECNOLOGIA DOS
CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como
parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Msc. Hélio Guimarães Aragão.

Coorientadora: Prof. Msc. Camila Louzado d'El Rei
Dantas.

CRUZ DAS ALMAS - BA

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LAYANA ALVES DE OLIVEIRA

Matrícula: 2018213424

**TECNOLOGIA DOS
CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

Aprovado em: 18 de dezembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Hélio Guimarães Aragão

1º Membro da banca: Prof. Me. Hélio Guimarães Aragão (Orientador)

Camila Louzado d'El Rei Dantas

2º Membro da banca: Prof. Me. Camila Louzado d El Rei Dantas (Coorientadora)

Tathiane Andrade de Melo

3º Membro da banca: Engenheira Civil Tathiane Andrade de Melo

Atesto que as revisões solicitadas foram feitas

Hélio Guimarães Aragão

Orientador: Prof. Me. Hélio Guimarães Aragão

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me conceder o fôlego de vida, por sempre me mostrar o caminho que devo seguir e preparar sempre o melhor para mim. Por me acordar, cuidar e me fortalecer todos os dias.

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais Solange e Ivanilton, por acreditarem em mim e me apoiarem na busca do meu objetivo, eles são a minha estrutura.

Agradeço ao meu orientador Prof. Msc. Hélio Aragão e a minha co-orientadora Prof. Msc. Camila Dantas, pela generosidade em aceitar o trabalho, pela paciência e por todo o conhecimento transmitido no decorrer deste trabalho. Suas contribuições foram primordiais para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço ao meu namorado Diêgo Menezes pela força, companheirismo e sábias palavras nos momentos difíceis ao longo destes anos.

Agradeço a todos os meus amigos de graduação, em especial à Renaiara, Nei, Pri, Tathi, Jane e Yanes, pelas palavras de apoio, pelas demonstrações de amor e carinho, pelas noites em claro pelos conselhos, pela consideração, pelo amadurecimento compartilhado e todas as experiências vividas que tornaram essa trajetória mais suave.

Agradeço aos verdadeiros professores, servidores e técnicos desta universidade, pelo profissionalismo e conhecimento transmitidos.

Agradeço ao universo por tudo que adquiri e cresci com todos os erros, acertos e conquistas durante a minha graduação.

EPÍGRAFE

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.”
(Carl Jung)

RESUMO

O concreto, um dos materiais mais importantes na construção civil, é suscetível a algumas manifestações patológicas, como fissurações. Apesar de pequenas fissuras geralmente não serem prejudiciais à integridade estrutural do concreto, elas favorecem a entrada de agentes agressivos que afetam a durabilidade do material. No caso de grandes fissuras pode ocorrer a perda de funcionalidade das estruturas, sendo necessário utilizar intervenções técnicas de reparo.

O reparo de fissuras envolve um vasto caminho científico e novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas com o intuito de reduzir os custos que envolvem as técnicas de reparo e inspeção, nesta perspectiva surge o conceito do concreto autocicatrizante. Esta tecnologia traz uma série de benefícios tanto na redução de gastos com reparo e manutenção de estruturas, quanto na poluição do meio ambiente, uma vez que promove a redução da necessidade de novas construções, e conseqüentemente a diminuição do consumo de cimento, que é um grande emissor de CO₂.

O presente estudo tem como principal objetivo introduzir a importância das propriedades autocicatrizantes do concreto por meio de revisão de literatura sobre o tema.

Palavras-chave: concreto, microestrutura, fissuras, autocicatrização.

ABSTRACT

Concrete is one of the primary materials in civil construction, however it is susceptible to some pathological manifestations, among them are cracks. Although small cracks are generally not harmful to the structural integrity of the concrete, they favor the entry of aggressive factors that affect the durability of the material. Large cracks, on the other hand, can corrupt the functionality of the structures, requiring the use of technical repair interventions.

Crack repair involves a wide scientific path and new technologies have been developed in order to reduce costs involving repair and inspection techniques, in this perspective the concept of self-healing concrete arises. This technology brings a series of benefits both in reducing expenses with repair and maintenance of structures, as well as in pollution of the environment, since it promotes the reduction of construction of new structures, and consequently the reduction of cement consumption, which great CO₂ emitter.

The present study has as main objective to introduce the importance of the self-healing properties of concrete through a literature review on the subject.

Keywords: concrete, microstructure, cracks, self-healing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Secção polida de um corpo de prova de concreto.....	17
Figura 2: Forma dos agregados: (a) Brita 1 com grão cúbico; (b) Brita 1 com grão alongado; (c) Seixo rolado com grão discoide; (d) Argila expandida com grão esférico; (e) Brita 1 com grão quadrático; (f) Brita 1 com grão anguloso; (g) Seixo rolado com grão arredondado; (h) Brita 1 com grão lamelar.....	19
Figura 3: Micrografia eletrônica de varredura de cristais hexagonais típicos de monossulfato.....	22
Figura 4: (a) Cristais de Ca(OH)_2 na zona de transição visualizados. (b) Representação da zona de transição e da matriz da pasta de cimento.....	24
Figura 5: Fissuras isoladas.....	30
Figura 6: Fissuras isoladas.....	31
Figura 7: Fissuras disseminadas.....	31
Figura 8 : (a) Fissura vertical. (b) Fissuras verticais por sobrecargas.....	32
Figura 9: Fissuras horizontais derivadas de sobrecarga ou flexocompressão.....	33
Figura 10: Fissura horizontal.....	33
Figuras 11 - (a), (b): Fissuras causadas por retração térmica.....	34
Figuras 12 - (a), (b): Fissuras de retração por secagem.....	36
Figura 13: Fissuras em parede causadas por deformação estrutural.....	37
Figura 14 - (a), (b), (c): Fissuras causadas por recalque de fundação.....	38
Figura 15: Fissuras por expansão da argamassa, causadas por reações químicas.....	39
Figura 16: Esquema de desintegração do concreto causada pelo ataque de sulfatos.....	40
Figura 17: Fissuras causadas pela expansão de óxidos produzidos pela corrosão.....	41
Figura 18: Fissuras causadas pela dilatação das tesouras de madeira no telhado.....	41
Figura 19 - Obras em que foram usados concretos autocicatrizantes: (a) Projeto arquitetônico da Sede do Museu da Imagem e do Som (M.I.S.) - RJ; (b) Laje de subpressão do M.I.S. finalizada; (c) Museu de Arte do Rio de Janeiro – RJ; (d) Estádio Magalhães Pinto–MG.....	43
Figura 20: Mecanismos de colmatção natural do concreto.....	45
Figura 21- Autocicatrização de fissura de 0,4mm em concretos com cinza volante: (a) Aspecto da abertura da fissura aos 7 dias; (b) Cicatrização da fissura aos 14 dias; (c) Fissura totalmente colmatada aos 28 dias; (d) Aspecto da fissura aos 60 dias.....	47
Figura 22: Formação de cristais de C-S-H pelo uso do catalisador cristalino.....	48

Figura 23: Autocicatrização com fibras de PVA.....	49
Figura 24: Ruptura de cápsula de polímeros para liberação do agente cicatrizante.....	50
Figura 25: Cicatrização autônoma com cápsulas (a) e sistemas vasculares (b), contendo agentes cicatrizantes.....	50
Figura 26: Esquema do processo de autocura em bioconcreto.....	51
Figura 27: (a) Esferas de argila expandida, compostas por bactérias e fonte orgânica; (b) Aparência final do concreto, as partes escuras são as argilas expandidas constituídas de esporos bacterianos e de nutrientes.....	52
Figura 28: Catalisador cristalino fornecido em pó.....	53
Figura 29: Comportamento da resistência à compressão devido a fissuração e ao efeito autocicatrizante das microfissuras.....	58
Figura 30: Comparativo das propriedades mecânicas de perda por fissuração e recuperação por cicatrização entre os 3 tipos de cimentos.....	59
Figura 31: Comparativo da taxa de absorção capilar dos 3 tipos de cimentos.....	59
Figura 32: Probiótico com bactérias do gênero <i>Bacillus subtilis</i> e <i>Bacillus licheniformis</i>	61
Figura 33: Ureia empregada como nutriente para as bactérias.....	61
Figura 34: Acetato de cálcio usado como fonte de nutrientes para as bactérias.....	62
Figura 35: (a) Vermiculita super fina; (b) Argila expandida.....	62
Figura 36: Germinação de bactérias em partículas de vermiculita.....	63
Figura 37: (a) Fissura em corpo de prova impregnado; (b) Fissura em corpo de prova não impregnado.....	64
Figura 38: Superfície da amostra de controle.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais compostos do cimento Portland.....	20
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características dos agregados x Propriedades do Concreto.....	18
Quadro 2: Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura em função das classes de agressividade ambiental.....	29
Quadro 3: Espessura da abertura e sua classificação.....	29
Quadro 4: Agentes cicatrizantes que têm sido relatados na literatura.....	44
Quadro 5: Algumas bactérias e sua aplicação na construção civil.....	52
Quadro 6: Comparativo entre os estudos de Sahmaran <i>et al.</i> (2008) e Takagi (2013).....	54
Quadro 7: Composição da dosagem do concreto autocicatrizante.....	55
Quadro 8: Traço do concreto autocicatrizante.....	56
Quadro 9: Resultados dos ensaios de penetração de água sob pressão.....	56
Quadro 10: Propriedades no estado fresco dos traços de concretos utilizados.....	57
Quadro 11: Propriedades da resistência à compressão do concreto (MPa).....	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. OBJETIVO GERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. JUSTIFICATIVA.....	15
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
4.1 Microestrutura do concreto	17
4.1.1 Fase agregado.....	18
4.1.2 Fase da pasta de cimento hidratada.....	20
4.1.3 Vazios na pasta de cimento hidratada.....	23
4.1.4 Zona de transição.....	24
4.2. Concreto no estado fresco e endurecido.....	26
4.2.1 Estado fresco.....	26
4.2.2 Estado endurecido.....	27
4.3. Fissuras em materiais cimentícios.....	28
4.3.1 Classificação de fissuras.....	29
4.3.1.1 Quanto a abertura.....	29
4.3.1.2 Quanto a atividade e a forma.....	30
4.3.2 Causas de fissuras em materiais cimentícios.....	31
4.3.2.1 Fissuras causadas por sobrecargas.....	32
4.3.2.2 Fissuras causadas por variações de temperatura e umidade.....	34
4.3.2.3 Fissuras causadas por retração e expansão.....	35
4.3.2.4 Fissuras causadas por deformação de elementos estruturais.....	36
4.3.2.5 Fissuras causadas por recalques de fundações.....	37
4.3.2.6 Fissuras causadas por reações químicas.....	39
4.3.2.7 Fissuras causadas por falhas em detalhes construtivos.....	41
4.4 Autocicatrização do concreto.....	42
4.4.1 Cicatrização autógena por colmatção natural.....	45
4.4.2 Cicatrização autógena pelo uso de adições minerais.....	46
4.4.3 Cicatrização autônoma pelo uso de catalisador cristalino.....	47
4.4.4 Cicatrização autônoma por adição de fibras.....	48

4.4.5 Cicatrização autônoma por encapsulamento.....	49
4.4.6 Cicatrização autônoma por uso de bactérias.....	50
5.APLICAÇÕES/ ESTUDOS SOBRE CONCRETO AUTOCICATRIZANTE.....	53
5.1 Concreto autocicatrizante com cimentos de escórias de alto-forno ativados por catalisador cristalino.....	53
5.2 Bioconcreto - Concreto com introdução de <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> , acetato de cálcio e uréia.....	60
6. CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais cimentícios precede os antigos egípcios, que utilizavam gesso impuro como material cimentante. Já os gregos e romanos inicialmente usavam calcário calcinado, e posteriormente começaram a misturá-lo com areia, água e fragmentos de pedra, tijolos e telhas, surgindo assim o primeiro concreto da história. Para construções submersas, os romanos moíam uma mistura de cal, cinza vulcânica ou telha de barro cozido. A cinza vulcânica continha sílica e alumina, as quais reagiam com a cal e geravam o chamado cimento pozolânico, (NEVILLE, 2016).

Em 1824, o construtor Joseph Aspdin criou o cimento Portland, assim chamado devido à sua semelhança de cor com a pedra de Portland (calcário extraído em Dorset), após aquecer uma mistura de argila moída bem fina e calcário. Surgiu assim um dos materiais mais amplamente empregados na construção civil até hoje, o cimento Portland é a principal base do concreto (NEVILLE, 2016).

Para Neville e Brooks (2013), no sentido geral o concreto é qualquer produto de um meio cimentante hidráulico em reação com água e pode conter cinza volante, pozolanas, escórias de alto-forno, sílica ativa, polímeros, adições minerais, aditivos, fibras, agregados e entre outros. Dentre as características deste material estão a boa resistência a compressão, resistência significativa a choques e a vibrações, pouco permeabilidade à água e baixo custo. Apesar das suas boas propriedades mecânicas é importante ressaltar sobre a durabilidade deste produto que é suscetível a fissuras. A tecnologia do concreto permite minimizar as ocorrências de fissuras por meio de propriedades autocicatrizantes. Tal tecnologia influencia nos custos diretos da obra, pois proporciona uma economia de produtos e mão de obra no que se refere a futuros reparos, e nos custos indiretos no que diz respeito a inutilização da obra durante o tempo de reparo (TAKAGI, 2013).

O conceito de propriedades autocicatrizantes do concreto foi primeiramente abordado em 1994 pela pesquisadora Dra. Carolyn M. Dry, ao trabalhar com concreto melhorado por fibras de polipropileno preenchidas com adesivo de metil metacrilato como agente cicatrizante. As fibras se rompiam e liberavam o adesivo que cicatrizava as fissuras de modo ativo (DRY, 1994). Em 2005, foi criado o comitê técnico para “Fenômenos de autocicatrização em materiais de base cimentícia”, influenciado pela sobrevivência de estruturas muito antigas. A persistência destas construções durante séculos é justificada devido a capacidade de colmatação natural dos aglomerantes utilizados para cimentar os blocos destas obras (RILEM, 2005). A partir da

criação do comitê técnico em 2005, diversos estudos vêm sendo abordados sobre concretos com propriedades autocicatrizantes.

A autocicatrização do concreto pode ser classificada de maneira geral em dois tipos: a autocicatrização autógena e a autocicatrização autônoma (VAN TITTELBOOM, SNOECK *et al.*, 2013). A autocicatrização autógena ocorre de maneira natural provocada pelos próprios componentes do concreto. Já a autocicatrização autônoma pode ocorrer por meio de microcápsulas que contém materiais com propriedades cicatrizantes, por meio da vascularização de tubos ocos que bombeiam agentes cicatrizantes para as fissuras (VAN TITTELBOOM, DE BELIE *et al.*, 2011) ou através de outros métodos que proporcionem essa regeneração.

Ao longo deste trabalho abordaremos a estrutura do concreto associado a questões pertinentes ao desenvolvimento de tecnologias que promovem a sua autocicatrização.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Analisar, por meio de revisão bibliográfica, métodos que possam potencializar a autocicatrização de fissuras do concreto.

2.2. ESPECÍFICOS

- Abordar os conceitos de microestrutura do concreto.
- Apresentar os principais parâmetros do concreto no estado fresco e endurecido.
- Mostrar os principais tipos de fissuras no concreto, suas causas e classificação.
- Especificar métodos de autocicatrização de fissuras no concreto, existentes na literatura, e avaliar aplicações experimentais.

3. JUSTIFICATIVA

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, além de ser uma peça chave na construção civil. É um material resistente, porém suscetível à formação de fissuras. Este fenômeno é uma manifestação patológica que prejudica a durabilidade e integridade do concreto, pois contribui para a permeabilidade do material. Tal fator possibilita a penetração de agentes agressivos, causando uma série de processos de degradação, como por exemplo a

corrosão do aço. Quanto maior a abertura de uma fissura, maior será a sua gravidade, podendo até mesmo corromper a estrutura, sendo necessário a ação de reparos.

Os fatores ligados a falta da durabilidade dos concretos geram impactos na economia nacional, refletindo nos gastos necessários para a manutenção e reparo das estruturas de concreto. Cabe ressaltar que as ações convencionais para a recuperação de fissuras aumentam o custo do ciclo de vida do concreto, assim como a demanda de tempo e material para executá-la. O conceito das novas tecnologias autocicatrizantes inseridas no concreto desde o momento da sua elaboração, surge intencionalmente com o intuito gerar a economia dos custos diretos de material e mão de obra de reparo. Esta tecnologia visa promover a autocicatrização das falhas, a fim de evitar os futuros reparos.

Este trabalho busca desenvolver uma revisão bibliográfica acerca de alguns métodos de autocicatrização do concreto encontrados na literatura, a fim de demonstrar a sua funcionalidade e relevância. Tratando-se de um tema relativamente novo, espera-se que este estudo colabore para o crescimento científico dos concretos autocicatrizantes, promovendo a sua utilização com maior segurança e eficiência.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Microestrutura do concreto

O concreto é o material estrutural mais difundido do mundo e possui uma microestrutura heterogênea e complexa, não existindo um modelo realista da estrutura do mesmo para que se possa prever o comportamento confiável do material. Entretanto, estudar separadamente os constituintes do concreto e microestrutura, pode auxiliar no controle de suas propriedades bem como seu aperfeiçoamento. Os constituintes do concreto são a pasta de cimento hidratada, agregado e zona de transição (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2008), o concreto pode ser considerado como um material bifásico em nível macroscópico, como segue na Figura 1, constituído por agregado e pasta de cimento hidratada.

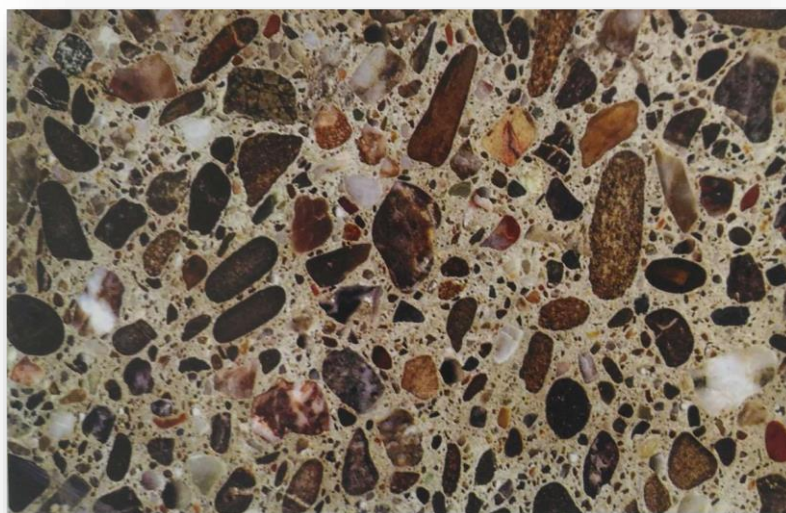


Figura 1: Secção polida de um corpo de prova de concreto
(Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Já a nível microscópico apresenta microestrutura complexa. As duas fases não são homogêneas entre elas, nem entre si, na microestrutura. A pasta de cimento hidratada, por exemplo, mostra ter algumas regiões mais porosas, como também regiões mais densas. Em alguns corpos de prova contendo a mesma quantidade de cimento e diferentes quantidades de água, foi possível observar que após um intervalo de tempo, o volume de vazios capilares diminui quando há redução da relação água/cimento ou com aumento da idade de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A análise de propriedades do concreto tais como a resistência, porosidade e durabilidade, são inerentes a funcionalidade do mesmo. Pode-se afirmar que a conexão entre as fases agregado e pasta de cimento resultam de uma interação entre produtos de hidratação do cimento e agregado e a reação química entre eles (PAULON; KIRCHHEIN, 2011). As propriedades do concreto possuem relação direta com comportamento e as características destas fases, as quais serão abordadas a seguir.

4.1.1. Fase agregado

Os agregados constituem 70% do volume do concreto e exercem grande influência nas suas propriedades. A fase agregado é quem define os parâmetros de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto, pois elas dependem da densidade e resistência do agregado, através de características físicas e químicas do mesmo. Assim, as características físicas como volume, tamanho e distribuição dos poros possuem grande relevância (EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017).

Não é possível quantificar separadamente a influência de cada característica do agregado sobre as propriedades do concreto, o conjunto delas resulta em porções variadas nas diferentes propriedades, como segue o Quadro 1:

Características dos agregados	Propriedades do concreto
Composição mineralógica	Trabalhabilidade
Composição granulométrica	Resistência mecânica
Porosidade	Módulo de elasticidade
Absorção de água	Massa específica
Forma das partículas	Características térmicas
Textura das partículas	Variações volumétricas
Resistência à compressão	Exsudação
Módulo de elasticidade	Coloração
Substâncias deletérias presentes	Durabilidade

Quadro 1: Características dos agregados x Propriedades do Concreto.

(Fonte: MAGALHÃES, 2007)

Segundo Magalhães (2007), as características dos agregados influem nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto. Como por exemplo, a resistência (tanto à compressão quanto à abrasão) e o módulo de elasticidade do concreto são propriedades que estão

diretamente ligadas à porosidade do agregado, a qual determina a capacidade de absorção do mesmo e define a facilidade em que a água pode entrar e sair, podendo ocasionar danos na estrutura. A resistência do concreto não depende inteiramente da resistência mecânica do agregado, ela é estabelecida também por meio da absorção e aderência do mesmo. O módulo de elasticidade do agregado afeta tanto a retração quanto a fluência do concreto, quando existe uma grande variedade entre os módulos de elasticidade do agregado e da pasta de cimento desencadeia-se o aparecimento de microfissuras na interface do agregado com a matriz.

A forma, dimensão e textura do agregado graúdo interferem nas propriedades do concreto, pois quanto mais alongadas forem as partículas, maior a probabilidade de retenção de água na superfície do agregado, promovendo a chamada exsudação. Esse acontecimento resulta em uma zona de transição fraca, entre pasta de cimento e agregado, e intervém de maneira indireta na resistência do concreto. Os agregados de textura lisa produzem uma ligação mais fraca com a pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

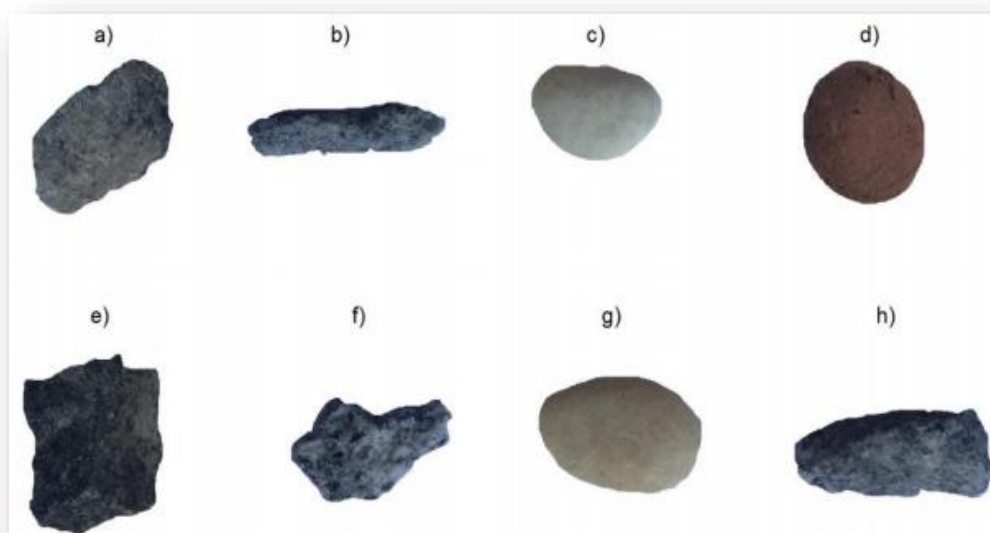


Figura 2 - Forma dos agregados: **(a)** Brita 1 com grão cúbico; **(b)** Brita 1 com grão alongado; **(c)** Seixo rolado com grão discoide; **(d)** Argila expandida com grão esférico; **(e)** Brita 1 com grão quadrático; **(f)** Brita 1 com grão anguloso; **(g)** Seixo rolado com grão arredondado; **(h)** Brita 1 com grão lamelar.

(Fonte: JANUTHE; PRATA; FIALHO, 2017).

De acordo com Dal Molin (1995), agregados com diâmetros máximos menores ampliam a superfície de contato entre pasta e agregado, tornando a zona de transição mais forte, reduzindo as tensões de aderência e provocando o aumento da resistência do concreto. Já os

que contêm diâmetro máximo maior apresentam grande possibilidade de possuírem vazios e microfissuras internas. A distribuição granulométrica do agregado tem sua relevância no quesito de empacotamento dos grãos, o que implica na fração volumétrica de uma mistura, isso está diretamente relacionado ao módulo de deformação do concreto e sua demanda por água.

4.1.2. Fase da pasta de cimento hidratada

A pasta de cimento é constituída por água e cimento, e nela ocorrem as reações necessárias para que o cimento Portland se torne um material aglomerante. A reação ocorre entre a água e a presença de silicatos e aluminatos, que em conjunto formam os produtos hidratados que compõem a pasta, resultando em uma massa firme e resistente (NEVILLE, 2016).

De acordo com Cincotto (2011), o cimento Portland é o aglomerante mais difundido no mundo na produção do concreto. Ele é obtido através da moagem do clínquer, este, por via, é produzido a partir de uma mistura de calcário e argila aquecida em alta temperatura. Após a moagem do clínquer adiciona-se a gipsita (CaSO_4), obtendo-se assim o cimento Portland comum. Enquanto os cimentos Portland compostos possuem adição ou substituição do clínquer por outros componentes como fíler calcário, materiais pozolânicos e escórias de alto forno. Shukuzawa et al. (1983) aborda sobre a importância do controle químico dos elementos durante a fabricação do cimento, no qual deve ser feito um controle rigoroso da proporção, granulometria e homogeneização da matéria-prima e da mistura.

O cimento tem por função aglomerar partículas, quando entra em contato com a água, formando produtos de hidratação para o desenvolvimento de resistência mecânica. Sobre a sua composição pode-se citar, como segue na Tabela 1, que os principais constituintes são os silicatos de cálcio, os aluminatos de cálcio e a gipsita, acrescentada para impedir a tendência à pega instantânea ocasionada pela grande reatividade do C_3A .

Tabela 1: Principais compostos do cimento Portland

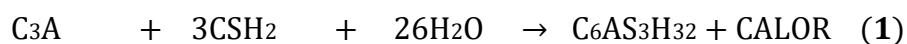
Nome do composto	Composição	Abreviação
Silicato tricálcico (Alita)	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico (Delita)	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico (Celita)	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico (Ferrita)	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

(Fonte: Adaptado de NEVILLE, 2016).

Segundo Neville (2016), existem também alguns compostos que aparecem em pequena quantidade na composição do cimento, esses são denominados compostos secundários: MgO, TiO₂, Mn₂O₃, K₂O e Na₂O. Os óxidos de sódio e de potássio (K₂O e Na₂O), também chamados álcalis, podem reagir com alguns tipos de agregados e provocar uma reação de fragmentação do concreto (reação álcali-agregado), além de afetar a velocidade do ganho de resistência do mesmo.

Conforme Mehta e Monteiro (2008), existem dois mecanismos de hidratação do cimento Portland: a hidratação por dissolução-precipitação e a hidratação no estado sólido ou topoquímico. A hidratação por dissolução acontece na fase inicial em que a água é misturada ao cimento, durando até 28 dias. Nessa etapa, os componentes do cimento se dissolvem e formam íons para a formação de compostos hidratados em solução. Os compostos hidratados são insolúveis em água, ocasionando assim a precipitação dos mesmos e promovendo a reorganização dos constituintes do cimento, essa etapa é responsável pelo ganho de resistência nas primeiras idades. A partir do 28º dia ocorre a chamada hidratação topoquímica, que por sua vez, é a continuação das reações de hidratação por dissolução, porém ocorre por meio de íons. As reações de hidratação topoquímica acontecem diretamente na superfície dos compostos do cimento (reação mais lenta) sem que os compostos entrem em solução. A água continua penetrando nos grãos de cimento mesmo ao longo do tempo, produzindo C-S-H interno, que é responsável pelo ganho de resistência em idades posteriores. O enrijecimento da pasta deve-se a hidratação dos aluminatos e a evolução da resistência (endurecimento) é ocasionada pelos silicatos.

No processo de hidratação dos aluminatos, ao entrar em contato com água, o C₃A provoca uma reação instantânea na qual torna-se necessário adicionar sulfato (gipsita) para retardar a pega. Inicialmente, o sulfato reage com os aluminatos e resultam na formação de etringita (C₆AS₃H₃₂). Taylor (1992) cita a reação química da formação de etringita primária a seguir:



(Aluminato tricálcico) + (sulfato de cálcio dihidratado) + (água) → (etringita)

Como segue na Figura 3, a etringita primária possui formato de agulhas, esses cristais se formam minutos após o início do processo de hidratação e são responsáveis pela pega e resistência inicial do concreto. Cerca de 30 a 40 horas depois do início da hidratação, a gipsita é totalmente consumida nesse processo e, ainda havendo C₃A, aumenta-se a concentração de

aluminatos, ocorrendo uma instabilização da etringita, a qual se decompõe em monossulfato hidratado. Kuzel (1995) mostrou que essa reação é dada da seguinte maneira:

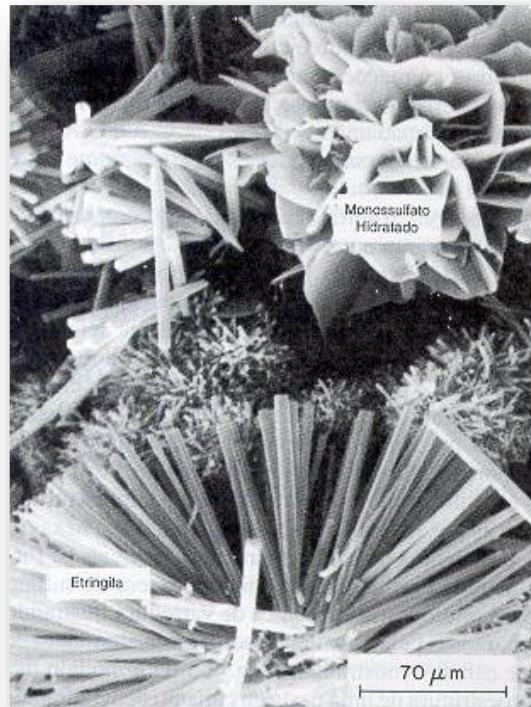
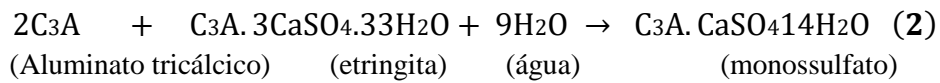
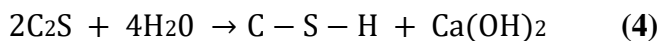
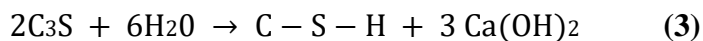


Figura 3: Micrografia eletrônica de varredura de cristais hexagonais típicos de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita.

(Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008)

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a hidratação do C_4AF não possui uma configuração exata pois sua reação indica uma série de compostos, dificultando a caracterização. Pode-se afirmar que ele contém a estrutura similar ao C_3A e tem pouca influência na pasta de cimento endurecida. Quanto aos silicatos, a hidratação acontece horas depois do início do processo de hidratação do cimento. A reação de hidratação do C_3S e C_2S resulta nos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), em formato fibrilar e, no hidróxido de cálcio representado por $Ca(OH)_2$, em formato de cristais prismáticos. Após serem produzidos, o C-S-H e o $Ca(OH)_2$ lotam o espaço ocupado pela água e pelas partículas do cimento em dissolução.

Segundo Neville (2016), a reação de hidratação do C_3S precisa de 24% de água e resulta em 61% de $C_3S_2H_3$ e 39% de $Ca(OH)_2$. Enquanto que a reação de hidratação do C_2S necessita de 21% de água e resulta em 82% de $C_3S_2H_3$ e 18% de $Ca(OH)_2$. As reações podem ser vistas nas equações a seguir:



Sabe-se que o C-S-H é o responsável pelo ganho de resistência no estado endurecido da pasta e compõe entre 50% e 60% do seu volume de sólidos. Já o $Ca(OH)_2$ constitui 20% a 25% do volume de sólidos da pasta já endurecida, e em maior quantidade diminui a resistência do concreto a ataques de ácidos e sulfatos. O C_3S é encarregado de desenvolver a resistência do concreto nas primeiras fases, porém em maior quantidade promove um concreto menos resistente e sujeito a ataques químicos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

4.1.3. Vazios na pasta de cimento hidratada

Para Silva (2005) a resistência da pasta de cimento hidratada também está relacionada a sua porosidade, compreendendo que apenas componentes sólidos podem resistir a esforços. A disposição dos poros é concebida durante o período de hidratação e depende principalmente da relação água/cimento da pasta, pois quanto menor for essa relação mais agrupados ficarão os grãos de cimento, resultando assim em uma menor quantidade de vazios.

A porosidade da pasta de cimento se divide em poros de gel ou entre camadas de C-S-H, que são vazios muito pequenos com pontes de hidrogênio, capazes de reter água e, dessa forma, contribuir para a uma retração por secagem e fluência ao ser removida. Existem também os vazios capilares que compreendem o espaço não ocupado pelo cimento ou pelos produtos sólidos da hidratação. Outro tipo é o poro de ar incorporado, estes apresentam forma esférica e são maiores que os poros capilares, geralmente ocorrem devido à má vibração do concreto e sua grande proporção aumenta a permeabilidade do concreto, diminuindo a resistência. A distribuição do tamanho dos vazios afeta diretamente a resistência se tiverem diâmetro superior a 50 μm (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

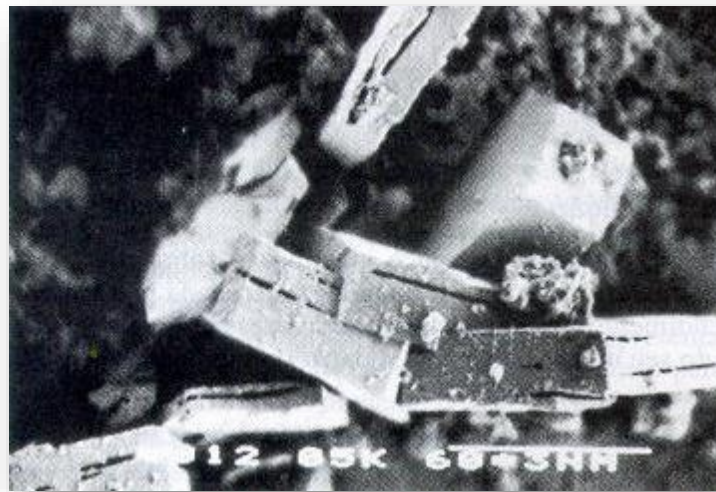
Gricoli e Helene (2001) citam que a durabilidade do concreto depende muito da quantidade de poros existentes na pasta, estes por sua vez são preenchidos pelos produtos de hidratação e são diminuídos de tamanho e volume nesse processo. Sabe-se que um concreto

muito poroso permite a entrada de agentes agressivos que fazem com que a sua vida útil seja prejudicada.

4.1.4. Zona de transição

Denomina-se zona de transição a parcela de cimento em contato com o agregado graúdo (Fig.4 - b). É descrita como uma zona de maior porosidade e heterogeneidade e possui características diferentes do restante da pasta. A sua dimensão e particularidades variam de acordo os componentes da pasta e do agregado graúdo (NEVILLE, 2016).

De acordo com Kaefer (S.d.) a zona de transição é a parte que possui maior porosidade, isso acontece devido ao aumento da relação água/cimento na interface entre a pasta de cimento e o agregado, que acarreta na formação de um filme de água em volta do agregado graúdo. A porosidade faz com que mais cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio) e etringita se concentrem nessa região, tais cristais (Fig. 4 - a) possuem superfície específica menor e diminuem a força de adesão, prejudicando a aderência entre pasta e agregado, além de criarem planos preferenciais de ruptura.



(a)

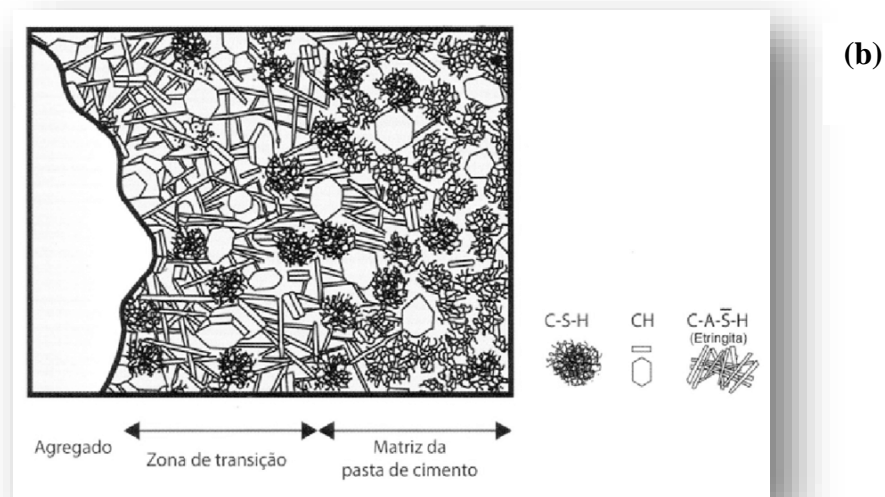


Figura 4: (a) Cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na zona de transição visualizados. (b) Representação da zona de transição e da matriz da pasta de cimento.

(Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008)

Segundo Agostini e Longati (2003), o volume dos grandes cristais de hidróxido de cálcio traz heterogeneidade à pasta e contribui para a microfissuração ainda que não haja emprego de cargas externas. Para diminuir os fatores que causam essa diversidade é necessário fazer modificações na microestrutura da pasta por meio da utilização de adições minerais, que destroem o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, geram compostos mais resistentes e minimizam os poros existentes.

De acordo com Arruda (2013) com apenas 50% da resistência última, a tensão nos poros da matriz cimentícia já se torna grande o suficiente para provocar uma fissura. Ao elevar a tensão, as fissuras da matriz aumentam até se juntarem com as fissuras da zona de transição, formando um sistema contínuo e promovendo a ruptura. Todavia, quando ocorre ação de forças de compressão é necessário que haja uma energia considerável para que ocorra a propagação de fissuras.

É preciso dizer também que a microestrutura da zona de transição desempenha grande importância na rigidez e no módulo de elasticidade do concreto como um todo. Mesmo que os integrantes portem alta rigidez individualmente, a rigidez do concreto é restringida em função das zonas fragilizadas, ou seja, por vazios e microfissuras da interface (ARRUDA, 2013).

Para Mehta e Monteiro (2008) a zona de transição também interfere na durabilidade do concreto. No caso de concretos protendidos e armados, por exemplo, é comum a sua ruptura em zonas onde há corrosão da armadura, que por sua vez é induzida pela permeabilidade do

concreto. A razão principal da permeabilidade do concreto se dá por meio das microfissuras na zona de interface com o aço e o agregado graúdo. A penetração de ar e água também são fatores prejudiciais na corrosão de armaduras. A permeabilidade e a resistência do concreto estão diretamente atribuídas a relação água/cimento da mistura e a porosidade. Com isso, o mais adequado é ponderar os efeitos da relação água/cimento como um todo. Conforme as características do agregado, tais como a granulometria e dimensão máxima, a relação a/c (água/cimento) pode ter grandes diferenças entre matriz e zona de transição. Quanto maior for o agregado maior será a relação a/c na zona de interface e, por conseguinte, menor será a resistência e maior será a permeabilidade do concreto.

4.2. Concreto no estado fresco e endurecido

4.2.1. Estado fresco

As propriedades do concreto no estado fresco e endurecido afetam diretamente a qualidade do mesmo, podendo definir possíveis imperfeições após a concretagem. No estado fresco pode-se citar que os principais parâmetros são a trabalhabilidade, coesão, exsudação, ar incorporado e segregação (GEYER; SÁ, 2006).

A trabalhabilidade é uma das propriedades mais essenciais do concreto no estado fresco, entretanto ela detém grande influência no produto final. Segundo Neville (2016), um concreto trabalhável é aquele que se pode facilmente adensar, ou seja, deve conter uma trabalhabilidade que proporcione o maior adensamento possível com uma exigência mínima de energia. Outra condição que implica na trabalhabilidade do concreto fresco é a consistência, que pode ser definida como a facilidade em que a massa flui e é determinada através do ensaio de abatimento do tronco cônico (*Slump test*).

Conforme Silva (2005), a segregação é o desmembramento dos elementos de uma mistura heterogênea de modo que não haja mais coesão em sua distribuição, ela pode ser causada pela distinção de tamanho das partículas e das massas específicas dos componentes. A segregação pode ser dificultada ao evitar transportar o concreto por longas distâncias, transferindo-o da betoneira direto para a fôrma.

A exsudação é quando parte da água da mistura sobe para a superfície do concreto que foi recentemente lançado. Isso acontece quando algum constituinte da mistura não consegue reter a água de amassamento, fazendo com que ela se disperse na massa e suba para a superfície, deixando-a úmida e produzindo um concreto mais poroso, menos resistente e sujeito a desintegração. O acabamento da superfície deve ser evitado até que a água de exsudação tenha

evaporado, e deve ser feito com o uso de desempenadeiras de madeira para que se diminuía o risco de empeno na superfície (NEVILLE, 2016).

4.2.2. Estado endurecido

Após ser feita a mistura dos componentes do concreto ocorrem as reações de hidratação resultantes da junção do cimento com a água, originando o gel de cimento. O gel se deposita ao redor dos agregados e ocorre a formação dos cristais que se endurecem após um certo período, tornando-se um material resistente e monolítico que é o concreto endurecido (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

Segundo Andrade e Tutikian (2011), dentre as propriedades do concreto no estado endurecido a resistência mecânica é uma das principais, definida como a capacidade do material em suportar tensões sem sofrer grandes deformações. Alguns fatores influenciam na resistência do concreto, tais como: relação água/cimento, tipo de cimento, forma e graduação do agregado, idade, adições minerais e aditivos. O tipo de resistência mecânica do concreto é referente ao tipo de força aplicada ao mesmo, pode ser de tração, flexão, cisalhamento e compressão. Todavia a mais relevante é a resistência a compressão por ser indispensável no projeto estrutural, é estabelecida através de ensaios conforme a NBR 5738 – Moldagem e Cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto (2016).

De acordo com Pinheiro, Muzardo e Santos (2004), além da resistência a compressão outro aspecto fundamental em um projeto estrutural de concreto é a relação entre as tensões e deformações. O cálculo dessa relação é expresso pela Lei de Hooke (equação 5), na qual resulta-se do módulo de elasticidade. Através do módulo de elasticidade é possível prever o grau de deformação lenta do concreto, a qual depende também da resistência do agregado, é obtido por meio do ensaio da NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (5)$$

onde,

σ = tensão,

ε = deformação específica e

E = Módulo de Elasticidade.

A durabilidade é considerada outro fator importante nas propriedades do concreto endurecido, pois é a sua capacidade suportar e manter suas características em meio a ataques

químicos, físicos e ação de intempéries. A exemplo de ações que diminuem a durabilidade do concreto tem-se os efeitos físicos que causam fissuras ou desgastes na superfície do concreto devido a exposição de temperaturas muito frias ou muito quentes ou devido a cristalização de sais nos vazios da mistura. Os efeitos químicos ocorrem por meio de ataques por sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão de armaduras (HELENE, 1993).

4.3. Fissuras em materiais cimentícios

Denominadas como manifestações patológicas, as fissuras ocorrem em estruturas de concreto quando existem tensões de tração maiores que a resistência do mesmo. Elas podem acontecer no estado fresco e no estado endurecido do concreto e a sua caracterização, como posição na peça e largura, pode conceder o diagnóstico da sua causa (AZEVEDO, 2011).

Segundo Bianchin (2018), a geometria da fissura é um fator que deve ser observado pois quanto maior forem a sua fenda e profundidade, maior será a sua gravidade. Isso acontece devido ao fato de que essas condições favorecem a entrada de água e de agentes agressivos externos. A ocorrência de fissuras algumas vezes torna-se inevitável, e ao possibilitar a entrada de agentes agressivos levam à corrosão da armadura. Em alguns casos, não se pode embargar a estrutura ou ela demonstra ser uma ameaça a vida humana, pensando nisso começaram-se a devolver tecnologias com o uso de micro-organismos para tratar fissuras (REDDY, ACHAL, MUKHERJEE, 2012).

Porém para Helene (1997), o combate a fissuração em obras de concreto protendido ou em obras de controle de líquidos agressivos são mais eficientes. O autor aborda que outros tipos de obras que busquem evitar totalmente a fissuração seria um desperdício da habilidade de resistência das armaduras e geraria custos à obra. Diante de tais questões, com o propósito de permitir a ocorrência de fissuras através do cálculo estrutural, porém com valores limites de aberturas, foram estabelecidas algumas diretrizes como segue na NBR 6118 (2014). A abertura máxima não exceder o valor de 0,4 mm:

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA)	Exigências relativas à fissuração
Concreto simples	I a IV	Não há
Concreto armado	I	$\leq 0,4$ mm
	II e III	$\leq 0,3$ mm
	IV	$\leq 0,2$ mm

Quadro 2: Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura em função das classes de agressividade ambiental.

(Fonte: Adaptado de NBR 6118, 2014)

4.3.1. Classificação de fissuras

As fissuras em materiais cimentícios podem ser classificadas de acordo com alguns critérios como a forma, a abertura, as causas, direção, sobrecargas, tipo, entre outros.

4.3.1.1. Quanto a abertura

Segundo Oliveira (2012), fissuras, trincas e rachaduras são manifestações patológicas provocadas por tensões de tração em materiais frágeis, quando solicita-se um esforço maior do que a sua resistência. O autor classifica as falhas de acordo com as aberturas, contidas no quadro a seguir:

Anomalia	Abertura (mm)
Fissura	Até 0,5
Trinca	De 0,5 a 1,5
Rachadura	De 1,5 a 5,0
Fenda	De 5,0 a 10,0
Brecha	Acima de 10,0

Quadro 3: Espessura da abertura e sua classificação

(Fonte: Adaptado de Oliveira, 2012).

4.3.1.2. Quanto a atividade e a forma

As fissuras podem ser classificadas de acordo com a atividade que exercem nas estruturas, como ativas ou passivas. Para Duarte (1998) as fissuras ativas são as que apresentam mudanças na sua abertura e comprimento de acordo com as suas condições. Podem ser causadas por variações térmicas diárias ou sazonais, retrações por secagem ou hidráulicas, cargas dinâmicas, corrosão de armaduras e através de recalques de fundação, por exemplo.

Já as fissuras passivas são aquelas consideradas estabilizadas, não apresentam variação de abertura e comprimento ao decorrer do tempo. Suas possíveis causas são solicitações externas constantes, sobrecargas, retração química e movimentação das formas (FIGUEIREDO, 1989).

Quanto à forma, Duarte (1998) divide as fissuras em dois tipos: isoladas e disseminadas. O primeiro diz respeito àquelas que prevalecem em uma única direção, seguindo as juntas de argamassa ou fragmentando componentes, acompanhando fiadas horizontais e verticais. As disseminadas são mais recorrentes em revestimentos e aparecem em um formato de rede de fissuras. Seguem algumas figuras que exemplificam esses tipos de fissuras:

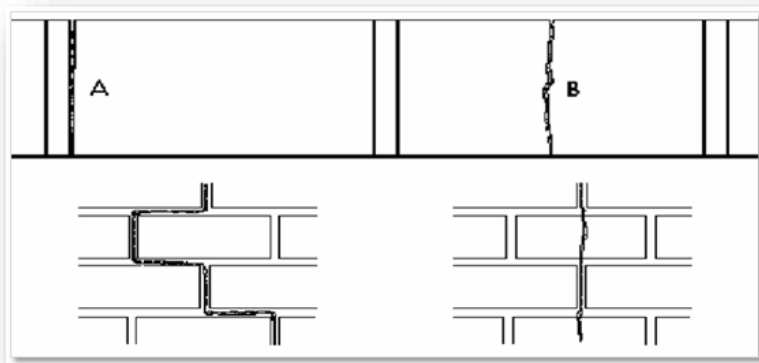


Figura 5: Fissuras isoladas.

(Fonte: ELDRIDGE, 1982)



Figura 6: Fissuras isoladas
(Fonte: SAHADE, 2020)



Figura 7: Fissuras disseminadas
(Fonte: SAHADE, 2020).

4.3.2. Causas de fissuras em materiais cimentícios

O concreto possui resistência a tração cerca de dez vezes menor que sua resistência a compressão, com isso as fissuras são causadas em sua maioria devido a esforços de tração, porém suas causas podem ocorrer por diversas formas. Thomaz (1989) cita algumas causas:

- a) Por sobrecargas;
- b) Por variações de temperatura e umidade;
- c) Por retração e expansão;
- d) Por deformação de elementos estruturais do concreto;
- e) Por recalques de fundações;
- f) Por reações químicas;
- g) Por falhas em detalhes construtivos.

4.3.2.1. Fissuras causadas por sobrecargas

A ação de sobrecargas pode acarretar fissuras em elementos estruturais como vigas, pilares e paredes. Alguns fatores interferem na resistência final do concreto e na fissuração de tais componentes estruturais, são eles: a forma, seção transversal e esbeltez da parede; o tipo, forma, módulo de deformação, resistência mecânica, porosidade e rugosidade dos componentes; aderência, retração, retenção de água e módulo de elasticidade da argamassa; tipo e espessura da junta de assentamento, bem como as técnicas construtivas de execução (MASSETO; SABBATINI, 1998).

De acordo com Thomaz (1989), a ação de sobrecargas distribuídas na alvenaria pode causar dois tipos de fissuras: horizontais e verticais. As verticais ocorrem devido ao excesso de tensões de compressão, quando a interface entre o elemento de alvenaria e a junta de argamassa sofre uma tração transversal. Isso acontece porque a argamassa possui deformações maiores que as dos componentes, por causa disso ela se deforma transversalmente, e em virtude da aderência entre eles resultam-se as tensões horizontais de tração na interface, promovendo as fissuras verticais como na Figura 8:

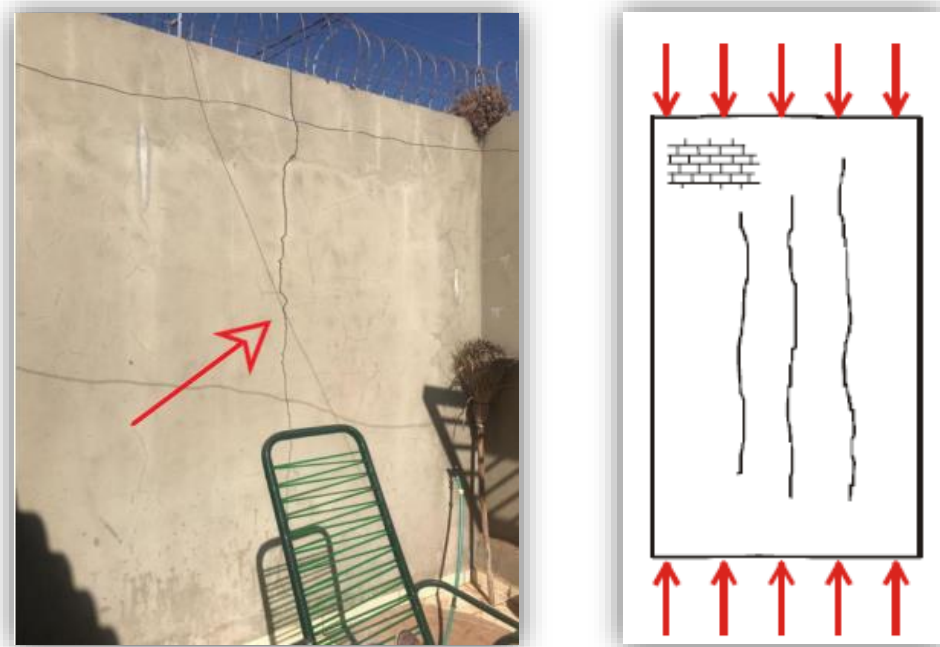


Figura 8 : (a) Fissura vertical. (b) Fissuras verticais por sobrecargas. (Fonte: CAMARGO; ARANTES; SILVA, 2019. DUARTE, 1998).

As fissuras horizontais em razão das sobrecargas (Figuras 9 e 10) se dão pela excessiva tensão de compressão dos componentes da alvenaria, blocos de furos horizontais ou da argamassa, ou ainda por possíveis solicitações de flexocompressão que podem ser provocadas por carregamentos incomuns, manifestando-se na face tracionada ou na face comprimida, por meio de ruptura dos elementos. Desse modo, fatores como a qualidade e resistência dos materiais que compõem a alvenaria são determinantes para que ocorra ou não a ruptura (SAHLIN, 1971).

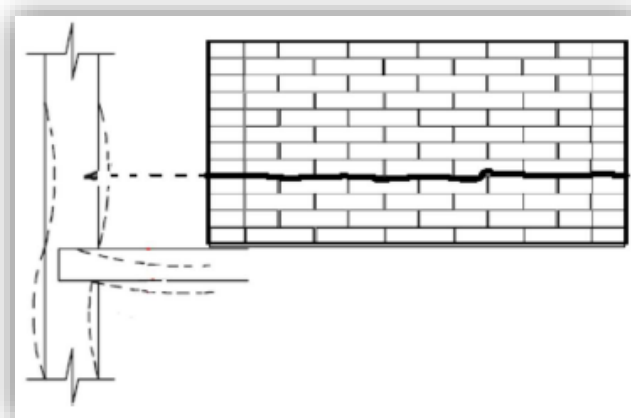


Figura 9: Fissuras horizontais derivadas de sobrecarga ou flexocompressão.
(Fonte: ALEXANDRE, 2008)



Figura 10: Fissura horizontal.
(Fonte: FREITAS; FRANÇA; FRANÇA, 2013).

4.3.2.2. Fissuras causadas por variações de temperatura e umidade

Segundo Duarte (1998), são comuns os fenômenos de contração e dilatação dos materiais de construção em razão da variação térmica. De acordo com Bianchin (2018) a retração térmica está associada a eventos naturais e a relação da estrutura com o ambiente em que ela se encontra. A umidade e a temperatura podem causar alteração do volume de concreto, quando ele se retrai acaba sofrendo uma restrição de movimento ao se deformar, promovendo as fissuras.

Bianchin (2018) ainda cita que as variações de temperatura e umidade nas idades iniciais do concreto estão ligadas principalmente ao seu processo de hidratação, sendo as fissuras por variação de umidade provocadas pela perda de água do concreto para o ambiente e as fissuras por variação térmica causadas pela perda de calor das reações de hidratação. Segundo Thomaz (1989) as fissuras por variações térmicas são causadas pela desproteção das estruturas à fatores ambientais sucessivos que causam a fadiga do material e pela movimentação diferenciada, resultante da união de elementos que possuem coeficientes de dilatação térmica desiguais.



Figuras 11 (a), (b): Fissuras causadas por retração térmica.

(Fonte: GIORDANI, 2016)

Dessa maneira, as partes mais expostas da estrutura, como as lajes de cobertura e paredes externas, estão mais suscetíveis à fadiga pois aquecem durante o dia e resfriam durante a noite, promovendo os mecanismos de dilatação e contração do material. Os reparos para tais tipos de manifestações patológicas são difíceis e caros, pois as fissuras tornam-se recorrentes em alguns pontos da estrutura dadas as condições cíclicas.

4.3.2.3.Fissuras causadas por retração e expansão

O fenômeno de retração acontece quando após a pega, o concreto entra em contato com o ambiente e perde suas dimensões por meio de capilaridade, sem o envolvimento de cargas externas, fazendo com que ele se contraia e promova tensões de tração, levando a fissuração (ROMANO, 2004).

Para Magalhães (2004) as fissuras causadas por retração e expansão são acontecimentos diferentes. Sendo a primeira originada pelo deslocamento dos componentes construtivos ou devido a produtos à base de cimento. Já a fissura por expansão se dá pela movimentação dos elementos construtivos devido a absorção de umidade.

A retração em produtos à base de cimento surge por meio de fatores (THOMAZ, 1989) como:

- a) A composição química e a finura do cimento, pois quanto mais fino for o cimento maior será a retração e maior será a aglomeração de cloretos e álcalis;
- b) A quantidade de cimento na mistura, pois quanto maior for a adição, mais retrairá;
- c) Módulo de deformabilidade do agregado, pois quanto menor ele for, maior será a chance de retração;
- d) Granulometria do agregado, pois quanto mais fino for, demandará mais pasta de cimento devido ao maior número de vazios, implicando em maior retração;
- e) Cura incorreta.

A retração geralmente tem maior ocorrência em concreto novo pois, conforme o concreto envelhece, ele ganha resistência e diminui esse efeito. Valle (2008) aborda as três maneiras em que a retração pode ocorrer em produtos com cimento:

- a) Retração por secagem: quando há água em excesso na massa, ela fica livre no interior da mistura, evapora mais tarde;
- b) Retração química: quando a reação química de hidratação do cimento acarreta em perda de volume do concreto;
- c) Retração por carbonatação: quando a cal hidratada é liberada durante a reação de hidratação e entra em contato com o gás carbônico, produzindo carbonato de cálcio.



Figuras 12 (a), (b): Fissuras de retração por secagem.
(Fonte: CORSINI, 2010; SAHADE, 2020)

4.3.2.4. Fissuras causadas por deformação de elementos estruturais

Para Braga (2010) é necessária uma análise mais brusca sobre as deformações que acontecem nas estruturas de concreto. Elementos estruturais como vigas e lajes se deformam devido a ação de cargas como o peso próprio, cargas acidentais e permanentes, e também pela retração e deformação do concreto. Transtornos como a compressão de caixilhos, retenção de água em lajes ou em vigas-calha, deslocamento de revestimento cerâmico e fissuras em paredes, acontecem quando há ocorrência de flechas em elementos fletidos. Os membros estruturais podem consentir flechas que não prejudiquem a aparência e a estabilidade da construção, mas que podem não ser compatíveis com a tolerância de deformação das paredes ou outros componentes da obra.

A norma brasileira NBR 6118 (2014) estipula as flechas máximas para as vigas e lajes, em função do comprimento do vão. A norma cita que para flechas medidas a partir do plano que abrange os apoios não deverão ultrapassar $1/300$ do vão teórico, exceto quando há balanço, neste caso não deverão ser superiores a $1/150$ do seu comprimento teórico. O deslocamento provocado por cargas acidentais não deve ser maior que $1/500$ do vão teórico e $1/250$ do comprimento teórico dos balanços.

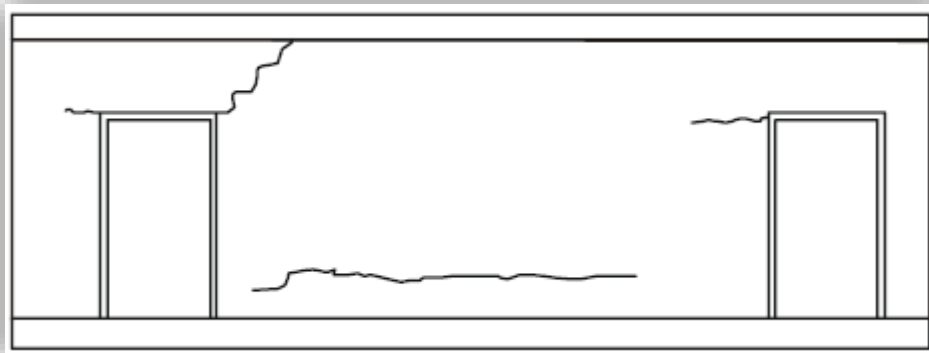


Figura 13: Fissuras em parede causadas por deformação estrutural.

(Fonte: THOMAZ, 1989)

De acordo com Duarte (1998) e Thomaz (1989), as fissuras que são causadas por deformação estrutural podem se apresentar de diversas formas, como por exemplo: em forma de arco por deformação de vigas de apoio, forma inclinada por deformação de vigas de apoio, superior e lajes em balanço, fissuras horizontais causadas pela deformação de lajes de coberturas, entre outras.

4.3.2.5. Fissuras causadas por recalques de fundações

Segundo Muci, Netto e Silva (2014) os solos são acometidos por deformações em seu conjunto estrutural, fazendo com que o número de vazios diminua em virtude da compressão eminente. Tais deformações no solo promovem a movimentação das fundações, tornando-se essencial o estudo do mesmo para discernir a ação dos vários tipos de fundações, bem como a capacidade de carga e deformação do solo.

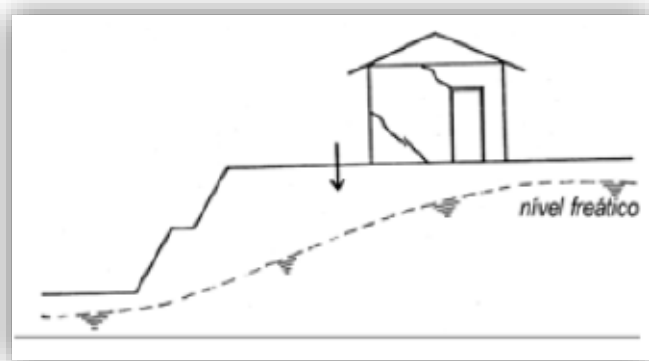
Para Oliveira (2012), o recalque de fundações pode ser definido como o movimento vertical para baixo ocasionado na base da fundação, que sucede a deformação do solo, resultante das cargas sofridas pela fundação. Isso faz com que o solo se adense, gerando um rebaixamento da edificação. Caso esse fenômeno ocorra em apenas um trecho da edificação provoca o que é chamado de recalque diferencial, que é a relação entre a diferença dos recalques de dois pontos e a sua distância.

A capacidade de deformação do solo não é constante e depende de fatores como: tipo e estado do solo, rebaixamento do lençol freático, intensidade da carga, influência de carga do entorno e fundações vizinhas, tipo de fundação e cota de apoio, entre outros (BRAGA, 2010). O recalque propaga tensões na alvenaria favoráveis ao aparecimento de fissuras devido a

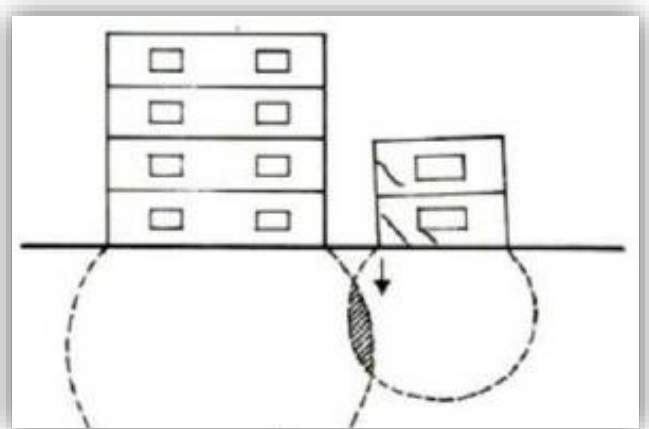
distorção angular ou flexão (MAÑÁ, 1978), motivado por diversos aspectos: recalque devido a fundação assentada diretamente em seção de corte e aterro (Fig. 14 – a), recalque ocasionado pelo rebaixamento do lençol freático promovido por grandes escavações (Fig. 14 – b), recalque no prédio menor causado pela interferência no seu bulbo de tensões por causa da construção do prédio vizinho (Fig. 14 – c).



(a)



(b)



(c)

Figura 14 (a), (b), (c): Fissuras causadas por recalque de fundação.

(Fonte: SILVA, 1998; SILVA, 1998; THOMAZ, 1989).

4.3.2.6. Fissuras causadas por reações químicas

Segundo Vieira (2017) o concreto pode ser acometido por reações expansivas ligadas aos agregados ou por meio do ataque de sulfatos. A fissura ocorre quando, durante essa reação, se forma um produto com volume maior que o vazio que o originou, essa expansão acaba comprimindo o meio ao redor e provoca a fissuração do concreto. Os três tipos de reações mais comuns são a hidratação retardada de cales, o ataque por sulfatos e a corrosão de armaduras.

Elementos que contenham cales mal hidratadas podem apresentar altos teores de óxidos livres, que em presença de umidade tendem a se hidratar. Conseqüentemente tal reação leva a um aumento de volume de aproximadamente 100%, desta forma a expansão favorece o aparecimento de fissuras (ZANZARINI, 2016). Também a hidratação de agregados que possuem argilo-minerais montmoriloníticos pode promover a expansão da argamassa (CINCOTTO, 1988).

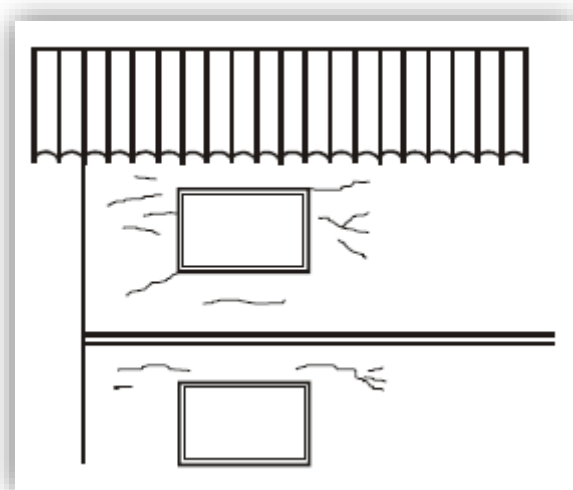


Figura 15: Fissuras por expansão da argamassa, causadas por reações químicas.

(Fonte: DUARTE, 1998)

O ataque por sulfatos acontece quando o ambiente tem uma concentração significativa de sulfatos e o concreto tenha porosidade o bastante para que eles penetrem. Alguns ambientes propícios para a reação são: solos argilosos, água do mar, ambientes de esgoto e lençol freático contaminado por pesticidas (VIEIRA, 2017). De acordo com Braga (2010), o ataque por sulfatos efetua-se por meio da sua reação com o aluminato tricálcico presente no cimento, que resulta em sulfoaluminato ou etringita, sucedendo-se de uma expansão que leva a fissuração. Para isso precisa-se de cimento, água e sulfatos solúveis.

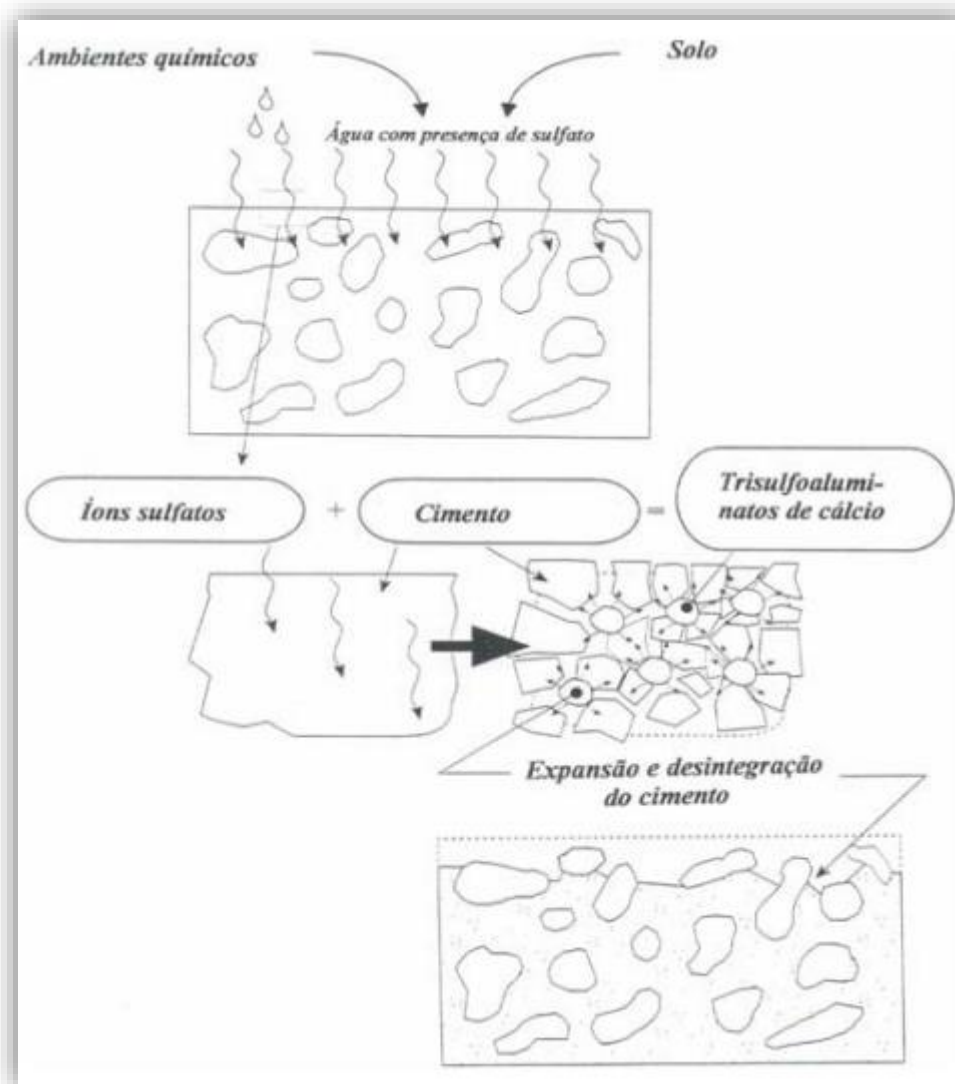


Figura 16: Esquema de desintegração do concreto causada pelo ataque de sulfatos.

(Fonte: EMMONS, 1993 *apud* AGUIAR, 2006)

Ainda conforme Braga (2010) quanto maior a porosidade do concreto, mais favorável é a entrada de agentes agressivos como os sulfatos, cloretos e oxigênio, que colaboram para o efeito de corrosão das armaduras. A presença de armaduras perto da superfície, cobrimento insuficiente e concreto mal adensado são condições que contribuem para a presença de água e ar nas armaduras, desencadeando a corrosão. Esse comportamento faz com que seja produzido o óxido de ferro, expandindo o concreto e o fissurando.



Figura 17: Fissuras causadas pela expansão de óxidos produzidos pela corrosão.

(Fonte: AGUIAR, 2006)

4.3.2.7. Fissuras causadas por falhas em detalhes construtivos

Magalhães (2004) aborda que as fissuras causadas por detalhes construtivos decorrem de erros durante a execução dos mesmos, quando se desconsideram parâmetros fundamentais como: as propriedades físicas de materiais diferentes em contato, impermeabilidade e estanqueidade da construção, projeto de detalhamentos, entre outros. Entre as causas de fissuração encontram-se algumas falhas: elementos metálicos e elementos de madeira fixados em paredes, falta ou má execução de amarrações, tubos mal dimensionados, defeito de assentamento e na espessura da argamassa, entre outros.

A movimentação de elementos construtivos pode ocorrer por meio da dilatação térmica ou da expansão por umidade de alguns materiais de madeira ou metálicos, apoiados em paredes. Dessa maneira, as tensões são propagadas na alvenaria, permitindo o aparecimento de fissuras, como é o caso das tesouras de madeira engastadas diretamente na alvenaria, Figura 18 (DUARTE, 1998).

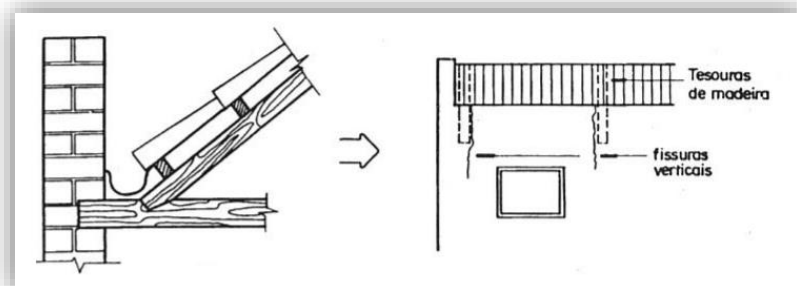


Figura 18: Fissuras causadas pela dilatação das tesouras de madeira no telhado.

(Fonte: DUARTE, 1998)

As fissuras estimuladas pelas deficiências de amarração aparecem por meio de deslocamentos relacionados a variações térmicas, retração, recalque e outros, no momento em que a solicitação dada pela movimentação atinge o plano de incapacidade da amarração (MAGALHÃES, 2004).

4.4. Autocicatrização do concreto

A autocicatrização em materiais cimentícios pode ser dividida basicamente em dois tipos: a autocicatrização autógena (natural do concreto) e a autocicatrização autônoma. A principal diferença entre os dois tipos é que o autógeno acontece por meio do próprio processo de hidratação e por componentes que já são utilizados convencionalmente como é o caso da adição das pozolanas (cinzas, sílicas e escórias). O autônomo se dá pelo uso de novos materiais não convencionais para aumentar a capacidade de cicatrização (BIANCHIN, 2018).

A habilidade do concreto em cicatrizar suas fissuras é conhecida há muitos anos e no passado existiu uma série de pesquisas dedicadas a cicatrização autógena. Porém é válido destacar que este tipo de cicatrização é algo secundário pois possui limitações de eficácia, restringindo-se apenas a pequenas fissuras estáticas. Além de ter um grau de confiabilidade bem menor, visto que ela depende em grande parte das reações de hidratação do cimento. Devido a isto já existem alguns avanços que objetivam ampliar tal capacidade (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). Nesse tipo de processo verifica-se um mecanismo de cicatrização próprio do concreto, que acontece naturalmente quando fissuras de até no máximo 0,2 milímetros são preenchidas pelos produtos de hidratação residual do cimento Portland. Através da fissura a água penetra no concreto e alcança a porção anidra do cimento, estimulando sua hidratação. A partir daí os produtos hidratados como o C-S-H (cálcio hidratado) e o CH (hidróxido de cálcio) se acumulam entre as paredes da fissura, provocando seu fechamento. Se houver presença de dióxido de carbono, os álcalis da carbonatação também promoverão a cicatrização das falhas (EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017). Esse tipo de regeneração depende de fatores como relação água-cimento, condições ambientais, cura, tipo de cimento, idade do concreto e o tamanho das falhas.

Segundo Bianchin (2018), no que diz respeito à cicatrização autônoma os estudos se estendem às áreas dos materiais poliméricos, mecânica dos fluídos e da biologia, em que o material é desenvolvido com o propósito do auto reparo. Nesse caso o aumento da capacidade de autocicatrização acontece por meio da incorporação de materiais que limitam as falhas ou

através de agentes que retenham a umidade próximo às fissuras, bem como o uso de polímeros, aditivos expansivos e bactérias.

A tecnologia dos concretos autocicatrizantes foi empregada nas concretagens da laje de subpressão do Museu da Imagem e do Som (M.I.S), em Copacabana (RJ) e na cobertura fluida do Museu de Arte do Rio (M.A.R), Rio de Janeiro. O M.I.S. (Fig. 19-a) é um ícone arquitetônico localizado a 50,0 m da orla marítima, ele foi projetado para a elaboração de dois subsolos abaixo do nível do mar e necessitou de técnicas especiais para sua laje de subpressão estanque, contendo 1200 m³ de concreto e espessura de 1,0 m de altura, com adição de sílica ativa e aditivo impermeabilizante por cristalização integral com propriedade de autocicatrização de fissuras (Fig. 19- b) (BRITTEZ *et al.*, 2013). Para a construção da cobertura fluida do M.A.R. foi utilizado um concreto autocicatrizante com volume de 320m³ contendo adição de fibras sintéticas, sílica ativa e agente cristalizante para garantir a durabilidade da estrutura em um ambiente marinho agressivo, e relação água/aglomerante de 0,45 (Fig. 19-c). A Figura 19-d exemplifica também outra obra com aplicação da tecnologia, a reforma Estádio Governador Magalhães Pinto, em Belo Horizonte (Fig. 19-d).



Figura 19 - Obras em que foram usados concretos autocicatrizantes: **(a)** Projeto arquitetônico da Sede do Museu da Imagem e do Som (M.I.S.) - RJ; **(b)** Laje de subpressão do M.I.S. finalizada. (Fonte: BRITTEZ *et al.*, 2013); **(c)** Museu de Arte do Rio de Janeiro – RJ (Fonte: DUVIVIER; SANSON, 2013); **(d)** Estádio Magalhães Pinto– MG (Fonte: MINEIRÃO, 2012).

No quadro 4 pode-se observar os diferentes tipos de agentes cicatrizantes relatados na literatura, eles variam em termos da condição de tempo e tipo de cura necessária. Nos capítulos seguintes serão abordados alguns métodos de autocicatrização autógena e autônoma.

Agente cicatrizante	Nº de componentes		Viscosidade (mPa.s)	Agente de cura	Tempo de cura	Expansivo		Resistência (MPa)
	1	> 2				Sim	Não	
Catalisador cristalino	√		-	Umidade+ CO2	21 dias	√		-
Cianoacrilato	√		< 10	Umidade	Segundos		√	20
Epóxi	√		250-500	Umidade e ar	<100 min.		√	25
Epóxi		√	80-360	Contato	30 min – 1h		√	45
Metil Metacrilato	√		-	Calor	-		√	-
Metil Metacrilato		√	1-34	Contato	30 min – 1h		√	50-75
Silicone	√		-	Ar	-		√	-
Poliuretano	√		7200	Umidade	40-80 min	√		-
Poliuretano		√	600	Contato	500-300s	√		-
Poliacrilato		√	7	Contato	40s		√	-
Óleo de tungue	√		-	Ar	-		√	-
Solução alcalina de sílica	√		-	Ar	-		√	-
Solução de Ca(OH)2	√		-	CO2 do ar	-		√	-
Solução de NaSiO3	√		-	Ca(OH)2	-		√	-
Solução de NaFPO3	√		-	Hidratação	28 dias		√	-
Solução de Ca(NO2)2	√		-	Matriz	-		√	-
Poliuretano + bactérias		√	600	Contato	-	√		-
Solução bacteriana	√		-	Água+ CO2	100 dias		√	-

Quadro 4: Agentes cicatrizantes que têm sido relatados na literatura

(Fonte: Adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013)

4.4.1. Cicatrização autógena por colmatação natural

O concreto é um material que se difere dos outros pois consegue manter reservas de partículas de cimentos não hidratados, que por sua vez atuam na auto reparação. Ao entrar em contato com a água, as reservas do cimento reagem e preenchem pequenas fissuras de forma natural (LV; CHEN, 2013). Por causa desse acontecimento, conhecido como colmatação natural do concreto, a infiltração de água nas fissuras se reduz progressivamente ao longo do tempo. Estudos químicos feitos nas superfícies de fissuras colmatadas mostraram em sua totalidade o aparecimento de cristais de CaCO_3 (carbonato de cálcio), determinando dessa maneira como uma causa particular da colmatação autógena e caracterizando o selamento total da fissura em alguns casos (EDVARDSEN, 1999).

Apesar de existirem diversas opiniões sobre os mecanismos de colmatação natural do concreto, o que todos autores concordam é que a água é o elemento fundamental para que ela aconteça. Além da hidratação residual das partículas de cimento anidro, existem também outras causas que podem levar a esse tipo de cicatrização, como segue na Figura 20.

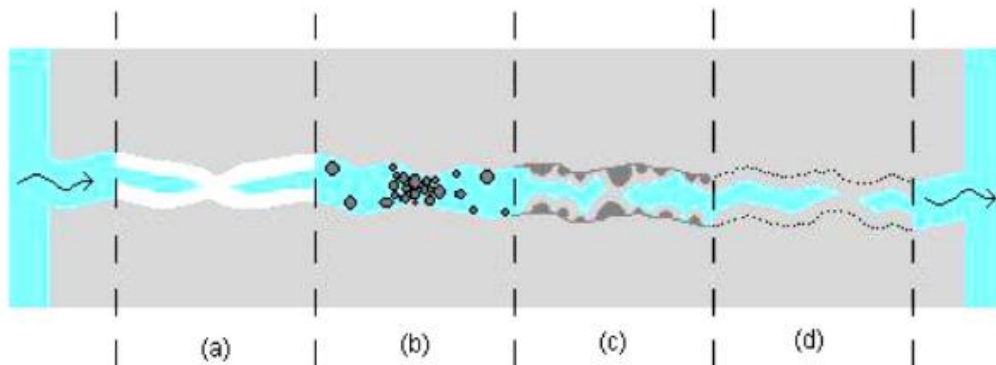
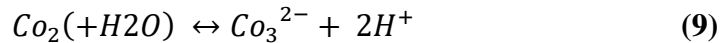
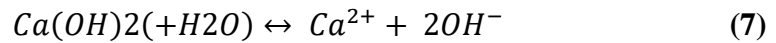


Figura 20: Mecanismos de colmatação natural do concreto.

(Fonte: TER HEIDE, 2005)

Os mecanismos de colmatação autógena que podem ser observados na Figura 20 são apontados por Ter Heide (2005). O processo (a) indica a formação do hidróxido de cálcio proveniente das reações de hidratação do cimento (Equação 9). Ele é conduzido pela água até chegar no interior das fissuras, onde se deposita nas paredes da mesma. Ocorre também a formação do carbonato de cálcio (Equação 8) devido à ação conjunta do gás carbônico e umidade (Equação 9). A parte (b) caracteriza a deposição de impurezas transportadas pela água ou partículas provenientes das paredes da fissura. Em (c) têm-se a hidratação tardia dos grãos de cimento anidro que não foram hidratadas no momento da mistura do concreto, e a formação

dos cristais hidratados que preenchem as fissuras. Em (d) indica o tamponamento quando ocorre expansão da matriz de cimento ao expor constantemente a estrutura à umidade.



Alguns mecanismos citados acima podem ocorrer simultaneamente, gerando incerteza sobre qual predomina. Entre os mecanismos (a), (b) e (d), por exemplo, a carbonatação (a) é o que tem maior influência se acontecerem junto (EDVARSEN, 1999).

4.4.2. Cicatrização autógena pelo uso de adições minerais

Para intensificar a autocicatrização do concreto é importante utilizar técnicas que possibilitem reduzir o consumo das partículas de cimento nas idades iniciais. Algumas maneiras de obter isso é empregar: uma baixa relação água/cimento, cimentos com área específica menor (grãos maiores) e aluminossilicatos (cinzas volantes, escórias de alto forno, sílica ativa) (LI *et al.*, 2013).

A substituição parcial do cimento por adições minerais tem sido uma prática muito comum, uma vez que leva à redução de custos e impactos ambientais, pois a fabricação dessas adições exige menos energia e elas emitem menos CO₂ que o cimento Portland, além de melhorar algumas propriedades do concreto. Segundo Li *et al.* (2013) o uso de aluminossilicatos (ou pozolanas), como as cinzas volantes e escórias de alto forno, é bastante significativo pois é capaz de melhorar a autocicatrização em materiais que sofreram danos repetitivos ao longo de muitos anos.

Embora exista o efeito positivo na hidratação das partículas ao longo do tempo, os concretos com escórias de alto forno são vulneráveis ao efeito de carbonatação devido a sua alta permeabilidade ao CO₂ (gás carbônico) e ao fraco teor de hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂). Todavia, o baixo teor de Ca (OH)₂ e um concreto que tenha poros refinados com escória de alto forno pode colaborar para uma maior resistência química (DE BELIE; VERSELDER, *et al.*, 1996).

A Figura 21 mostra o processo de cicatrização promovida pelas pozolanas incorporadas ao concreto durante um período 28 dias à 40°C, podendo-se conferir o reparo total da fissura, demonstrando o alto potencial de cicatrização das pozolanas. O resultado foi o selamento de fissuras de até 0,4mm aos 28 dias (JCI - TC075B, 2009).

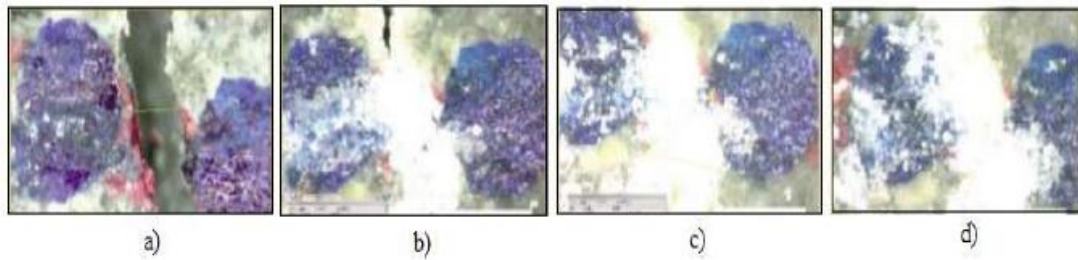


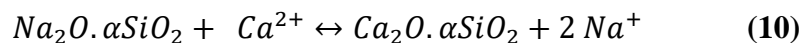
Figura 21- Autocicatrização de fissura de 0,4mm em concretos com cinza volante: **(a)** Aspecto da abertura da fissura aos 7 dias; **(b)** Cicatrização da fissura aos 14 dias; **(c)** Fissura totalmente colmatada aos 28 dias; **(d)** Aspecto da fissura aos 60 dias.

(Fonte: JCI - TC075B, 2009).

4.4.3. Cicatrização autônoma pelo uso de catalisador cristalino

O catalisador cristalino é um material cimentício sintético em solução com sílica reativa ($MgSiF_6$) que age consumindo o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) para formar, em presença de umidade suficiente, cristais que desagregam os poros e tamponam as fissuras do concreto. Ele atua como um impermeabilizante cristalizante hidrofílico (SISOMPHON, COPUROGLU, KOENDERS, 2012), essa tecnologia foi aplicada durante o tratamento de retirada de resíduos de radioatividade no Japão (Césio 137) e para impermeabilizar pontes e túneis das linhas de trem-bala.

O sistema do catalisador cristalino (Cat X) funciona através de uma troca de cátions de cálcio (Ca^{2+}) e cátions de sódio (Na^+), descrito na Equação 10 (KURAMOTO; NAKAMURA; SHIMAMURA, 1992). A Figura 22 caracteriza as reações de cristalização resultantes da utilização do catalisador cristalino disperso em água, através da troca catiônica na qual se formam os quelatos $Ca:[Cat X]$ a partir de $Na:[Cat X]$. Essa interação depende dos níveis de cálcio (Ca^{2+}) livre na solução (KURAMOTO; NAKAMURA; MATSUDA, 1996).



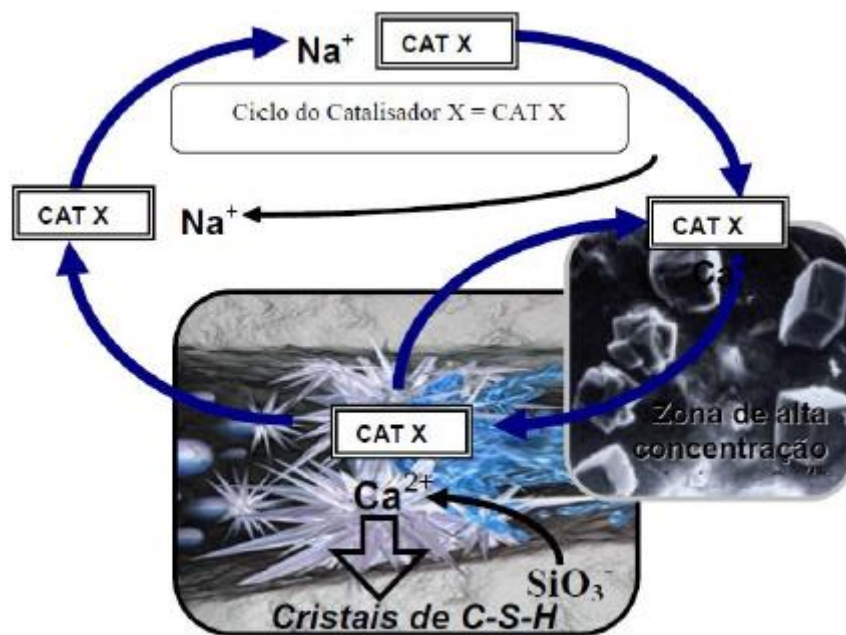


Figura 22: Formação de cristais de C-S-H pelo uso do catalisador cristalino.

(Fonte: TAKAGI; KURAMOTO; SHIMIZU, 1996)

O produto da interação do catalisador cristalino é a formação de cristais de etringita, hidróxido de cálcio, C-S-H e carbonato de cálcio. A principal vantagem do Cat X é a formação de cristais insolúveis nos poros do concreto, que por sua vez além de tamponá-los atua também no preenchimento de pequenas fissuras, diminuindo a permeabilidade do concreto. Para Li *et al.* (2004) o uso desses produtos gera um aumento de resistência à compressão devido ao efeito fíler, provocando o fechamento dos poros, e juntamente com a hidratação do cimento estimula a melhoria da microestrutura da pasta de cimento.

4.4.4. Cicatrização autônoma por adição de fibras

A fim de aumentar a capacidade autocicatrizante do concreto são incorporadas fibras de acetato de polivinila (PVA), carbono, vegetais e até mesmo metálicas. Porém a cicatrização deste tipo de concreto ocorre de forma semelhante ao concreto convencional através da formação de compostos hidratados e carbonatados no interior das fissuras (Figura 23).



Figura 23: Autocicatrização com fibras de PVA

(Fonte: REPETTE, 2011)

As fibras também servem como superfície para a formação dos cristais de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e do C-S-H, permitindo uma cicatrização mais rápida das fissuras. Procura-se restringir a abertura das fissuras com o intuito de reduzir a quantidade de produtos de colmatação. A escolha das fibras e a sua quantidade devem ser suficientes para restringir o limite da abertura das fissuras em 0,1 mm (REPETTE, 2011).

As fibras de aço, de polipropileno (PP), de nylon (PE) e de polivinila (PVA) foram estudadas e comparadas por Homma *et al.* (2009) no que diz respeito a sua eficiência. As de PVA foram a que tiveram maior êxito na capacidade cicatrizante devido ao fato de promoverem o depósito de produtos da cristalização, induzindo íons cálcio.

4.4.5. Cicatrização autônoma por encapsulamento

Na autocicatrização por encapsulamento são inseridas cápsulas contendo agentes ligantes junto à mistura de concreto. Quando ocorre a fissura essas cápsulas se rompem e o agente cicatrizante é liberado, ocorrendo a reação e possibilitando o reparo da manifestação patológica. É de extrema importância que a distribuição das cápsulas seja uniforme. Para que o reparo aconteça as cápsulas devem ser frágeis o suficiente para se romperem ao longo da fissura (Figura 24). Elas também devem ser resistentes aos álcalis e devem manter a estabilidade dos agentes que conduzem (EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017).

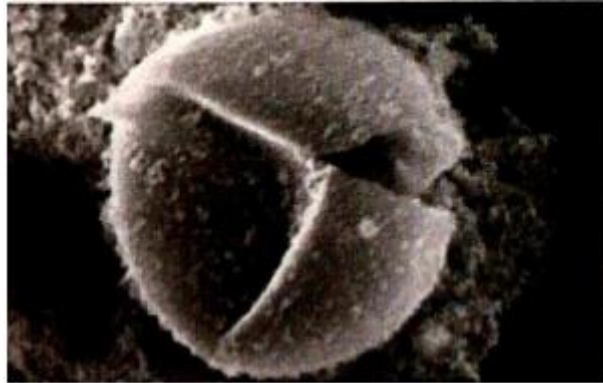


Figura 24: Ruptura de cápsula de polímeros para liberação do agente cicatrizante.

(Fonte: REPETTE, 2011)

Ainda segundo Euzébio, Alves e Fernandes (2017), os agentes cicatrizantes encapsulados constituem-se de polímeros a base de poliuretano e epóxi, e de agentes cristalizantes (o silicato de sódio é o mais utilizado). Os sistemas vasculares são bem semelhantes exceto pelo seu formato alongado das cápsulas, podendo ser de fibras de vidro ocas ou outro material cicatrizante (Figura 25).

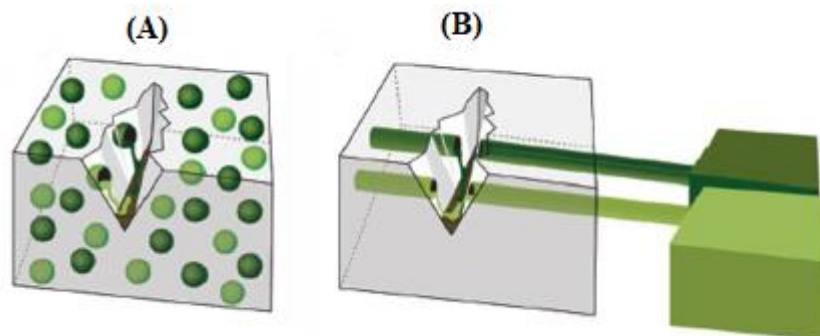


Figura 25: Cicatrização autônoma com cápsulas (A) e sistemas vasculares (B), contendo agentes cicatrizantes.

(Fonte: Adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

Esse sistema inovador já desperta grande interesse no mercado, especialmente para as indústrias de cerâmica, vidro e revestimentos poliméricos, que são uns dos materiais mais utilizados como cápsulas para os elementos cicatrizantes.

4.4.6. Cicatrização autônoma por uso de bactérias

A introdução de bactérias para reparo de estruturas de concreto vem sendo estudada por alguns pesquisadores e este método pode ser uma nova realidade num futuro próximo. Conhecido como concreto microbial ou bioconcreto, é feito a partir de micro-organismos que

são encontrados naturalmente em temperatura ambiente. Os micro-organismos utilizados na literatura não são patogênicos e muito menos nocivos ao meio ambiente. Ao contrário do cimento, os solos e terras contaminadas por essas bactérias podem ser inclusive tratados por elas, uma vez que elas podem atingir o solo e se reproduzirem.

Segundo Jonkers (2011), a cicatrização do bioconcreto ocorre por meio de um agente de auto cura formado por bactérias do gênero *Bacillus*, fósforo, nitrogênio e nutrientes compostos de cálcio, o lactato de cálcio. Elas são adicionadas junto a mistura do concreto, produzindo calcário de forma biológica para reparar as fissuras que surgirem.

A expectativa segundo os estudos do mesmo autor é que essas bactérias podem conservar-se dormentes dentro do concreto por até 200 anos, suportando inclusive ambientes altamente alcalinos. A ativação das bactérias acontece quando ocorrem danos nas estruturas em que a água penetra nas fissuras. Ao entrar em contato com a água e com os nutrientes, os esporos das bactérias se difundem e começam a reagir, se alimentando dos nutrientes que são os lactatos de cálcio, produzindo a Calcita (CaCO_3). Durante esse processo o oxigênio é consumido e o lactato de cálcio, que é solúvel, é transformado em calcário insolúvel, o qual se solidifica nas paredes da fissura fazendo o seu reparo (Figura 26).

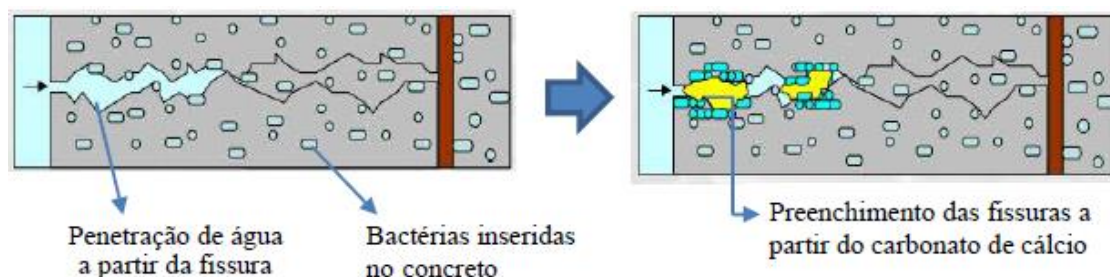


Figura 26: Esquema do processo de autocura em bioconcreto

(Fonte: JONKERS, 2011).

O autor ainda aborda que o consumo do oxigênio durante a transformação bacteriana do lactato de cálcio em calcário gera uma grande vantagem, isso porque o oxigênio, que é um elemento fundamental na corrosão de armadura, é consumido durante o processo. Dessa maneira acaba contribuindo para maior durabilidade das estruturas de concreto armado.

Na pesquisa desenvolvida por Jonkers (2011) aborda que as bactérias e nutrientes a base de lactato de cálcio são implantados em esferas de argilas expandidas e separados por 4,0 mm de largura, de maneira que possa garantir que somente após acontecer a fissuração a água carregará o lactato de cálcio até as bactérias para ativá-las (Figura 27).

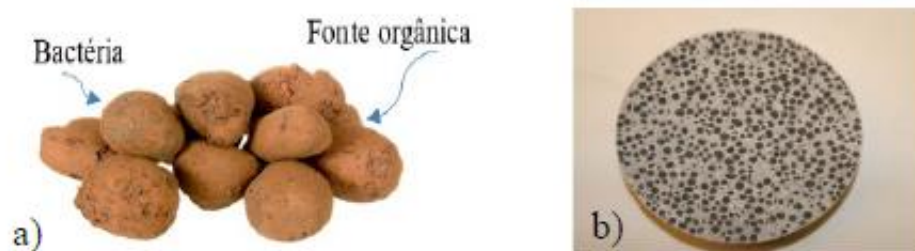


Figura 27: (a) Esferas de argila expandida, compostas por bactérias e fonte orgânica; (b) Aparência final do concreto, as partes escuras são as argilas expandidas constituídas de esporos bacterianos e de nutrientes.

(Fonte: JONKERS, 2011)

É válido destacar que este novo recurso natural e renovável pode trazer enormes benefícios para a indústria da construção civil, revolucionando processos construtivos e pode ser uma saída para os problemas geotécnicos e ambientais (REDDY, ACHAL, MUKHERJEE, 2012). As possíveis aplicações do concreto microbial na engenharia consistem no melhoramento da durabilidade dos materiais cimentícios, reparo de fissuras, reparos em monumentos de calcário e na fabricação de tijolos altamente duráveis. Algumas das bactérias abordadas na literatura e sua aplicação seguem no Quadro 5 abaixo (VEKARIYA, PITRODA, 2013).

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

Quadro 5: Algumas bactérias e sua aplicação na construção civil.

(Fonte: VEKARIYA, PITRODA, 2013)

5. APLICAÇÕES/ ESTUDOS SOBRE CONCRETO AUTOCICATRIZANTE

C. Dry foi a primeira pesquisadora a introduzir o conceito das propriedades autocicatrizantes no concreto, em 1994. Após a criação do comitê técnico SHC 221 (RILEM, 2005) diversas perspectivas vêm sendo desenvolvidas com o mesmo objetivo. Estudos experimentais com concreto autorregenerantes serão vistos a seguir.

5.1. Concreto autocicatrizante com cimentos de escórias de alto-forno ativadas por catalisador cristalino

O estudo de Takagi (2013) traz uma comparação da influência de cimentos existentes no mercado nacional com diferentes percentuais de escória de alto forno, analisando o seu potencial de cicatrização de fissuras no concreto. O objetivo da sua pesquisa foi o desenvolvimento de um concreto autoadensável autocicatrizante capaz de promover estruturas de concreto mais duráveis.

Takagi (2013) aborda que a própria ocorrência da fissura é um dos meios de gatilho para a autocicatrização do concreto, pois possibilita a entrada de água, ativando o catalisador cristalino. Desta maneira forma-se no interior das fissuras uma nova superfície composta por cimentos sub-hidratados e por escórias não ativadas. O catalisador cristalino aumenta a alcalinidade da água, favorecendo o desenvolvimento de produtos hidratados estáveis, que reparam fissuras de até 0,4 mm.

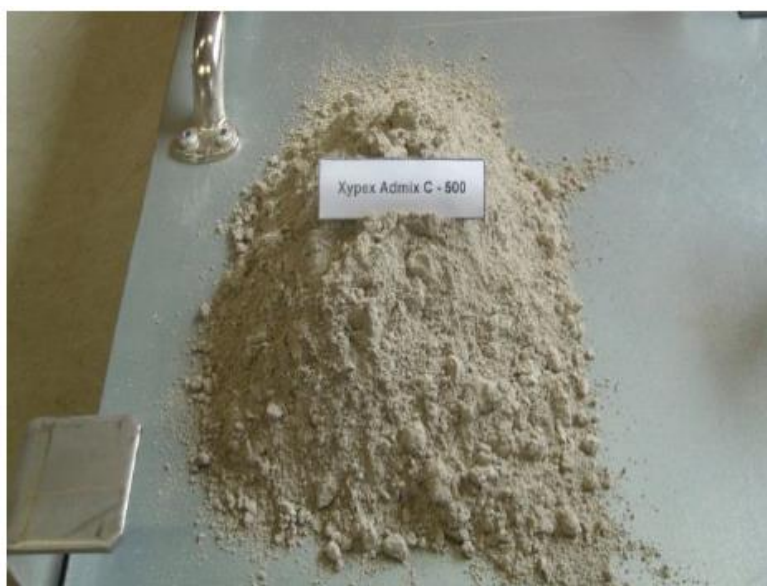


Figura 28: Catalisador cristalino fornecido em pó.
(Fonte: TAKAGI, 2013)

Na sua metodologia de pesquisa o autor utilizou amostras de concretos sem adições de agentes cicatrizante e amostras com a adição de catalisador cristalino, fibras de vidro comercial e três tipos de cimentos comerciais (CP III-40 RS, CP II-E-40 e CP V ARI) com porções distintas de escórias de alto forno (55%, 34% e 0%, respectivamente), agregados miúdos (areia de quartzo e areia artificial), agregados graúdos (brita 1 e pedrisco) e alguns aditivos.

Os corpos de prova foram moldados seguindo a NBR 5738:2003 (Concreto – Procedimento para a moldagem e cura de corpos de prova) e submetidos à prensa com 90% da carga de ruptura (NBR 5739:2007 Concreto – Ensaio de compressão de amostras cilíndricos), ocasionando algumas fissuras em seu interior. Depois foram imersos em água (NBR 10787:1994 – Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão) com o intuito de disparar o gatilho de cicatrização e submetidos aos ensaios após 28 dias, 56 dias e 84 dias.

Visto que a capacidade de cicatrização do concreto advém da composição do cimento, proporção das adições minerais e da exposição à água, Takagi (2013) adotou os mesmos parâmetros de condições de cura, pré-fissuração e cicatrização do programa experimental de Sahmaran *et al.*(2008). Para este trabalho foram feitos ensaios no estado fresco e endurecido do concreto autocicatrizante autoadensável: ensaios de reologia, ensaios para determinação das propriedades mecânicas e ensaios para determinação das propriedades de permeabilidade.

Parâmetros	(SAHMARAN <i>et al.</i>, 2008)	(TAKAGI, 2013)
Adição mineral	Cinzas volantes de baixo teor de cálcio	Escórias de alto forno, catalisador cristalino, fibras de vidro
Tipo de concreto	Concreto autoandesável (CAA)	Concreto autoadensável (CAA)
Cura	Submersa em água saturada com cal à 23±2 °C por 28 dias	Submersa em água saturada com cal à 23±2 °C por 28 dias
Pré-fissuramento	Compressão axial com 0%, 70% e 90% de carga de ruptura	Compressão axial com 0% e 90% de carga de ruptura
Período de cicatrização	Submersa em água saturada com cal à 23±2 °C por 15 e 30 dias	Submersa em água saturada com cal à 23±2 °C por 28 e 56 dias
Propriedades mecânicas	Resistência à compressão axial velocidade de propagação de ultrassom	Resistência à compressão axial velocidade de propagação de ultrassom
Propriedades permeabilidade	Taxa de absorção difusão de cloretos	Taxa de absorção difusão de cloretos

Corpos de prova por ensaio	3 Cps cilíndricos Ø100 x 200mm 28, 28+15 e 28+30 dias de idade	3 Cps cilíndricos Ø100 x 200mm 28, 28+28 e 28+56 dias de idade
Resultados	A diferença inicial de 27% na resistência dos Cps fissurados com os Cps virgens, e cai para 7% após 30 dias de cicatrização	Serão abordados a seguir

Quadro 6: Comparativo entre os estudos de Sahmaran *et al.* (2008) e Takagi (2013).

(Fonte: TAKAGI, 2013)

A composição da dosagem concreto autocicatrizante empregada por Takagi (2013) no experimento segue no Quadro 7, e o traço no Quadro 8. A adição aconselhável do catalisador cristalino é de 2 a 3% sobre o peso de cimento, portanto para 400 kg/m³ de cimento adotou-se o valor de 2,5% (10 kg) de catalisador.

Material		Consumo por m ³
Água		196 kg
Cimento (CP V ARI Plus/ CP II-E 40 / CP III 40 RS)		392 kg
Catalisador cristalino		10kg
Agregado miúdo	Areia de quartzo (70%)	573 kg
	Areia artificial (30%)	246 kg
Agregado graúdo	Pedrisco (70%)	651 kg
	Brita 01 (30%)	279 kg
Aditivo polifuncional (0,6%)		2,4 kg
Aditivo hiperplastificante (1,0 %)		4,0 kg
Aditivo modificador de viscosidade (0,5%)		2,0 kg
Fibra de vidro (12 mm)		900g

Quadro 7: Composição da dosagem do concreto autocicatrizante

(Fonte: TAKAGI, 2013)

Cimento	Água	Areia de quartzo	Areia artificial	Pedrisco	Brita 1	Catalisador cristalino	Fibra de vidro
1	0,5	1,462	0,628	1,661	0,712	0,025	0,002

Quadro 8: Traço do concreto autocicatrizante

(Fonte: TAKAGI, 2013)

O ensaio de penetração de água teve o objetivo de ajudar na percepção dos parâmetros básicos dos concretos autocicatrizantes. As amostras que receberam pressão hidrostática de 0,1 MPa (2 dias) / 0,3 MPa (1 dia) / 0,7 MPa (7 dias), aos 28 dias mostraram que a indução de cicatrização foi eficiente. Os resultados de penetração de água apresentaram grande êxito nas propriedades impermeabilizantes das amostras que possuíam adição de catalisador cristalino (Quadro 9).

Traço	Tipo de aglomerante	Período de indução (28 dias)	Período de cicatrização (56 dias)		
		CP1	CP2	CP3	Média
1	cimento CPIII + catalisador cristalino	25 mm	20 mm	20 mm	20 mm
2	cimento CPIII	50 mm	25 mm	20 mm	22,5mm
3	cimento CPII-E + catalisador cristalino	35 mm	20 mm	20 mm	20 mm
4	cimento CPII-E	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm
5	cimento CPV-ARI + catalisador cristalino	25 mm	20 mm	20 mm	20 mm
6	cimento CPV-ARI	25 mm	20 mm	25 mm	22,5mm

Quadro 9: Resultados dos ensaios de penetração de água sob pressão

(Fonte: TAKAGI, 2013)

Os ensaios específicos para concreto autocicatrizante autoadensável tiveram resultados próximo aos encontrados por Sahmaran *et al.* (2008) e, no que se refere ao cimento CP III 40 RS, demonstraram que quanto maior for a quantidade de adições minerais, maior será a quantidade de materiais não hidratados capazes de potencializar a autocicatrização a longo prazo. No que diz respeito aos ensaios de reologia do concreto autoadensável, têm-se o resultado do espalhamento Slump-flow no Quadro 10. Não foi encontrado nenhum tipo de segregação ou exsudação nos traços, confirmando, portanto, que todos os traços utilizados

podem ser considerados concretos autoadensáveis. A adição do catalisador cristalino no traço reduziu minimamente o espalhamento flow, ou seja, diminuiu levemente a sua trabalhabilidade.

Traço	Tipo de aglomerante	Espalhamento Flow
1	cimento CPIII + catalisador cristalino	700 mm
2	cimento CPIII	760 mm
3	cimento CPII-E + catalisador cristalino	730 mm
4	cimento CPII-E	780 mm
5	cimento CPV-ARI + catalisador cristalino	680 mm
6	cimento CPV-ARI	720 mm

Quadro 10: Propriedades no estado fresco dos traços de concretos utilizados.

(Fonte: TAKAGI, 2013)

O Quadro 11 apresenta as propriedades mecânicas de resistência à compressão das amostras de concreto, denominando a Série 1 como as amostras com idades iniciais (7 e 28 dias) curadas normalmente e a Série 2 constituída pelas amostras fissuradas devido ao pré-carregamento (idades de 28, 56 e 84 dias). Os resultados dos ensaios para a idade de 84 dias revelaram maior êxito na recuperação dos cimentos que contêm maiores teores de escórias de alto forno (CP III e CP II).

Traço	Tipo de aglomerante	Resistência à compressão (MPa)						
		Série 1			Série 2			
		7 dias	28 dias	Perda por fissuração	28 dias	56 dias	84 dias	Recuperação por cicatrização
1	cimento CPIII + catalisador cristalino	43,5	53,3	-5,1%	50,6	58,8	59,9	+17,4%
2	cimento CPIII	45,6	51,2	-13,7%	44,2	55,5	57,3	+25,6%
3	cimento CPII-E + catalisador cristalino	30,2	53,4	-18,9%	43,3	47,7	49,2	+11,0%
4	cimento CPII-E	22,9	47,2	-13,8%	40,7	45,1	46,5	+12,3%
5	cimento CPV-ARI + catalisador cristalino	47,7	55,5	-3,2%	53,7	55,7	55,8	+3,8%
6	cimento CPV-ARI	49,4	54,4	-3,3%	52,6	53,7	54,7	+3,9%

Quadro 11: Propriedades da resistência à compressão do concreto (MPa)

(Fonte: TAKAGI, 2013)

A Figura 29 traduz de forma mais objetiva o comportamento da resistência à compressão devido a fissuração e ao efeito autocicatrizante das microfissuras, vistos no Quadro 11.

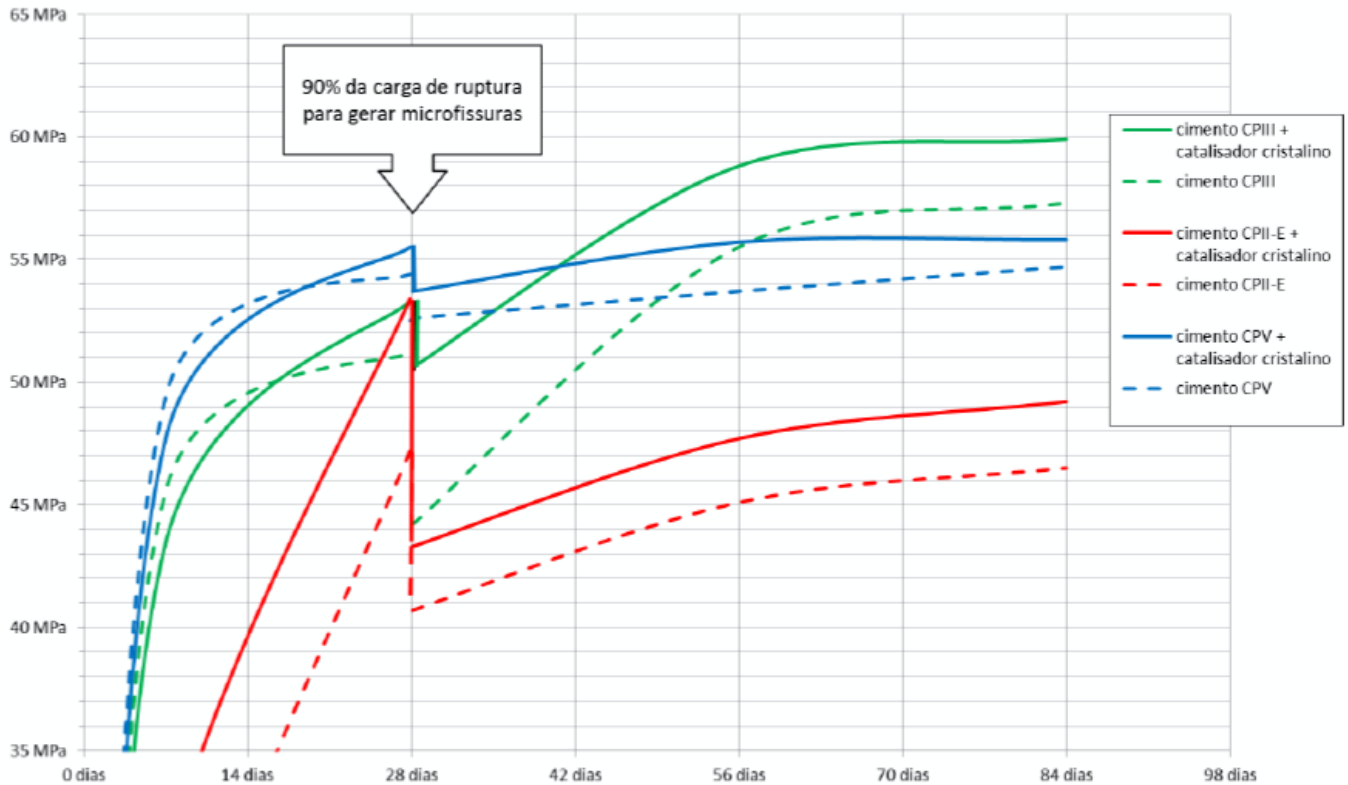


Figura 29: Comportamento da resistência à compressão devido a fissuração e ao efeito autocicatrizante das microfissuras.

(Fonte: TAKAGI, 2013)

O experimento revela que a amplitude das propriedades de perda por fissuração e recuperação por cicatrização estão diretamente ligadas ao tipo de cimento empregado. Os cimentos que possuíam maiores teores de escória de alto-forno (CP III e CP II-E) tiveram uma maior recuperação em idades mais avançadas (Figura 30).

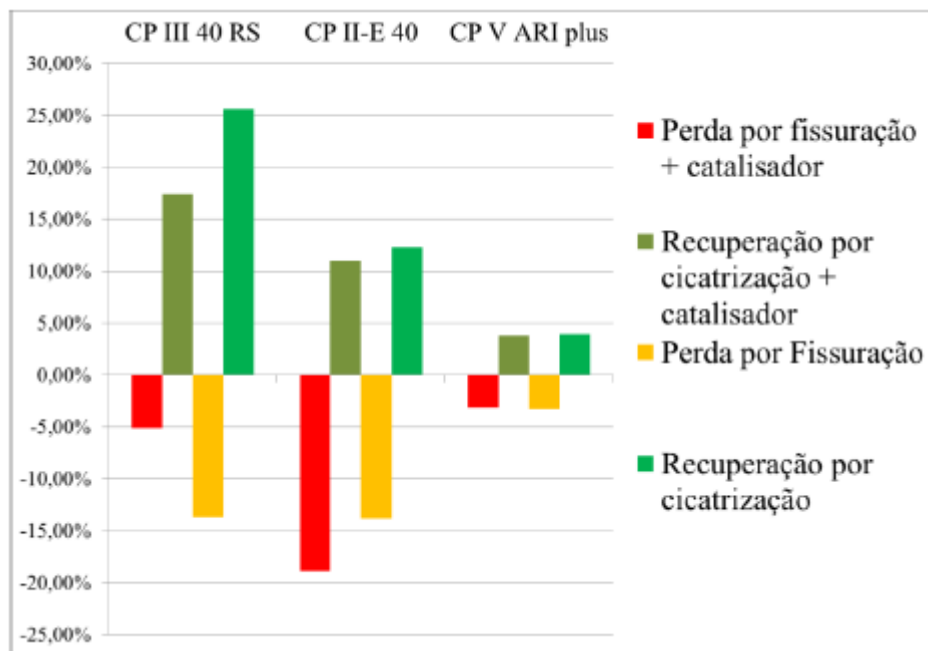


Figura 30: Comparativo das propriedades mecânicas de perda por fissuração e recuperação por cicatrização entre os 3 tipos de cimentos.

(Fonte: TAKAGI, 2013)

Com relação aos resultados das taxas de absorção por capilaridade para os três tipos de cimento são apresentados na Figura 31:

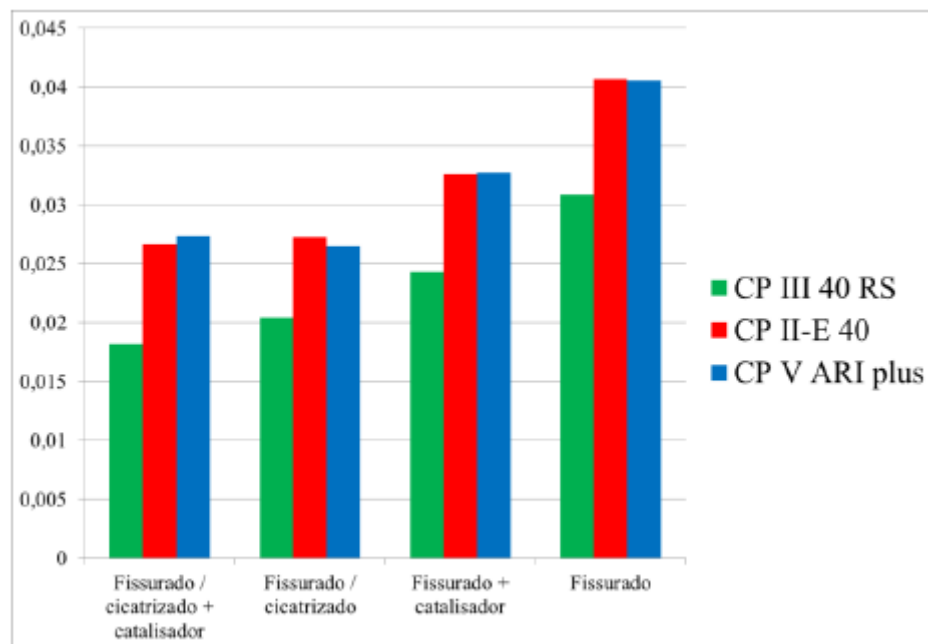


Figura 31: Comparativo da taxa de absorção capilar dos 3 tipos de cimentos

(Fonte: TAKAGI, 2013)

O CP III 40 RS com o uso de catalisador cristalino consegue diminuir a absorção por capilaridade tanto das amostras fissuradas aos 28 dias, como também das amostras fissuradas e cicatrizadas. O ensaio aos 56 dias mostrou uma moderada melhora da taxa de absorção à água por capilaridade de todas as amostras deste material. No CP II E-40 com catalisador cristalino também ocorreu diminuição de absorção à água das amostras fissuradas aos 28 dias, e o ensaio aos 56 dias evidenciou melhora significativa da taxa de absorção à água mesmo sem o catalisador. Para o CP V ARI a utilização do catalisador também diminui as taxas de absorção por capilaridade das amostras fissuradas e cicatrizadas. O ensaio aos 56 dias demonstrou importante melhora da taxa de absorção à água nas amostras deste material.

Constata-se também que amostras curadas sem o catalisador cristalino mostraram uma porcentagem de recuperação superior. Sugerindo desta maneira que o efeito de autocicatrização depende vigorosamente das condições ambientais de exposição à água e ao ar. Supõe-se que isso sucedeu durante o processo de secagem devido à evaporação do excesso de água e, conseqüentemente, o aumento da quantidade de íons na água presente nas fissuras. Nesta situação a concentração dos reagentes para futuras reações é relativamente alta, enquanto a quantidade de água seja suficiente para elas. Este acontecimento deve melhorar as reações químicas, precipitação e hidratação contínua. A entrada CO₂ na fissura durante o desenvolvimento da secagem leva ao aumento da formação de carbonatos (CaCO₃), que são de extrema importância para o selamento das falhas.

A restauração das propriedades da resistência a compressão e da permeabilidade podem ser relacionados com o tamponamento progressivo de fissuras por géis de C-S-H recém produzidos devido aos efeitos de autocicatrização. O cimento C-III e C-II-E com catalisador cristalino se favoreceram da cura prolongada em água saturada com cal livre, assumindo reduções significativas de absorção de água. As reações entre o catalisador e os subprodutos dos cimentos podem ser impulsionadas pelas condições de cura, ocasionando em volumes reduzidos de vazios permeáveis.

5.2. Bioconcreto - Concreto com introdução de *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, acetato de cálcio e uréia.

No estudo de Euzébio, Alves e Fernandes (2017) realizou-se um ensaio piloto de indução de fissuras e autocicatrização bacteriana com e sem impregnação de esporos de bactérias, com o objetivo de promover a comparação sobre a cicatrização das falhas por meio da precipitação de carbonato de cálcio metabolizada por bactérias. Para a impregnação de

bactérias nas partículas de argila expandida foram necessários: probiótico com bactérias do gênero *Bacillus subtilis* e *Bacillus licheniformis*, 10g de acetato de cálcio, 10g de ureia e partículas de argila expandida contendo 6 a 15 mm. Também foram impregnadas partículas de vermiculita super fina utilizando-se as mesmas quantidades de probiótico e nutrientes (Figura 32 a 35).

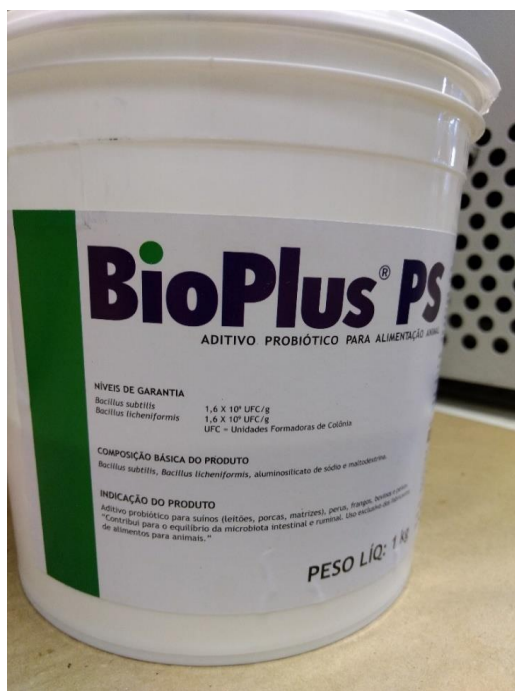


Figura 32: Probiótico com bactérias do gênero *Bacillus subtilis* e *Bacillus licheniformis*.

(Fonte: EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017)

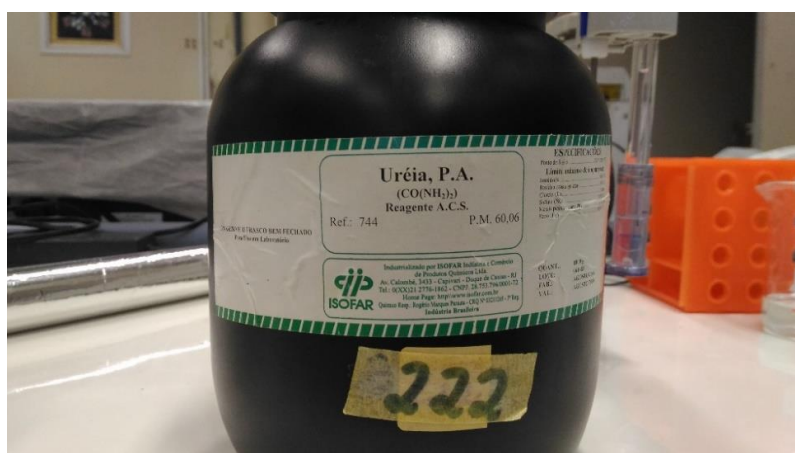


Figura 33: Ureia empregada como nutriente para as bactérias

(Fonte: EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017)

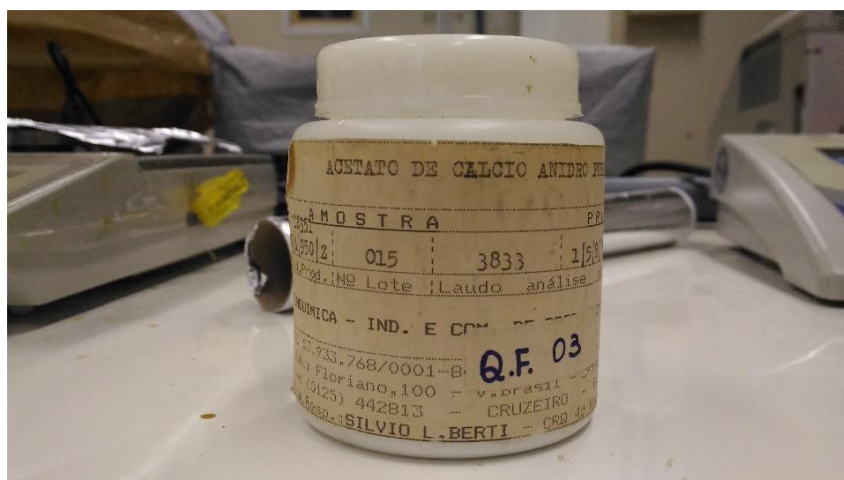


Figura 34: Acetato de cálcio usado como fonte de nutrientes para as bactérias
(Fonte: EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017)



Figura 35: (a) Vermiculita super fina; (b) Argila expandida.
(Fonte: EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017)

Os corpos de prova foram moldados conforme a NBR 5738 (2003), com Cimento Portland CP II-Z 32, agregado miúdo do tipo areia natural média de leito de rio, pedrisco de micaxisto ou granulo, vermiculita, água, brita zero como agregado graúdo, argila expandida com diâmetro máximo de 15 mm, superplastificante com 3% em massa de cimento e a relação água/cimento foi de 0,5. Tanto a argila expandida quanto a vermiculita foram separadas em dois grupos cada, um contendo partículas impregnadas com suspensão de esporos de bactérias e composto orgânico e o outro contendo as partículas não impregnadas, utilizadas como

controle de referência. Dentre 8 corpos de prova, 4 de bioconcreto e 4 de controle, 2 foram submetidos à indução de fissuras aos 14 dias e o restante foi apenas para constatação da ação das bactérias e realização de ensaios de resistência à compressão.

Para a impregnação das partículas a argila expandida foi imersa em 2L de água saturada aquecida a 80 °C, contendo nutrientes e suspensão de esporos de bactérias para a etapa de absorção, e logo após sofreram agitação contínua. Foram adicionados os nutrientes (acetato de cálcio e ureia) e depois constatou-se a dispersão dos esporos 2 minutos antes do agregado leve (6 - 15 mm). A vermiculita sofreu uma impregnação preliminar para constatar a germinação ou não das bactérias na presença dos nutrientes. Para este a água utilizada foi aquecida em um micro-ondas e levada a um equipamento de agitação do laboratório de microbiologia da UFG, depois foram impregnadas assim como no processo da argila expandida. As argilas sem impregnação de bactérias foram saturadas com água durante 30 minutos antes de serem colocadas na betoneira, visto que sua grande absorção de água afeta a hidratação da pasta de cimento e a ausência de saturação pode provocar a flutuação das partículas no concreto fresco.

Após impregnação da vermiculita, a germinação ocorreu cerca de uma semana depois (Figura 36). Isso confirmou a hipótese de que a presença de nutrientes faz com que os micro-organismo se multipliquem e liberem carbonato de cálcio, que é a substância responsável por interromper as fissuras.



Figura 36: Germinação de bactérias em partículas de vermiculita.

(Fonte: EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017)

Depois foi feito um ensaio de compressão com prensa hidráulica em um dos corpos de prova de controle até o ponto ligeiramente antes da ruptura, para a indução das fissuras. Uma das amostras de bioconcreto também foi colocada sob mesmo ensaio. Durante o

acompanhamento visual das fissuras, na amostra de bioconcreto não percebeu-se a ação das bactérias aos 21 dias, levando a decisão imergir o corpo de prova em uma solução de bactérias com o objetivo de potencializar o processo de cicatrização, não sendo mais um fenômeno de autocicatrização dessa maneira e sim uma recuperação da amostra. Aos 30 dias uma inspeção visual foi feita com um microscópio, tanto para os corpos de prova de controle quanto para os que foram impregnados (Figuras 37 e 38).

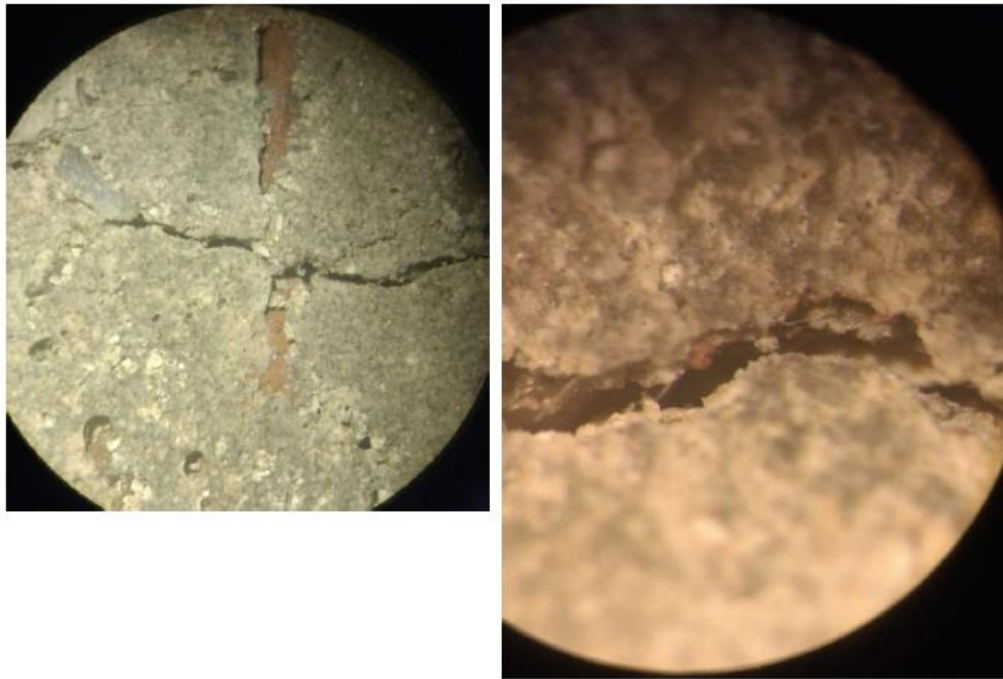


Figura 37: (a) Fissura em corpo de prova impregnado; (b) Fissura em corpo de prova não impregnado.

(Fonte: EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017)

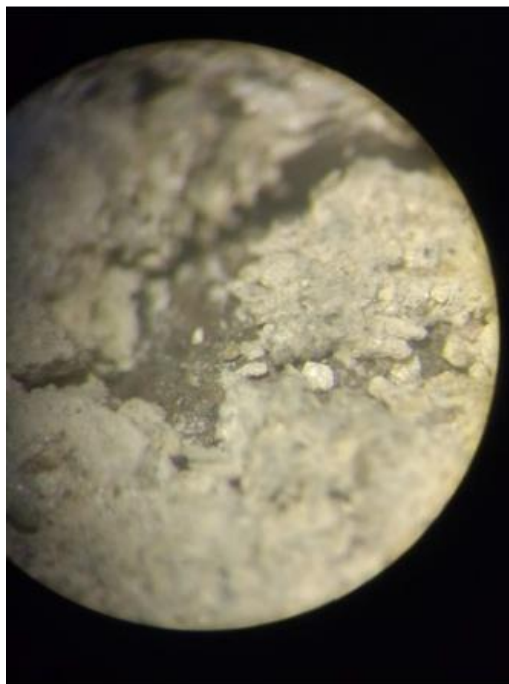


Figura 38: Superfície da amostra de controle.

(Fonte: EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017)

Diferente do trabalho realizado por Mors e Jonkers (2013), neste experimento não ocorreu o selamento das falhas no bioconcreto como se esperava, isso provavelmente devido ao fato das bactérias terem se concentrado na superfície do material (Figura 38) e não sobreviverem durante a rodagem do concreto na betoneira. A imersão feita em solução de bactérias que objetivava aprimorar a cicatrização não foi suficiente para selar as fissuras, possivelmente por causa do pouco tempo que o autor utilizou entre a utilização do método e a inspeção das fissuras. O traço adotado neste experimento também foi diferente (1:1,75:2,25) bem como a inserção de brita como agregado graúdo, enquanto Mors e Jonkers (2013) aderiram uma proporção de 1:2,42:0,76 e não inseriram brita. A quantidade de argila expandida utilizada foi superior à de referência, bem como o seu diâmetro máximo que foi de 9 mm, superior a adoção de Mors e Jonkers (2013) (diâmetro inferior a 4 mm).

Outro fator que deve ser levado em consideração é que para agregados leves a imersão em água deve ser realizada por um período de 24 horas até a sua aplicação para prevenir que as partículas flutuem superfície do concreto, porém o autor imergiu a argila por apenas 30 minutos. Além de tudo, Mors e Jonkers (2013) fizeram a inserção de bactérias por impregnação à vácuo, enquanto Euzébio, Alves e Fernandes (2017) empregaram uma metodologia simples de imersão. Esse processo foi insuficiente para impregnar o material, fazendo com que as bactérias permanecessem na superfície do agregado.

Após a impregnação, Mors e Jonkers (2013) secaram o agregado leve durante 5 dias a 37 °C, porém no trabalho abordado esse procedimento não foi executado e as partículas foram diretamente inseridas depois de serem impregnadas. Quanto a indução de fissuras, Mors e Jonkers (2013) fizeram por meio de tração e 56 dias após a cura, tendo resultados visíveis após 40 dias. Euzébio, Alves e Fernandes (2017) realizaram a indução por meio de compressão e em apenas 14 dias depois da cura. Sua análise foi feita em 30 dias, sendo este tempo insuficiente para a verificação do efeito da adição de bactérias. A utilização de vermiculita e superplastificante no experimento, fugindo da abordagem de referência, podem também ter afetado negativamente o desempenho deste trabalho de alguma forma.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma revisão bibliográfica sobre a microestrutura do concreto e suas propriedades, bem como o seu processo de formação de fissuras. Além disso, trouxe referências de embasamento científico sobre algumas tecnologias de autocicatrização do concreto e aplicações por meio do estudo de Takagi (2013) comparado ao procedimento experimental de Sahmaran *et al.*(2008), e o estudo de Euzébio, Alves e Fernandes (2017) comparado ao de Mors e Jonkers (2013).

No experimento de Takagi (2013) examinou-se o comportamento autocicatrizante de concretos autoadensáveis adicionando materiais suplementares, no qual evidenciou-se a autocicatrização a partir de cimentos com escórias de alto forno, catalisador cristalino e fibras sintéticas. Os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas e estanqueidade manifestaram maior capacidade de autocicatrização nas amostras com CP III, CP V e CP II respectivamente. Desta forma, se existe uma propensão para uma autocicatrização mais lenta nas amostras com escória de alto forno (cimento CPIII e CP II) nas idades iniciais quando comparados com as amostras contendo cimento Portland em sua totalidade (cimento CP V), a ação de hidratação das escórias a longo prazo é fundamental para a autocicatrização devido ao seu comportamento hidráulico latente. A pesquisa evidenciou que as condições de exposição durante a etapa de cura do concreto possuem um papel fundamental no processo de cicatrização, as condições em ciclos alternados de úmido/seco desempenham uma excelente recuperação mecânica de fissuras.

O experimento de Euzébio, Alves e Fernandes (2017) foi feito por meio de um ensaio com indução de fissuras em concretos com impregnação de esporos de bactérias para avaliar o seu poder de autocicatrização de fissuras, comparado ao experimento de Mors e Jonkers (2013). No entanto, Euzébio, Alves e Fernandes (2017) tiveram resultados negativos quanto a regeneração das fissuras, diferente da sua base de referência. O presente trabalho veio por meio desta aplicação mostrar que alguns parâmetros devem ser seguidos para que resultados satisfatórios aconteçam na cicatrização das falhas.

O processo de impregnação por simples imersão, feito por Euzébio, Alves e Fernandes (2017), não foi suficiente para impregnar as bactérias de maneira devida nas partículas de argila expandida, este deve ser feito a vácuo como proposto por Mors e Jonkers (2013). Outro fator preponderante é o tempo de dosagem do concreto, ele é de grande importância para o não comprometimento do estado das bactérias. A germinação de bactérias nas vermiculitas indica que a presença de nutrientes induz sim a reprodução dos micro-organismos e a liberação de

carbonato de cálcio. Se tivessem sido protegidas adequadamente no interior das partículas do agregado leve através da impregnação à vácuo, provavelmente as bactérias sobreviveriam ao processo de dosagem e conseqüentemente provocariam o fechamento das fissuras.

O surgimento de fissuras em estruturas de concreto é inevitável, isso leva a crer que o controle dessas manifestações patológicas desempenha um papel fundamental, uma vez que a fissuração pode causar a perda de estanqueidade e o surgimento de outras manifestações patológicas interligadas, causando desconforto estético. Também podem colaborar para a deformabilidade das estruturas, capaz de levar a danos severos e necessidade indispensável de reparos. Todavia, para realizar a manutenção e inspeção das estruturas de concreto demanda muitos custos.

No ano de 2012 países como Estados Unidos, Coréia do Sul e Alemanha tiveram mais gastos com recuperação de estruturas comparado aos investimentos com novas construções. Neste contexto a utilização de concreto com materiais autocicatrizantes demonstra um grande benefício sob o ponto de vista financeiro. Segundo Takagi (2013), além da diminuição dos custos diretos com material e serviço de execução, essa tecnologia pode promover a redução de custos indiretos já que evita interdições. Outro ponto benéfico dos concretos autocicatrizantes é que eles são mais sustentáveis para o planeta, uma vez que a melhora no desempenho de autocicatrização repercute na redução de demandas por novas estruturas. Desta maneira, promove-se a diminuição no consumo de matérias primas, principalmente no consumo de cimento cuja fabricação demanda alta energia e é responsável por 5-7% das emissões de CO₂.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINI, L. R. S.; LONGATI, E. **A influência da granulometria e da natureza mineralógica do agregado graúdo na resistência à compressão de concretos de alta resistência.** Revista FAAP Engenharia, nº43, 2003. Disponível em: <http://faap.br/revista_faap/engenharia/ped/revista.pdf>. Acesso em: 20 de agosto 2020.
- AGUIAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis.** 173f. Dissertação de Mestrado em Construção Civil – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.
- ALEXANDRE, I. F. **Manifestações Patológicas em Empreendimentos Habitacionais de Baixa Renda Executados em Alvenaria Estrutural: Uma análise da Relação de Causa e Efeito.** 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- ANDRADE, J. J.O.; TUTIKIAN, B. F. **Resistência Mecânica do Concreto.** In: (Ed.), Geraldo Cechella Isaia. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 17. p. 615-651.
- ARRUDA, A. M. **Módulo de elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do triângulo mineiro.** 166 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10787:** Concreto endurecido - determinação da penetração de água sob pressão. Rio de Janeiro, 2011, 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003, 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto- Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007, 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- AZEVEDO, M. T. **Patologia das Estruturas de Concreto.** In: ISAIA, Geraldo C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1a. ed. São Paulo: IBRACON, 2011, p. 1119–1128.
- BIANCHIN, F. H. **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades.** 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.
- BRAGA, N. M. T. **Patologias nas construções: Trincas e fissuras em edifícios.** 94f. Monografia do Curso de Especialização em Construção Civil - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

BRITZ, C.; HELENE, P.; BUENO, S.; PACHECO, J. **Estanqueidade de lajes de subpressão, caso MIS, Gramado** – Rio Grande do Sul, p. p. 176-97, 2013.

CAMARGO, N. F.; ARANTES, A. V.; SILVA, M. D. G. **Análise de Manifestações Patológicas Ocasionalmente em Edificações na Cidade de Rio Verde - GO**. Universidade de Rio Verde. Rio Verde, 2019. Disponível em: <<http://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/An%C3%A1lise%20de%20Manifesta%C3%A7%C3%B5es%20Patol%C3%B3gicas%20Ocasionalmente%20em%20Edifica%C3%A7%C3%B5es%20na%20Cidade%20de%20Rio%20Verde-%20GO.pdf>>. Acesso em: 09 de setembro de 2020.

CINCOTTO, M. A. **Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações**. In: Tecnologia de edificações. São Paulo: Pini: IPT, 1988. p. 549-554.

CINCOTTO, M. A. **Reações de Hidratação e Pozolânicas**. In: ISAIA, Geral C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1a. ed. São Paulo: IBRACON, 2011, p. 381–413.

CORSINI, R. **Trinca ou fissura?** São Paulo: Técnica. 160, p., jul. de 2010. Disponível em: <<http://technepini.com.br/engenharia-civil/160/trinca-ou-fissura-como-se-originam-quais-os-tipos-285488-1.aspx>>. Acesso em: 10 de setembro de 2020.

DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica**. 286p. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

DE BELIE, N. VERSELDER, H. J. DE BLAERE, B. VAN NIEU-WENBURG, D. VERSCHOORE, R. Influence of the cement type on the resistance of concrete to feed acids. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 11, p. 1717-1725, 1996.

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

DUARTE, R. B. **Fissuras em alvenarias: causas principais, medidas preventivas e técnicas de recuperação**. CIENTEC - Boletim técnico, n.25. Porto Alegre, 1998.

DUVIVIER, J. G.; SANSON, M. MAR. **Museu de Arte do Rio. Arte of travel**, 2013. Disponível em: <www.artoftravel.com.br/web/dt_portfolio/mar-museu-de-arte-do-rio>. Acesso em: 20 de setembro de 2020.

EDVARSEN, C. **Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete**. In: *Materials Journal* 96, no. 4, p. 448-454. 1999.

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

EMMONS, P. H. **Concrete Repair and Maintenance**. Kingston: R. S. Means Company, 1993. 295 p. ISBN 0-87629-286-4.

EUZÉBIO, L. A.; ALVES, T. R.; FERNANDES, V. A. **Bioconcreto: Estudo exploratório de concreto com introdução de *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, acetato de cálcio e ureia**. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil - Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2017.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Terapia das Construções de Concreto: Metodologia de avaliação de sistemas epóxi destinados à injeção de fissuras passivas das estruturas de concreto.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 25-37, Porto Alegre, 1989.

FREITAS, A. H. C.; FRANÇA, P. M.; FRANÇA, T. M. **Patologia de fachadas.** Revista Pensar Engenharia, Minas Gerais, 2013. Disponível em: <http://revistapensar.com.br/engenharia/pasta_upload/artigos/a106.pdf>. Acesso em: 10 de setembro de 2020.

GEYER, A. L. B.; SÁ, R. R. **Importância do Controle de Qualidade do Concreto no Estado Fresco.** Realmix: Tecnologia em concreto. Anual, v. 2, n. 2, 8 p. Anual. Aparecida de Goiânia - Goiás, 2006.

GIORDANI, A. Z. **Levantamento e Diagnóstico das Manifestações Patológicas em Fachadas de Edificações localizadas no Campus da UFSC.** 100f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

GRIGOLI, A.S.; HELENE, P. **Comportamento das Adições Minerai Inertes em Poros e Zona de Transição em Concretos.** II Encontro Tecnológico de Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá - Paraná, 2001.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto Armado.** Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica. São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Vida útil das estruturas de concreto.** In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. Anais. Porto Alegre, vol. 1, pp. 1-30. 1997.

HOMMA, D.; MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. Self-healing Capability of fibre reinforced cementitious Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Tokyo, v. 7, n. 2, p. 217-228, Junho 2009.

JCI - TC075B. **State-of-the-art report of the JCI Technical committee TC-075B: Autogenous healing in cementitious materials.** Proceedings of 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, ConMat'09. Nagoya, Japan: [s.n.]. 2009. p. Keynote Lecture, pp. 89-96.

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

KAEFER, L. F. **Considerações sobre microestrutura do concreto**, S.d. Disponível em:<http://www.engenhariaconcursos.com.br/arquivos/Materiais/microestrutura_do_concreto.pdf>. Acesso em: 25 de agosto de 2020.

KURAMOTO, Y.; NAKAMURA, Y.; MATSUDA, Y. Effects of alkali substitution on suppression of AAR. In: 10th **Alkali-aggregate reaction in concrete**. 1996. Melbourne. Proceedings... p. 876-883.

KURAMOTO, Y.; NAKAMURA, Y.; SHIMAMURA, M. Control of AAR by catalysed alkali discharge. In: 9th **Alkali-aggregate reaction in concrete**. 1992. London. Proceedings... p. 564-569.

KUZEL, H. J. Initial hydration reactions and Mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cements. **Cement and concrete composites**, v. 18, p.195-203, 1995.

LI, H.; XIAO, H.; YUAN, J.; OU, J. **Microstructure of cement mortar with nanoparticles**. In: Composites: Part B Engineering 35. p.185–189. Elsevier, 2004.

LI, V. C.; SAKULICH, A. R.; REINHARDT, H. W.; SCHLANGEN, E.; VAN TITTELBOOM, K.; SNOECK, D.; DE BELIE, N.; JOSEPH, C.; GARDNER, D.R.; LARK, R.J.; MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. **Recovery against Mechanical Actions**. In: Self-healing phenomena in cement-based materials: state-of-the-art report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement- Based Materials, vol. 11, p. 65-117. Springer: 2013.

LV, Z.; CHEN, H. **Self-healing efficiency of unhydrated cement nuclei for dome-like crack mode in cementitious materials**. In: Materials and structures 46, no. 11, p. 1881-1892. 2013.

MAGALHÃES, A. G.; **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**. 268 f. Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

MAGALHÃES, E. F. **Fissuras em alvenarias: configurações típicas e levantamento de incidências no estado do Rio Grande do Sul**. 180f. Tese de Mestrado em Engenharia - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Escola De Engenharia. Porto Alegre, 2004.

MAÑÁ, F. **Patología de las cimentaciones**. Barcelona: Blume, 1978.

MASSETTO, L. T.; SABBATINI, F. H. **Estudo comparativo da resistência das alvenarias de vedação de blocos utilizadas na região de São Paulo**. In: Congresso Latino-americano em tecnologia e gestão na produção de edifícios, soluções para o terceiro milênio. Anais. p. 79-86. EPUSP. São Paulo, 1998.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3a. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MINEIRÃO. **O estádio Governador Magalhães Pinto**, 2012. Disponível em: <<http://www.minasarena.com.br/mineirao/esplanada/>>. Acesso em: 20 de setembro de 2020.

MORS, R M; JONKERS, H M. **Practical Approach for Production of Bacteria-Based Agent- Contained Light Weight Aggregates To Make Concrete Self-Healing**. p. 240–243, 2013.

MUCCI, D. W. S.; NETTO, J. R. B.; SILVA, R. A. **Sistemas de recuperação de fissuras da interface da alvenaria de vedação – Estrutura de concreto: Comparativo entre os processos executivos e análise de custo**. 98f. Monografia do curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Editora Bookman. p. 1, 2. Porto Alegre, 2016.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2.ed. Editora Bookman, p. 2. Porto Alegre, 2013.

OLIVEIRA, A. M. **Fissuras e rachaduras causadas por recalque diferencial de fundações**. 96f. Monografia (Especialização em Gestão em Avaliações e Perícias) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.

PAULON, V.; KIRCHHEIN, A. P. **Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido**. In: ISAIA, Geraldo C. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1a. ed. São Paulo: IBRACON, 2011, p. 585–613.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Estruturas de concreto**. EESC: Departamento de Engenharia de Estruturas, São Paulo, v. 1, n. 2, 10 f., abr. 2004. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec702/EESC/Concreto.pdf>>. Acesso em: 27 de agosto de 2020.

REDDY, M. S.; ACHAL, V.; MUKHERJEE, A. **Microbial concrete, a wonder metabolic product that remediates the defects in building structures**. In: *Microorganisms in Environmental Management: Microbes and Environment*. [s.l.: s.n.], 2012, v. 9789400722, p. 547–568.

REPETTE, Wellington Longuini. **Concretos de Última Geração e para Fins Especiais**. 1a. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

RILEM. *Self-healing phenomena in cement-based materials.*, 2005. (**Technical Committee 221-SHC**). Disponível em: <http://www.rilem.net/gene/main.php?base=8750&gp_id=228>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2019.

ROMANO, C. A. **Apostila de tecnologia do concreto**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Departamento Acadêmico de Construção Civil. Engenharia de Produção Civil, 2004. Disponível em: <http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2013/04/Concreto-02.pdf>>. Acesso em: 10 de setembro de 2020.

SAHADE, R. **Trincas ou Fissuras: novas tecnologias recomendadas (parte 2)**. 2020. Disponível em: <<https://blogdaliga.com.br/trinca-ou-fissura-novas-tecnologias-recomendadas-parte-2/>>. Acesso em: 04 de setembro de 2020.

SAHLIN, S. **Structural masonry**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1971.

SAHMARAN, M. et al. Self-healing of mechanically-loaded self-consolidating concretes with high volumes of fly-ash. **Cement and Concrete Composites**, v.30, p. 872-879, Jul. 2008.

SHUKUZAWA, J.K.; GITAHY, H.S.; KIHARA, Y. Curso Técnico: **Microscopia de Clínquer de Cimento Portland**. São Paulo, 1983.

SILVA, G. J. B. **Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato**. 107f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement & Concrete Composites** v. 34, p. 566–574, 2012.

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. 130 f. Dissertação de mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2013.

TAKAGI, E. M.; KURAMOTO, Y.; SHIMIZU, M. Leakage prevention methods of concrete underground or embeded structures. Cement crystalline reproduction materials. **Groundwater environments and foundation work**, Tóquio, v. 24, n. 2, p. 97-103, Feb. 1996.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. 2. ed. Londres: Ed. Academic Press, 1992.

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

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. Ed. Pini. São Paulo, 1989.

VALLE, J. B. S. **Patologia das alvenarias**. Monografia (Especialização em Tecnologia da Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

VAN TITTELBOOM, K. et al. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 349–359, 2012.

VAN TITTELBOOM, K. *et al.* Most recent advances in the field of self-healing cementitious materials. In: **4th International Conference on Self-Healing Materials**. Ghent, Belgium: Proceedings... p. 406-413, 2013.

VAN TITTELBOOM, K. *et al.* Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 497–505, 2011.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. **Materials** v. 6, p. 2182-2217, Jun. 2013.

VEKARIYA, Mayur Shantilal; PITRODA, Jayeshkumar. Bacterial Concrete: New Era for Construction Industry. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 4, n. 9, p. 4128–4137, 2013. Disponível em: <<http://www.ijettjournal.org/volume-4/issue-9/IJETT-V4I9P181.pdf>>.

VIEIRA, T. L. **Fissuras em concreto: estudos de caso em Florianópolis**. 111f. Trabalho de Conclusão de curso em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

ZANZARINI, J. C. **Análise das causas e recuperação de fissuras em Edificação residencial em alvenaria estrutural – Estudo de caso**. 83f. Trabalho de Conclusão de curso em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.