

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL DOUTORADO**

FERNANDA PACHECO

**ANÁLISE DA EFICÁCIA DOS MECANISMOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO
CONCRETO**

São Leopoldo

2020

FERNANDA PACHECO

**ANÁLISE DA EFICÁCIA DOS MECANISMOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO
CONCRETO**

Tese apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Doutora em
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

São Leopoldo

2020

P116a Pacheco, Fernanda.
Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto / por Fernanda Pacheco. -- São Leopoldo, 2020.

348 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian, Escola Politécnica.

1.Concreto. 2.Concreto – Aditivos. 3.Materiais de autocura. 4.Concreto – Durabilidade. 5.Construção de concreto – Deterioração. I.Tutikian, Bernardo Fonseca. II.Título.

CDU 691.32
691.32.059

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

FERNANDA PACHECO

**ANÁLISE DA EFICÁCIA DOS MECANISMOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO
CONCRETO**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 26 de agosto de 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof^a Dr^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin- UFRGS

Prof^a Dr^a Edna Possan- UNILA

Prof Dr Enio Pazini Figueiredo – UFG

Prof^a Dr^a Regina Célia Espinosa Modolo - UNISINOS

Dedico esse trabalho ao Prof. Cícero Marcos Teixeira Júnior, inspiração como profissional e ser humano para mim e tantos outros alunos. Obrigada por ter me mostrado a profissão que eu sempre quis.

À minhas avós, Rute e Bina (*in memoriam*) e ao vô Zé, me ensinaram o que é força e fé.

Ao meus pais Roberto e Iara, obrigada pelos valores, pelo amor, pelo cuidado, pela vida.

AGRADECIMENTOS

À **Deus**, pelo dom da vida. À **minha família**, base de tudo na minha vida. Pai e mãe, gurias e cunhados, tudo por e para vocês. Obrigada por saberem entender a ausência, os compromissos e o *notebook* pertencendo a mesa de jantar. Sou a primeira pessoa a concluir o doutorado em minha família, percebo tantos que se sacrificaram para que hoje isso fosse possível, gratidão. Ao **Rafael Trevisan**, meu companheiro nessa vida, quem me auxiliou no desenvolvimento desse trabalho, que soube ver a importância disso para mim, me ajudou nas misturas de concreto, desmoldagem, ensaios e revisão. À **família Trevisan**, que soube sempre me acolher com muito amor e torcer pelo desenvolvimento do meu trabalho.

Durante o processo de desenvolvimento desse trabalho, muitos alunos passaram pela minha vida, e foi gratificante perceber o interesse de alguns alunos nessa pesquisa, seu estímulo e desejo de vê-la sendo desenvolvida. Não seria possível listar o nome de todos esses alunos, porém, sinto a necessidade de destacar quatro orientandos de trabalhos de conclusão de curso, que através de sua atuação em duplas, tiveram grande contribuição nessa pesquisa: **Cláudio e Thaize**, que começaram os primeiros passos dessa pesquisa, que buscaram entender o tema, que abraçaram o desafio de estudar a autocicatrização causada por compostos químicos e desenvolveram um programa experimental denominado de Piloto A, com grande disciplina e dedicação. Muito obrigada! Sinto saudade de vocês! **Vinícius e Franciele**. Meus orientandos que toparam a ideia de pesquisar soluções bacterianas, se apropriando desse tema complexo e atípico aos engenheiros civis. Sou muito grata a cada minuto em que fomos um trio pesquisador, em que nos apoiamos, em cada descoberta. Obrigada! Tenho certeza de que frutos estão vindo e virão das nossas pesquisas.

Para navegar nesse mar desconhecido que é a microbiologia, necessária para o desenvolvimento desse estudo, me aliei a dois grandes navegadores: **Prof Dr Victor Hugo Valiati e Caroline**. Minha gratidão pela paciência, pelas portas abertas, pelo café, pelos esclarecimentos. Carol, tu és uma excelente professora, tem toda a calma e didática, me auxiliou estando sempre pronta, sempre disponível, e foi de suma importância nessa pesquisa. Professor Victor, obrigada por estar disposto a colaborar sempre.

Ao meu orientador **Professor Dr Bernardo Fonseca Tutikian**, me orientando pela terceira vez, com mais de 8 anos de trabalho contínuo. Obrigada por tudo, obrigada pela confiança, pela desconfiança, pelos estímulos e por me ensinar tanto. Foi uma honra!

Aos **colegas e ex-colegas do itt Performance**, por todo auxílio na realização de ensaios, nas concretagens, no preparo do material, pela companhia sempre alegre. Não agradeço apenas pela etapa do doutorado, mas por todos os anos que vivi aqui dentro, podendo estar em um ambiente saudável e ser incentivada por tantos. Vocês são luz. Seria difícil citar todos os nomes, vocês sabem o tamanho da nossa "família". Ao **Gian**, que vibrou

nas diversas concretagens. **Ao Hinoel**, colega do PPGEC, colega do itt Performance e melhor pessoa para se dialogar sobre dúvidas acadêmicas. **Ao Roberto Christ**, pelo auxílio em todos os dilemas de um doutorado e sempre na “boca” da betoneira comigo nos momentos de aperto. **Ao Bruno Fernandes e o Augusto Gil**, ex-colegas e inspiração dessa vida. **Maira e Gabi**, que ajudaram em todos os momentos, inclusas as crises.

À **todos meus amigos**, que se preocuparam com a rotina de uma doutoranda e souberam ser presentes e se importar. Ex-colegas da Universidade, pessoal do grupo escoteiro, amigos que fiz na vida, amigos do intercâmbio da Coréia do Sul, colegas de profissão, amigas do mestrado, amigos da minha segunda cidade, São Sebastião do Caí.

Agradeço ao **Professor Dr Wagner Bettiol** por ter disposto das bactérias para desenvolvimento da pesquisa, possibilitando continuar o desenvolvimento nacional desse tópico. **Ao Marcelo Krumenauer**, ex colega de faculdade e de trabalho, na pessoa de quem agradeço a Concredul, por todos os materiais doados para o desenvolvimento dessa pesquisa. Obrigada por contribuírem com a pesquisa científica, pelo auxílio na coleta dos materiais e pelas portas sempre abertas. À **Pervale** pelo apoio a essa pesquisa na doação das perlitas para confecção das amostras e apoio no desenvolvimento.

À **Monique**, laboratorista do curso de Geologia que teve sempre o maior cuidado e paciência ao me ensinar a diferença entre técnicas de ensaio além daquilo que se lê em publicações. **Aos colegas do itt Fossil** pelo empréstimo da lupa, auxílio, realização de ensaios, interpretação de ensaios e companhia. **Ao Sr Lauro** pelo corte das amostras. À **Andrea** pela ajuda nos difratogramas e a **Michele** pelo DRX. **Aos colegas itt Fuse**, pelas inúmeras vezes que abriram as portas para a realização de ensaios, coletas de amostras, disposição e coleta, pela paciência nas ligações, e-mails e visitas, vocês são vizinhos maravilhosos. **Maurício, Leandro, Clarissa, Luiz Felipe e Leonel**, obrigada.

Aos colegas e amigos do LMC- Laboratório de Materiais de Construção, muito obrigada pela ajuda na realização de ensaios diversos. Obrigada pelas conversas e pela acolhida nos momentos de programa experimental. **Ao Rodrigo Périco**, ex-colega de faculdade, de trabalho e amigo, por toda a ajuda nos momentos de concretagem e para aliviar o fardo desse programa experimental, além das revisões.

Aos colegas do PPGEC- Programa de pós-graduação em engenharia civil, pelas conversas, auxílio, momentos de apoio. **As funcionárias do LCVMat-** Laboratório de caracterização e valorização de materiais pela realização de ensaios nos materiais.

Aos funcionários da maquetaria, colegas e amigos, pela confecção das formas de madeira utilizada para um grupo de amostras desse programa experimental, pela sua agilidade e disposição.

Aos membros das bancas de qualificação e defesa final pelas contribuições.

A UNISINOS, pelo fornecimento da bolsa de pesquisa.

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

RESUMO

PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto.** 2020. 350 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2020.

Essa pesquisa objetivou a avaliação de quatro dos mecanismos de autocicatrização do concreto: pelo consumo de cimento, pela utilização de pozolanas, pelo uso de soluções químicas e pelo uso de soluções bacterianas. Analisou-se as condições de cura submersa e úmida e três condições de exposição: a referência, com inserção em câmara de carbonatação e com exposição em névoa salina. Os traços foram caracterizados pela resistência à compressão e índices físicos. A eficiência da cicatrização foi avaliada através do microscópio de alta precisão, do tipo estéreo zoom. Ainda, foram realizados os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) somada à EDS e difração de raios-X. Foram realizados estudos pilotos que permitiram traçar a curva de crescimento da bactéria *B subtilis* e que mostraram a superioridade da perlita expandida em relação à argila expandida como agregado para encapsulamento, além da análise comparativa de diferentes concentrações de soluções bacterianas. Percebeu-se nas amostras nas quais avaliou-se o consumo de cimento que a exposição à carbonatação pode ter afetado negativamente a formação de produtos de cicatrização. A formação de produtos percebida aponta para C-S-H, C-A-S-H e CaCO_3 . Nas amostras pozolânicas, notou-se uma cicatrização média de até 0,53mm para cicatrização do tipo contínua e 0,45mm para pontual. Foram identificados na técnica de DRX os mesmos elementos citados, além de produtos que compõem as pozolanas, como SiO_2 . Nas amostras com solução química houve formação de produto sobressalente a espessura da fissura. Dentre os produtos identificados, há C-S-H, CaCO_3 , SiO_2 e CaO. Avaliando-se as amostras contendo soluções bacterianas, atingiu-se uma cicatrização contínua de 1,67mm máxima e média máxima de 1,48mm. Ao analisar as possibilidades de cura submersa e úmida, houve equilíbrio entre o número de ocorrências. A presença de CO_2 e Cl^- não afetou a formação da cicatrização. Em termos de identificação dos produtos formados, contou-se com a calcita e o C-S-H.

Palavras-chave: Concreto autorregenerante. Durabilidade. Autocicatrização. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This research aimed to analyse four mechanisms of self-healing, by cement consumption, by pozzolans, by chemical and bacterial solutions. These compositions were submitted to water submersion cure and umid cure, also considering three conditions of exposition: reference, carbonation chamber and salt spray chamber. These traces were characterized by mechanical strength and fisical characteristics. Healing efficiency was assessed using a high-precision microscope. In addition, scanning electron microscopy (SEM) added to EDS and X-ray diffraction tests were performed. Pilot experiment were carried out, allowing to trace the growth curve of the bacterium *B subtilis*, and to compare perlite and clay as options for aggregates encapsulation. It was noticed that in the samples where cement consumption was evaluated, the exposure to carbonation may have affected the formation of healing products. Products C-S-H, C-A-S-H and CaCO_3 were formed. In samples with pozzolanic materials, it was noted that among the average values, the largest was 0.53 mm for continuous healing and 0.45 mm for punctual healing. Again, carbonation affected product formation. The same elements mentioned were identified in the DRX, in addition to products that make up the pozzolans used, such as SiO_2 , for example. In the samples containing chemical solutions, it is worth to notice that product occurs on the crack opening and also at sample surface. Among the products identified, there were C-S-H, CaCO_3 , SiO_2 and CaO. Evaluating the samples containing bacterial solutions, in terms of the healing of fissures, a maximum 1.67 mm and maximum average of 1.48 mm countinuos healing was reached, demonstrating the potential of the technique. When analyzing the possibilities of submerged and moist healing, there was a balance between the number of occurrences. Assessing the impact of aggressive environments, it is worth noting that the presence of CO_2 and Cl^- did not affect the formation of healing. In terms of the identification of the products formed, it was noted the presence of calcite and C-S-H.

Key-words: Self-healing concrete. Durability. Self-repairing. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo da necessidade de intervenção e custo estimado de reparo das estruturas com e sem a utilização de SHC	50
Figura 2 – Mecanismos de autorregeneração dos concretos (naturais, biológicos e químicos).....	61
Figura 3 – Proposta de núcleo de concreto permeável em elemento de concreto - Rede de transporte de agentes autoregenerantes.....	68
Figura 4 – Fenômenos de cura do corpo humano - (a) coagulação do sangue e (b) recuperação dos ossos	69
Figura 5 – Comparação do desenvolvimento da resistência à compressão das amostras quanto aos nutrientes orgânicos utilizados	72
Figura 6 – Mecanismo de atuação do SHC- ação de soluções bacterianas	73
Figura 7 – Estrutura das bactérias e mecanismos da autorrecuperação (a) estrutura das bactérias (b) células carregadas negativamente (c) produção biomineral pelos íons	73
Figura 8 – Verificação da atuação das bactérias em SHC- Diagnóstico por imagens	77
Figura 9 – Preparo de solução bacteriana (a) líquido base (b) dispersão bactérias .	79
Figura 10 – Número projetado de cápsulas para 90% de probabilidade de uma fissura tocar alguma cápsula, para as disposições em camadas (preto) e aleatória (cinza).....	84
Figura 11 – Mecanismo de cura autonômico com agente de cura encapsulado	85
Figura 12 – Comparação entre o encapsulamento com perlita expandida (a) e argila expandida (b)- agregados leves com agente químico autorregenerante	86
Figura 13 – Estrutura da perlita expandida verificada através da MEV.....	86
Figura 14 – Impregnação de agregados leves com câmara acrílica à vácuo	87
Figura 15 – Procedimentos de impregnação de agentes de autorregeneração com e sem vácuo, análise da absorção em percentual	88
Figura 16 – Encapsulação de argila expandida- tratamento superficial com cimento	89
Figura 17 – Sistema de conexão - disposição dos microvasos ao longo do elemento de concreto	92

Figura 18 – Dispositivo com placas metálicas para a produção de fissuras no estado fresco.....	101
Figura 19 – Efeito parede em elementos de concreto	102
Figura 20 – Análise de amostras de SHC contendo CV e EAF, com uso de microscópio de alta precisão (7 dias, 7+30 dias e 7+90 dias)	106
Figura 21 – Utilização da MEV para identificação da selagem de fissuras (a) concreto convencional (b) SHC	107
Figura 22 – Verificação do comportamento de amostras contendo soluções bacterianas (a) controle (b) em água de amassamento (c) encapsuladas - AE e (d) encapsuladas -PE.....	108
Figura 23 – Utilização da técnica da MEV para identificação da ruptura de microcápsula	108
Figura 24 – Utilização da técnica da MEV para verificação da precipitação da calcita pelas bactérias (a) <i>sphaericus</i> e (b) <i>subtilis</i>	109
Figura 25 – Utilização da MEV para verificação dos produtos formados na regeneração de concretos – <i>Calcite</i> (calcita), <i>ettringite</i> (ettringita), <i>portlandite</i> (portlandita)	109
Figura 26 – Utilização de microtomografia computadorizada para visualização da eficácia de uso de PSA em SHC - umidade de cura de 90%	110
Figura 27 – Verificação da presença e distribuição de água no interior de uma fissura em amostra de argamassa – (a) por ensaio e (b) por modelos matemáticos	111
Figura 28 – Utilização da técnica de EDS somada à MEV em elemento de concreto	112
Figura 29 – Técnica de MEV somada a EDS de SHC contendo solução bacteriana	113
Figura 30 – Análise de ruptura de agregado leve para encapsulamento e composição química da amostra pela técnica de EDS	113
Figura 31 – FTIR em amostra contendo solução bacteriana imersa em AE	114
Figura 32 – Emprego de DRX em amostra de compósito cimentício com CV na composição - diferentes situações de cura	115
Figura 33 – Análise mecânica de concreto convencional e SHC após fissuração. .	118
Figura 34 – Reganho de propriedades mecânicas	119

Figura 35 – Amostra para ensaio de capilaridade- Envoltória da região não fissurada para bloquear a troca de umidade com ambiente externo	120
Figura 36 – Comparação da estrutura porosa da AE e da PE por MEV- AE (a) aprox. de 51x e (b) aprox. de 100x (c) aprox. de 500x e (d) aprox. de 2000x.	127
Figura 37 – Imagens de MEV da AE	128
Figura 38 – Imagem gerada – MEV - PE (a) aprox.de 100x (b) aprox. de 400x (c) aprox. de 500x interna (d) aprox. de 500x aspecto superficial da PE ..	129
Figura 39 – Análise comparativa da microestrutura de amostras de (a) AE na superfície e (b) PE nos poros, ambas com aprox. de 500x, por MEV ..	130
Figura 40 – Encapsulamento de agregado - proteção com envoltória de cimento (a) argila expandida durante o processo de encapsulamento (b) perlita expandida já revestida de cimento e (c) perlita com rompimento	132
Figura 41 – Capturas de tela geradas pelo equipamento de medição tridimensional (a) captura inicial (b) ampliação e (c) fissura e cicatrização.....	133
Figura 42 – Resistência à compressão- estudo piloto A.....	135
Figura 43 – Mecanismo de ruptura de concretos contendo AE	135
Figura 44 – Absorção capilar de água (g) aos 28 dias, no estudo piloto A	137
Figura 45 – Indícios de cicatrização da amostra AE15.....	138
Figura 46 – Comparativo de cicatrização aos 28 e 56 dias do estudo piloto A	140
Figura 47 – Curva de crescimento <i>Bacillus Subtilis</i> AP91	143
Figura 48 – Distribuição granulométrica do cimento- CP-II-F-40	145
Figura 49 – Resistência à compressão média dos traços- estudo piloto B	148
Figura 50 – Absorção média dos traços com e sem o produto de cicatrização	149
Figura 51 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.6- amostra 1 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (d) 42 dias	150
Figura 52 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.6- amostra 2 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (dias)	151
Figura 53 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.6- amostra 3 (a) 7 dias (b) 28 dias (c) 42 dias (d) 42 dias	151
Figura 54 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.7- amostra 1 (a) 28 dias (b) 42 dias e amostra 2 (a) 7 dias (b) 42 dias	152
Figura 55 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.7 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias e (d) 42 dias	152

Figura 56 – Precipitação cristalina em amostra do traço SOL.7 (a) 28 dias (b) 28 dias (c) 42 dias (d) 42 dias	153
Figura 57 – Precipitação em “placas” em amostra do traço SOL.7 (a) 28 dias (b) 28 dias (c) 42 dias (d) 42 dias.....	153
Figura 58 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.8 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (d) 42 dias	154
Figura 59 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.8 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (d) 42 dias	154
Figura 60 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.8 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (d) 42 dias	155
Figura 61 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.8 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (d) 42 dias	155
Figura 62 – Precipitação em “placas” em amostra do traço SOL.8 (a) 28 dias (b) 42 dias.....	156
Figura 63 – MEV por elétrons secundários de um grão de PE com magnificação de (a) 100x e (b) 500x	157
Figura 64 – MEV de um grão rompido de PE, com magnificação de 2.000x	158
Figura 65 – Espectro analisado na EDS na PE inserida (a) na matriz e PE e (b) formato de grão	158
Figura 66 – Imagens da microtomografia nos três sentidos da amostra (a) visualização parcial da amostra (b) identificação do volume e dos poros (c) microfissura conectando grãos de PE	159
Figura 67 – Variáveis do programa experimental	162
Figura 68 – Regeneração ocorrendo das paredes para ponto central - PBE	170
Figura 69 – Formação de produto de cicatrização no formato pontual (CP)	171
Figura 70 – Formação de produto na parede interna da fissura (PI).....	171
Figura 71 – Formação de produto de regeneração excedente à abertura da fissura	171
Figura 72 – Etapas percebidas na formação de produtos de cicatrização (a) formação da fissura (b) propagação da fissura (c) formação interna de produto de cicatrização (d) maior densificação no produto (e) cicatrização completa	172
Figura 73 – Formação de CaCO ₃ na superfície da amostra	172
Figura 74 – Distribuição granulométrica da CV	176

Figura 75 – Resistência à compressão - amostras com variável de CC - valores potenciais em MPa	180
Figura 76 – Amostra CC260.N.CU.4, com corte mecânico (a) 28 dias, aprox. 10x (b) 56 dias, aprox. 7,5x e (c) 84 dias, aprox. 30x	182
Figura 77 – Amostra CC260.R.CS.8, com corte mecânico (a) 7 dias, sem aumento (b) 28 dias, aprox.10x e (c) 84 dias, aprox. 40x	183
Figura 78 – Amostra CC260.N.CS.4, com fissura pelo ensaio de tração na flexão (a) 28 dias, aprox. 10x (b) 56 dias, aprox. 10x (c) 84 dias, aprox. 7,5x	183
Figura 79 – Amostra CC260.R.CU.11, com fissura pelo ensaio de tração na flexão (a) 7 dias, aprox. 10x (b) 28 dias, aprox. 7,5x (c) 56 dias, aprox. 7,5x	184
Figura 80 – Verificação de CP- amostra CC300.R.CU.12, idade de 28 dias, aprox. de 10x	185
Figura 81 – Amostra exposta à carbonatação, em CU com CP, (a) dimensão real e (b) aprox. de 10x	186
Figura 82 – Evolução da cicatrização na amostra CC300.R.CS.7a – FS (a) 7 dias, dimensão real (b) 28 dias, aprox 7,5x (c) 84 dias, aprox 7,5x (d) 84 dias, aprox 20x	186
Figura 83 – Evolução da cicatrização CC300.R.CU.12a - Esbranquiçado na irregularidade- dimensão de 1,2 mm, aprox de 7,5x	187
Figura 84 – Cicatrização na amostra CC300.R.CS.9b - Lâmina de CP (a) aprox. de 10x e (b) aprox de 7,5x.....	188
Figura 85 – Amostra CC360.N.CU.4d - (a)Formação de produto branco na irregularidade da fissura e (b) aprox. 20x - dimensão de 1,52 mm	188
Figura 86 – Cicatrização verificada na amostra CC360.R.CU.12b (a) sobreposição de produto na superfície da amostra (b) cicatrização ao longo de um trecho	189
Figura 87 – Espessura máxima e média cicatrizada (mm) nos diferentes traços, mecanismos de fissura e tipo de cicatrização- CC	193
Figura 88 – Difratoograma de raios-X- Variável de consumo de cimento- CC300....	195
Figura 89 – Difratoograma de raios-X- Variável de consumo de cimento- CC360....	195
Figura 90 – MEV- Variável de CC- (a) CC260, aprox de 3000x e (b) CC360, aprox 2000x	197
Figura 91 – Resistência à compressão- amostras com variável de uso de P - valores potenciais	199

Figura 92 – Índícios da cicatrização da amostra PC15.N.CU.6 lados a (a), b (b) e d (c), com aproximações de 7,5x, 7,5x e 20x, respectivamente, verificação aos 56 dias	203
Figura 93 – Índícios da cicatrização de amostra PC15.R.CS.7d, análise aos 84 dias (a) acúmulo na superfície (b) produto na borda interna da fissura	203
Figura 94 – Índícios da cicatrização de amostra PC15.R.CU.10d, análise aos 84 dias (a) aprox.. 7,5x e (b) aprox. 20x.....	204
Figura 95 – Formação de produtos de cicatrização na amostra PC30.R.CS.7a, sem escala (a) e PC30.R.CS.9a (b), aprox de 7,5x, idade de 84 dias	205
Figura 96 – Registros de cicatrização da amostra PC30.R.CU.12b, idade de 84 dias, (a) fissura secundária, aprox 7,5x (b) superfície, aprox 20x (c) interior da fissura principal, aprox 30x	206
Figura 97 – Evidências de formação de produtos - amostra PS7.5.N.CS.3c, idade de 84 dias (a) aprox. de 10x (b) aprox. de 20x.....	207
Figura 98 – Verificação de cicatrização da fissura secundária na PS7.5.N.CU.6c, espessura máxima recuperada de 0,34 mm, idade de 84 dias (a) dimensão real (b) aprox. 7,5x	207
Figura 99 – Ocorrências verificadas na PS7.5.R.CS.7d (a) aprox. 20x (b) aprox. de 40x	208
Figura 100 – Verificação das ocorrências da amostra PS7.5.R.CS.8d, aos 84 dias (a) aprox. 7,5x e (b) aprox. 30x	208
Figura 101 – Verificação das ocorrências na amostra PS7.5.R.CS.9b (a) aprox de 7,5x e (b) aprox de 20x	209
Figura 102 – Evidências de cicatrização na amostra PS15.N.CU.4c, aos 84 dias (a) aprox. de 10x (b) aprox. de 40x (c) aprox. 30x.....	209
Figura 103 – Verificações na amostra PS15.R.CS.8a, classificação da ocorrência como PBE, (a) aprox. de 7,5x, 56 dias, (b) aprox. 20x, 56 dias (c) aprox. 30x, 56 dias e (d) aprox. de 7,5x, 84 dias	211
Figura 104 – Verificações realizadas na amostra PS15.C.CS.15d (a) aprox 20x (b) aprox 40x, interno (c) aprox de 40x, externo.....	211
Figura 105 – Evidências da cicatrização na amostra PS15.C.CU.16c, aprox. (a) 20x e (b) 30x	212
Figura 106 – Espessura máxima e média cicatrizada (mm) em cada um dos traços, tipos de fissura e tipo de cicatrização- utilização de pozolanas.....	216

Figura 107 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de pozolanas- CV	217
Figura 108 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de pozolanas- SA 7,5	218
Figura 109 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de pozolanas- SA 15	219
Figura 110 – MEV- Amostra com variável do uso de P- CV- (a)PC15, aprox. de 2000x e (b) PC30, aprox. de 12000x	220
Figura 111 – MEV- Amostra com variável do uso de P- SA, PS15, (a) aprox de 7500x e (b) 20000x.....	220
Figura 112 – Valores de resistência à compressão axial das amostras contendo SQ	223
Figura 113 – Ocorrências da amostra SQI10.N.CS.2 em (a) face a, aprox. 20x (b) face a, aprox. 20x, excedendo a fissura (c) face c, com coloração incolor e esbranquiçada, 56 dias	226
Figura 114 – Verificações realizadas na amostra SQI10.N.CS.3a (a) 56 dias, aprox 30x (b) 84 dias, aprox 10x (c) 84 dias, aprox 20x (d) 84 dias, aprox 20x	227
Figura 115 – Verificações realizadas- Amostra SQI10.N.CS.3b e SQI10.N.CU.4a	228
Figura 116 – Verificações na amostra SQI10.R.CS.7a (a) face a, aos 84 dias, PBE e CC, aprox de 20x e (b) produto excedente a abertura da fissura, aprox de 7,5x	228
Figura 117 – Verificações na amostra SQI10.R.CS.8b, ocorrência de PBE e CC (a) aprox. 40x, 84 dias (b) aprox. 10x, 84 dias (c) aprox. 20x, 84 dias ...	229
Figura 118 – Formação de CC na amostra SQI20.N.CU.4, aprox de 10x, aos 84 dias.	230
Figura 119 – Ocorrência de PBE, amostra SQI20.R.CU.4b, (a) aprox. de 30x, 84 dias (b) 50x, 84 dias.....	231
Figura 120 – Evidências de cicatrização das amostras (a) SQI20.N.CU.5b, aos 56 dias, aprox de 30x e (b) SQI20.C.CS.13c, aprox de 40x e 28 dias de idade	232
Figura 121 – Evidências de cicatrização amostra SQI20.C.CS.15b (a) zoom interno, aprox 30x, 56 dias e (b) externo, aprox 30x, 56 dias	232
Figura 122 – Ocorrências nas amostras (a) SQI30.N.CS.3b, aprox 40x, 56 dias e (b) SQI30.N.CU.4b, aprox 30x, 56 dias.....	233
Figura 123 – Ocorrências nas amostras (a) SQI30.N.CU.6b, aprox 30x, 84 dias (b)SQI30.R.CS.7a, aprox de 30x e 84 dias.....	234

Figura 124 – Ocorrências nas amostras (a) SQI30.R.CU.12b, aprox 20x, 84 dias e (b) SQI30.C.CS.15c, aprox 50x, 84 dias	234
Figura 125 – Amostra SQI30.C.CU.18d, aprox de 50x e idade de 56 dias	235
Figura 126 – Ocorrências na amostra (a) SQV10.N.CS.1a, aprox de 20x, 84 dias e (b) SQV10.N.CS.1b, aprox de 7,5x, 84 dias.....	236
Figura 127 – Evolução na cicatrização da amostra SQV10.N.CU.5b, análise aos (a) aprox 20x, 56 dias e (b) aprox 20x, 84 dias	236
Figura 128 – Formação de CC (a) SQV10.N.CS.2a, aprox 40x, 84 dias (b) e SQV10.R.CU.11b, aprox 20x, 84 dias.....	237
Figura 129 – Ocorrências (a) amostra SQV10.N.CU.5c, aprox 20x, 84 dias (b) amostra SQV10.R.CS.9a, aprox. 7,5x, 84 dias	238
Figura 130 – Ocorrências relacionadas a regiões com irregularidades nas amostras (a) SQV10.R.CU.11b, aprox. 30x (b) SQV10.R.CU.12b, aprox. de 30x (c) SQV10.R.CU.12b, aprox 50x.....	238
Figura 131 – Verificações nas amostras (a) SQV20.N.CS.1a, aprox 50x, 56 dias (b) SQV20.N.CS.2c, aprox 40x, 84 dias	239
Figura 132 – Amostra SQV20.N.CU.6b, formação de CC em 90% da amostra	240
Figura 133 – Ocorrências (a) amostra SQV20.R.CS.8b, aprox. 30x, 84 dias (b) amostra SQV20.R.CS.9b, aprox. 20x, 84 dias	240
Figura 134 – Ocorrências em amostras expostas à câmara de carbonatação (a) amostra SQV20.C.CS.15d, aprox. 40x, 84 dias (b) amostra SQV20.C.CU.18, aprox. 50x, 84 dias (c) amostra SQV20.C.CU.18, aprox. 50x, 84 dias	241
Figura 135 – Ocorrências nas amostras com fissuração provocada pelo corte (a) SQV30.C.CS.14, aprox. 20x, 56 dias e (b) SQV30.C.CU.17, aprox. 10x, 56 dias.....	241
Figura 136 – Verificações nas amostras (a) SQV30.N.CU.4c, aprox 20x, 84 dias e (b) SQV30.N.CU.5d, aprox 20x, 84 dias.....	242
Figura 137 – Ocorrências (a) amostra SQV30.R.CS.8b, aprox. 20x, 84 dias (b) amostra SQV30.R.CS.9b, aprox. 30x, 56 dias	242
Figura 138 – Ocorrências (a) amostra SQV30.R.CU.11a na borda da FP e FS, aprox 20x, depósito na superfície, 56 dias (b) amostra SQV30.R.CU.13c, aprox 30x, 56 dias	243

Figura 139 – Espessura máxima e média cicatrizada (mm) em cada um dos traços variando-se o mecanismo de formação de fissura e o tipo de cicatrização- SQ	248
Figura 140 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de soluções químicas- SQI10	249
Figura 141 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de soluções químicas- SQI20	249
Figura 142 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de soluções químicas- SQV10	250
Figura 143 – MEV- Amostra com variável do uso de SQ- (a) SQI20 aprox de 1700x e (b) SQV10 aprox 2300x	251
Figura 144 – MEV- Amostra com variável do uso de SQ – SQV 20 (a) aprox de 2000x e (b) aprox de 5000x	251
Figura 145 – Valores de resistência à compressão- traços com uso de SB	254
Figura 146 – Ocorrência de CC –Amostra SBI10.N.CU.6b (a) aprox. de 10x, 56 dias e (b) aprox. 30x, 56 dias	256
Figura 147 – Ocorrências nas amostras (a) SBI10.R.CS.7a, aprox 30x, 84 dias e (b) SBI10.R.CS.7c, aprox 30x, 84 dias	257
Figura 148 – Verificações na amostra SBI10.R.CS.7 (a) face a, aprox 40x, 56 dias (b) face b, aprox 20x, 56 dias	258
Figura 149 – Ocorrências verificadas na SBI10.R.CS.9d (a) FP, aprox 30x, 84 dias (b) FS, aprox de 30x, 84 dias	258
Figura 150 – Manifestação de CC na amostra SBI10.C.CS.15b, aprox 7,5x	259
Figura 151 – Ocorrência de CC na amostra SBI20.R.CS.7a, com aprox. de (a) 30x e (b) 50x, ambas aos 7 dias	259
Figura 152 – Verificação do produto de cicatrização formado na superfície da amostra SBI20.R.CS.9a, análise aos 7 dias (a) aprox. de 7,5x (b) aprox. de 40x.	260
Figura 153 – Ocorrências verificadas aos 7 dias, amostra SBI20.R.CU.11a (a) aprox de 40x, 7 dias (b) aprox de 50x, 7 dias	260
Figura 154 – Ocorrência de PBE e formação de placa na amostra SBI20.N.CU.4d (a) aprox. 10x, 56 dias (b) aprox. 30x, 56 dias	261
Figura 155 – Verificações na amostra SBI30.C.CS.14 (a) 28 dias e aprox de 7,5x e (b) 84 dias e aprox de 30x	261

Figura 156 – Verificações na amostra SBI30.C.CU.17 (a) ocorrência de CC e (b) aprox interior fissura	262
Figura 157 – Formação de produtos -PBE e acúmulo superficial- SBI30.N.CU.7b (a) aprox 20x, 7 dias (b) aprox 50x, 7 dias	262
Figura 158 – Formação de cicatrização aos 7 dias, PBE e acúmulo superficial (a) amostra SBI30.R.CS.8b, aprox 30x (b) SBI30.R.CS.9b, aprox 30x ...	263
Figura 159 – Ocorrências aos 7 dias, (a) PBE, amostra SBI30.R.CS.9c, aprox 40x (b) PBE, amostra SBI30.R.CS.9c, aprox 50x (c) acúmulo superficial, SBI30.R.CS.9d, aprox 50x.....	263
Figura 160 – Formação de produtos no formato de placas (a) SBI30.R.CU.12c, aprox de 20x (b) SBI30.C.CU.17a, aprox. de 30x, idade de 28 dias após carbonatação	264
Figura 161 – Ocorrências verificadas em amostras expostas à névoa salina (a) SBV10.N.CS.1a, aprox. 20x, 84 dias (b) SBV10.N.CU.4b, aprox. 30x, 56 dias	265
Figura 162 – Ocorrências na amostra SBI10.R.CS.7b (a) aprox 40x, 56dias (b) aprox 20x, 56 dias	265
Figura 163 – Ocorrências de CC com diferentes configuração, (a) SBV10.R.CS.9b, aprox 20x, 84 dias e (b) SBV10.C.CU.17b, aprox 30x, 56 dias	266
Figura 164 – Ocorrências aos 84 dias (a) SBV20.N.CU.6d, aprox 20x (b) SBV20.R.CS.7d, aprox. de 40x.....	266
Figura 165 – Amostra SBV20. R.CS.7b, 56 dias (a) aprox 20x e (b) aprox. 7,5x, com escorrimto	267
Figura 166 – Verificações em (a) amostra do grupo referência, SBV20.R.CU.12a, aprox. 50x, 84 dias e (b) exposto à carbonatação acelerada, SBV20.C.CU.18b, aprox. 20x, 84 dias	267
Figura 167 – Ocorrências verificadas aos 7 dias (a) SQV30.R.CS.7d , aprox. 20x (b) SQV30.R.CS.8b, aprox. 7,5x (c) SQV30.R.CS.8c, aprox.10x	268
Figura 168 – Ocorrências na amostra SQV30.R.CS.9a (a) aprox 20x, 56 dias (b) aprox 20x, 7 dias	269
Figura 169 – Progressão na cicatrização da amostra SQV30.C.CU.17d (a) aprox. 20x, 28 dias, PBE (b) aprox. 20x, 84dias acúmulo de cristais sobre a superfície da amostra	269

Figura 170 – Progressão da cicatrização na amostra SQV30.R.CU.18a -Ocorrência no formato de placas (a) aprox 10x, 28 dias (b) aprox 50x, idade final	270
Figura 171 – Espessura máxima e média cicatrizada (mm) em cada um dos traços variando-se o mecanismo de formação de fissura e o tipo de cicatrização- uso de SB	276
Figura 172 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de SBI30	278
Figura 173 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de SBV30	278
Figura 174 – MEV- Amostra com variável SBI30 - (a) aprox. de 2000x (b) aprox. de 5000x	279
Figura 175 – MEV- Amostra com variável - SBV30 - (a) aprox. de 2000x (b) aprox. de 5000x	280
Figura 176 – Valores potenciais de resistência à compressão (MPa)	282
Figura 177 – Absorção de água e índice de vazios das diferentes composições analisadas	283
Figura 178 – Valores médios dos diferentes tipos de cicatrização em cada traço ..	287
Figura 179 – Valores potenciais das diferentes ocorrências de cicatrização em cada composição	288
Figura 180 – Tipos de ocorrências de cicatrização em cada grupo de composições	290

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diretrizes de norma para controle de fissuração visando a durabilidade das estruturas de concreto	54
Tabela 2 – Valores de fissuração total ϵ_{cs} de um concreto estrutural após 50 anos, considerando concretos de alta resistência (mm).....	56
Tabela 3 – Abertura de fissura limite pela ACI 224 conforme a condição de exposição	57
Tabela 4 – Características de composição dos SHC com o uso de pozolanas	67
Tabela 5 – Bases de dados- coleções internacionais de culturas microbianas	70
Tabela 6 – Mecanismos de produção de carbonato através de soluções bacterianas	75
Tabela 7 – Espécies bacterianas usadas para formação de CaCO_3 por hidrólise de uréia	76
Tabela 8 – Espécies utilizadas para a oxidação de componentes orgânicos	76
Tabela 9 – Características das soluções bacterianas empregadas em SHC.....	80
Tabela 10 – Efeito da inserção de diferentes tipos de bactérias nas características de resistência à compressão, permeabilidade e absorção de água dos concretos.....	82
Tabela 11 – Soluções bacterianas (tipo e concentração) e impacto na resistência à compressão dos concretos.....	82
Tabela 12 – Estudos já desenvolvidos nas diferentes técnicas de autorregeneração	94
Tabela 13 – Comparação de diferentes estratégias de autorrecuperação, vantagens e desvantagens	95
Tabela 14 – Ensaio para indução de fissuras baseados no tipo da matriz de concreto .	99
Tabela 15 – Testes utilizados para avaliar a cicatrização e recuperação das propriedades mecânicas e de durabilidade após a cicatrização	105
Tabela 16 – Misturas contendo diferentes soluções bacterianas e referente resistência mecânica à compressão	117
Tabela 17 – Experimento de análise de recuperação das propriedades mecânicas	119
Tabela 18 – Traços unitários do estudo piloto A - Amostras com uso de PE e AE .	123
Tabela 19 – Propriedades físicas e químicas do cimento.....	124

Tabela 20 – Granulometria do agregado miúdo - estudo piloto A	125
Tabela 21 – Granulometria do agregado graúdo- estudo piloto A.....	125
Tabela 22 – Composição química da AE	126
Tabela 23 – Composição química da PE.....	126
Tabela 24 – Características físicas da PE	127
Tabela 25 – Elementos identificados em percentual- Análise semiquantitativa via EDS- AE	129
Tabela 26 – Elementos identificados em percentual- Análise semiquantitativa via EDS- PE	130
Tabela 27 – Laudo técnico - Silicato de Sódio Neutro Lote 0218.....	131
Tabela 28 – Resistência à compressão- estudo piloto A - valores individuais e potenciais	134
Tabela 29 – Absorção de água por capilaridade do estudo piloto A (g)	136
Tabela 30 – Cicatrização das fissuras- Estudo piloto A	138
Tabela 31 – Propriedades e requisitos do cimento	145
Tabela 32 – Características do agregado natural miúdo.....	146
Tabela 33 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo	146
Tabela 34 – Composição e identificação das amostras	147
Tabela 35 – Valores obtidos de resistência à compressão – Estudo piloto B	148
Tabela 36 – Síntese dos resultados de análise visual	157
Tabela 37 – Percentuais dos elementos encontrados na amostra.....	159
Tabela 38 – Síntese das misturas - Mecanismos de autocicatrização, nomenclatura, variáveis e níveis de variação	163
Tabela 39 – Traços utilizados no programa experimental principal	164
Tabela 40 – Classificação das ocorrências na cicatrização	170
Tabela 41 – Identificação das amostras e respectivas condições de exposição e cura	173
Tabela 42 – Estrutura das tabelas para apresentação das ocorrências em cada traço	173
Tabela 43 – Amostras analisadas de cada mecanismo- DRX	174
Tabela 44 – Características dos agregados graúdos.....	177
Tabela 45 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	177
Tabela 46 – Resistência à compressão (MPa) - amostras com variável de CC	179
Tabela 47 – Resultados dos ensaios físicos - amostras com variável de CC	181

Tabela 48 – Síntese dos resultados obtidos nas amostras -CC	190
Tabela 49 – Verificações através de energia dispersiva de raios-X- CC260 e 360.	197
Tabela 50 – Resistência à compressão (MPa)- amostras com variável P	198
Tabela 51 – Resultados - ensaios físicos nas amostras com variável P	201
Tabela 52 – Síntese dos resultados obtidos nas amostras com análise do uso de P	213
Tabela 53 – Verificação pela técnica de Energia dispersiva de raios-X.....	221
Tabela 54 – Resultados de resistência à compressão (MPa) das amostras contendo SQ	222
Tabela 55 – Valores obtidos de índices físicos- Amostras com soluções químicas	225
Tabela 56 – Síntese dos resultados obtidos nas amostras com uso SQ encapsuladas em agregados de PE.....	244
Tabela 57 – Análise de EDS – SQV10 e SQV20.....	252
Tabela 58 – Resistência à compressão (MPa) das amostras contendo SB.....	253
Tabela 59 – Valores obtidos de índices físicos- Amostras com SB	255
Tabela 60 – Síntese dos resultados obtidos nas amostras com uso de SB.....	274
Tabela 61 – Identificação dos elementos através de EDS- Solução bacteriana	280
Tabela 62 – Síntese das ocorrências de cicatrização.....	285
Tabela 63 – Espessura média e potencial de cada mecanismo	290
Tabela 64 – Percentual de ocorrências em cada tipo de exposição	292
Tabela 65 – Distribuição percentual das ocorrências em relação ao tipo de cura ..	294
Tabela 66 – Distribuição das ocorrências de CC e CP nas curas CU e CS.....	295

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ACI	<i>American concrete institute</i>
A	Indicativo dos picos de aragonita
AE	<i>Argila expandida</i>
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
AS	<i>Australian Standard</i>
ATCC	<i>American Type Culture Collection</i>
BCCM	<i>Belgium Coordinated Collection of Microorganisms</i>
BET	Ensaio de Brunauer, Emmett e Teller
C	Atribuído a amostras contendo cinza volante
C'	Atribuído aos picos de calcita
CA	Concreto armado
CAA	Classe de agressividade ambiental
CAD	Concreto de alto desempenho
CAR	Concreto de alta resistência
CC	Uso nesse estudo para a autorregeneração pelo consumo de cimento
CC	Utilizado para cicatrização contínua na apresentação das ocorrências
CCAA	<i>Cement concrete aggregates Australia</i>
CIP	<i>Collection de l'Institut Pasteur</i>
CMBS	<i>Chemically modified bacillus subtilis</i>
CP	Cicatrização pontual
CS	Cura submersa
CT	Cicatrização total
CU	Cura úmida
CV	Cinza volante
CWI	<i>Coda wave interferometry</i>
DRX	Difração de raios-X
DSMZ	<i>Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen</i>
EAF	Escória de alto forno
EDS	Energia dispersiva de espectroscopia de raios-X

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EN	<i>European normalization</i>
ELS	Estado Limite de Serviço
ELS-D	Estado limite de descompressão (ELS-D)
ELS-Dp	Estado limite de descompressão parcial (ELS-DP)
ELU	Estado Limite último
FIB	<i>Fédération internationale du beton</i>
FM	Fissura mecânica
FP	Fissura principal
FS	Fissura secundária
FTIR	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
GSC	Gestão e sustentabilidade na construção
IS	Indian Standard
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
JCM	<i>Japan Collection of Microorganisms</i>
LCVMat	Laboratório de Caracterização e valorização dos materiais
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma brasileira regulamentada
NCCB	<i>Netherlands Culture Collection of Bacteria</i>
NCIMB	<i>National Collection of Industrial, Marine and Food Bacteria.</i>
P	Atribuído as amostras contendo pozolanas
PBE	Produto na borda externa
PBI	Produto na borda interna
PCA	<i>Portland cement association</i>
PE	Perlita expandida
PMMA	Polimetacrilato de metila
PPGEC	Programa de pós graduação em engenharia civil
PSA	Polímero super absorvente
PVA	Policloreto de vinila
Q	Indicativo dos picos de quartzo
RCD	Resíduos de construção e demolição

REF	Amostra sem uso de agregados leves, estudo piloto A
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages</i>
RH	Umidade relativa do ar
S	Atribuído as amostras contendo sílica ativa
SEM	<i>Scanning electron microscopy</i>
SHC	<i>Self healing concrete</i>
SOL	Concentração da solução bacteriana, estudo piloto C
SRB	<i>Sulphate reduction bacteria</i>
TGA	Análise termogravimétrica
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UFC	Unidade Formadora de colônia
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande Sul
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
V	Indicativo dos picos de vaterita
WDCM	<i>World data centre for microorganisms</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de alumínio
bar	Unidade de pressão
CaCO_3	Carbonato de cálcio
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomita
CaO	Óxido de cálcio
C-A-S-H	Silicatos aluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H, forma abreviada de $\text{C}_3\text{A}.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$)
CaSiO_3	Metassilicato de cálcio
CH	Hidróxido de cálcio (CH, forma abreviada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$)
CH_4	Metano
Cl^-	Íons cloreto
C_2S	Silicato dicálcico (C_2S , forma simplificada de $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$)
C_3S	Silicato tricálcico (C_3S , forma simplificada de $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$)
$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CaO}_6$	Lactato de cálcio
CO_2	Dióxido de carbono
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado (C-S-H, forma abreviada de $\text{CaO}.\text{SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$)
d	Diâmetro
ε_{cs}	Fissuração total
ε_{cbs}	Fissuração básica
$\varepsilon_{c ds}$	Fissuração causada pela perda de umidade
ELS-D	Estado limite de descompressão
ELS-F	Estado limite de formação de fissuras
ELS-W	Estado limite de abertura de fissuras
Fe^{2+}	Íon ferroso
Fe_2O_3	Óxido de ferro
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido de ferro II
g	Gramas
g/l	Gramas por litro
h	Altura

h	Horas
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
kg	quilograma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
l	Abertura da fissura
MgCO ₃	Carbonato de magnésio
MgO	Óxido de magnésio
MJ	Mega Joule
MJ/kg	Mega Joule por quilo
ml	mililitro
mm	Milímetros
µm	Micrômetros
Na ₂ O	Óxido de sódio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio
NO ²⁻	Dióxido de nitrogênio
NO ³⁻	Nitrato de amônio
O ₂	Oxigênio
pH	Potencial hidrogeniônico
pol	Polegadas
rpm	Rotações por minuto
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Óxido sulfúrico
t	Idade do concreto, em dias
ts	Idade do concreto, no início da secagem, em dias
U\$/m ³	Dólares americanos por metro cúbico
w _k	Abertura de fissura
%	Percentual
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	43
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	48
1.3 OBJETIVOS.....	49
1.3.1 Objetivo Geral	49
1.3.2 Objetivos Específicos	49
1.4 JUSTIFICATIVA	49
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA	51
2 CONCRETO ARMADO	53
2.1 FISSURAS EM CONCRETO ARMADO	53
2.1.1 Limites para abertura de fissuras	54
2.2 CONCRETO AUTORREGENERANTE E AUTOCICATRIZANTE	58
2.2.1 Tipos de autorregeneração e autocicatrização	59
2.2.1.1 Classificação	59
2.2.1.2 Mecanismos	60
2.2.1.2.1 <i>Autogênico pelo consumo de cimento</i>	61
2.2.1.2.2 <i>Autogênico pela utilização de pozolanas</i>	64
2.2.1.2.3 <i>Autogênico pelo tratamento com os agregados</i>	67
2.2.1.2.4 <i>Autônomo pelo emprego de soluções bacterianas</i>	69
2.2.1.2.5 <i>Autônomo- Encapsulamento de soluções químicas e biológicas em agregados leves</i>	83
2.2.1.2.6 <i>Autônomo através do uso de polímeros superabsorventes</i>	90
2.2.1.2.7 <i>Autônomo através de redes vasculares</i>	91
2.2.1.2.8 <i>Aditivos químicos para concreto - Catalisadores cristalinos</i>	92
2.2.1.3 Lacunas identificadas na técnica.....	94
2.2.2 Influência do ambiente de inserção das estruturas: ambientes com a presença de cloretos e dióxido de carbono	96
2.2.3 Ensaio e técnicas de laboratório para provocação de fissuras e verificação de eficácia da autorregeneração do concreto	99
2.2.3.1 Ensaio e técnicas para indução de fissuras	99
2.2.3.1.1 <i>Ensaio mecânicos</i>	99
2.2.3.1.2 <i>Aberturas com disposição de juntas</i>	100
2.2.3.1.3 <i>Aberturas pela ação do calor</i>	102

2.2.3.1.4	<i>Aberturas após endurecimento do concreto</i>	103
2.2.3.2	Avaliação da eficácia dos SHC	103
2.2.3.2.1	<i>Ensaio de diagnóstico por imagem</i>	106
2.2.3.2.2	<i>Diagnóstico por imagem somado a ensaios químicos e ensaios químicos independentes</i>	111
2.2.3.2.3	<i>Ensaio mecânico</i>	116
2.2.3.2.4	<i>Ensaio físico</i>	120
2.2.4	Considerações sobre o referencial teórico	121
3	ESTUDOS PILOTO	123
3.1	ESTUDO PILOTO A - VERIFICAÇÃO DA IMPREGNAÇÃO DE SOLUÇÃO QUÍMICA EM AGREGADOS DE ARGILA E PERLITA EXPANDIDA	123
3.1.1	Seleção dos materiais	123
3.1.1.1	Cimento	124
3.1.1.2	Agregados convencionais	124
3.1.1.3	Agregados leves	125
3.1.1.3.1	<i>Argila expandida</i>	127
3.1.1.3.2	<i>Perlita expandida</i>	129
3.1.1.4	Agente para encapsulamento	130
3.1.2	Procedimentos metodológicos	131
3.1.2.1	Encapsulamento dos agregados	131
3.1.2.2	Moldagem e cura	132
3.1.2.3	Ensaio	132
3.1.2.3.1	<i>Resistência à compressão</i>	132
3.1.2.3.2	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	133
3.1.2.3.3	<i>Verificação da cicatrização</i>	133
3.1.3	Resultados do Estudo Piloto A	134
3.1.3.1	Resistência mecânica à compressão	134
3.1.3.2	Absorção de água por capilaridade	136
3.1.3.3	Análise da cicatrização das fissuras através de microscópio óptico	137
3.1.4	Considerações sobre o estudo piloto A	141
3.2	ESTUDO PILOTO B - OBTENÇÃO DA CURVA DE CRESCIMENTO DA <i>BACILLUS SUBTILIS</i> AP91 E VERIFICAÇÃO DO IMPACTO DA CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO BACTERIANA	142
3.2.1	Procedimentos metodológicos para cultivo da solução bacteriana	142

3.2.2 Análise comparativa da concentração da solução bacteriana	144
3.2.2.1 Seleção dos materiais	144
3.2.2.2 Composição das amostras	146
3.2.2.3 Ensaio	147
3.2.2.4 Resultados	148
3.2.2.4.1 Resistência mecânica à compressão	148
3.2.2.4.2 Absorção de água por capilaridade	149
3.2.2.4.3 Análise visual	150
3.2.2.4.4 MEV associada a EDS	157
3.2.2.4.5 Microtomografia 3D	159
3.2.2.5 Considerações sobre o estudo piloto B	160
4 MATERIAIS E MÉTODOS- PROGRAMA EXPERIMENTAL PRINCIPAL	161
4.1 VARIÁVEIS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	164
4.1.1 Estudo de viabilidade de produção dos SHC.....	164
4.1.1.1 SHC com mecanismo autogênico pelo consumo de cimento	164
4.1.1.2 SHC com mecanismo autogênico pela utilização de adições pozolânicas .	165
4.1.1.3 SHC mecanismo autônomo - soluções químicas	165
4.1.1.4 SHC mecanismo autônomo - soluções bacterianas	166
4.1.2 Fluxograma - Análises	166
4.2 PROCEDIMENTOS PADRÃO.....	167
4.2.1 Confeção de amostras	167
4.2.2 Cura.....	167
4.2.3 Caracterização dos concretos	168
4.2.4 Produção de fissuras.....	168
4.2.5 Aceleração da deterioração.....	168
4.2.5.1 Câmara de carbonatação acelerada	168
4.2.5.2 Câmara de névoa salina	169
4.3 ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA EFICÁCIA DA CICATRIZAÇÃO	169
4.3.1 Registro de imagens	169
4.3.2 Ensaio de DRX.....	174
4.3.3 Ensaio de MEV e Energia dispersiva de raios-X	175
4.4 MATERIAIS.....	175
4.4.1 Cimento.....	175
4.4.2 Adições pozolânicas.....	175

4.4.2.1 Cinza volante.....	176
4.4.2.2 Sílica ativa	176
4.4.3 Agregados.....	177
4.4.4 Soluções	178
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	179
5.1 AUTOCICATRIZAÇÃO PELO CONSUMO DE CIMENTO	179
5.1.1 Resistência à compressão.....	179
5.1.2 Índices físicos: absorção total, massa específica e índice de vazios	180
5.1.3 Análise visual - microscópio óptico.....	182
5.1.4 Análise química e microestrutural	195
5.2 AUTOCICATRIZAÇÃO PELA UTILIZAÇÃO DE POZOLANAS.....	198
5.2.1 Resistência à compressão.....	198
5.2.2 Índices físicos: absorção total, massa específica e índice de vazios	201
5.2.3 Análise visual - Microscópio óptico	202
5.2.4 Análise química e microestrutural	217
5.3 AUTOCICATRIZAÇÃO PELO USO DE SOLUÇÕES QUÍMICAS	222
5.3.1 Resistência à compressão.....	222
5.3.2 Índices físicos: absorção total, massa específica e índice de vazios	224
5.3.3 Análise visual - Microscopia óptica	226
5.3.4 Análise química e microestrutural	248
5.4 AUTOCICATRIZAÇÃO PELO USO DE SOLUÇÕES BACTERIANAS.....	252
5.4.1 Resistência à compressão.....	253
5.4.2 Índices físicos: absorção total, massa específica e índice de vazios	255
5.4.3 Análise visual- Microscópio óptico	256
5.4.4 Análise química e microestrutural	277
5.5 ANÁLISES COMPARATIVAS.....	281
5.5.1 Resistência mecânica à compressão.....	281
5.5.2 Índices físicos.....	283
5.5.3 Síntese das ocorrências de cicatrização	284
5.5.4 Análise das ocorrências em relação aos ambientes acelerados de exposição.....	292
5.5.5 Análise das ocorrências em relação aos procedimentos empregados de cura	294
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	297

6.1 CONCLUSÕES.....	297
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	300
REFERÊNCIAS	303
APÊNDICE A – PROCEDIMENTOS REFERENTES ÀS SOLUÇÕES BACTERIANAS	325
APÊNDICE B – TABELAS VERIFICADAS NOS TRAÇOS REFERENTES AO CONSUMO DE CIMENTO.....	329
APÊNDICE C – TABELAS VERIFICADAS NOS TRAÇOS REFERENTES AO USO DE POZOLANAS	333
APÊNDICE D – TABELAS VERIFICADAS NOS TRAÇOS REFERENTES AO USO DE SQ.....	337
APÊNDICE E – TABELAS VERIFICADAS NOS TRAÇOS REFERENTES AO USO DE SB	343

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto armado são empregadas em edificações com finalidades diversas. As propriedades do concreto aliadas às do aço proporcionam às estruturas a capacidade de resistir aos principais esforços transmitidos pelas cargas: tração, cisalhamento e compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2015). Sangadji (2017) afirmou que a produção mundial de concreto é de 12 bilhões de metros cúbicos anualmente.

Considerando esse volume de uso, espera-se que as estruturas de concreto armado sejam duráveis, por questões econômica e de geração de resíduos. Diversos são os mecanismos que provocam danos nas estruturas de concreto, sendo necessária a atenção ao seu ambiente de inserção e particularidades (GJORV, 2014; NEVERKOVICA; KORJAKINS, 2014), assim como às causas intrínsecas e extrínsecas de sua degradação (SOUZA; RIPPER, 2001; TANG et al., 2015).

A durabilidade é a preservação de um elemento ao longo do tempo, com a realização de manutenções preventivas e corretivas, sem que sejam necessárias grandes intervenções (EN 1990:2002). Entende-se que a durabilidade se relaciona diretamente com a viabilidade financeira das edificações (CELADYN, 2016). Importante ponderar ainda o impacto que há sobre a sustentabilidade de uma obra civil, tanto pela utilização de recursos, quanto pela geração de resíduos de construção e demolição (RCD)¹, quando se alcança o final da vida útil de um imóvel (CELADYN, 2014).

Reforçando a relevância da sustentabilidade, Chemrouk (2015) afirma que, de modo mais intenso nos países de terceiro mundo, tem-se a deterioração precoce das estruturas de concreto, o que amplia a necessidade de matéria-prima para novas edificações e intensifica o dano ambiental oriundo da extração e geração de resíduos. Li e Herbert (2012), pontuam que, em países desenvolvidos, como Estados Unidos, Coréia do Sul e Alemanha, chegou-se a perceber maiores gastos envolvendo recuperação e reabilitação das estruturas, superando os investimentos com novas construções, indicando uma transição, em que as tarefas majoritárias passam a ser a manutenção, o monitoramento e o prolongamento da vida útil de edificações

¹ Essa expressão, assim como as demais semelhantes a ela doravante mencionadas, serão, daqui para diante, transformadas em siglas, por não haver a necessidade de repetição dos termos.

existentes. Assim, se percebe uma busca pela durabilidade, contribuindo com a maior longevidade das edificações (SANGADJI, 2017).

Segundo Krishnapriya, Venkatesh e Prince (2015), há de se considerar que são despendidos gastos relevantes com a recuperação de fissuras no concreto. O surgimento de fissuras configura-se como um dos principais sintomas que afeta a durabilidade e o estado de conservação dos elementos. Sua ocorrência pode ser relacionada a fatores diversos, como retrações físicas e químicas, fenômenos de gelo e degelo, forças mecânicas de compressão-tração, corrosão das armaduras no interior do concreto, entre outros. (HAVLÁSEK et al., 2017; JONKERS; SCHLANGEN, 2008; KHALIQ; EHSAN, 2016). Conforme Krishnapriya, Venkatesh e Prince (2015), existem diversas técnicas desenvolvidas até o momento para o reparo de fissuras. No entanto, algumas destas envolvem a utilização de soluções químicas agressivas e de elevado custo, tornando-se inviáveis em larga escala.

Em termos gerais, pode-se atribuir o surgimento das fissuras às diferenças de temperatura, variações na dosagem do concreto, comportamento químico da hidratação do cimento, movimentações térmicas, entre outros. Helene (2013) afirma que a agressividade do meio se relaciona às ações físicas e químicas, tais como, presença de umidade, concentração de gases deletérios, presença de ácidos, variações térmicas, entre outros, etc. Bonić et al.,(2015) corroboram, afirmando que as consequências se dão em termos físicos, biológicos e químicos. O surgimento de fissuras pode ocorrer no concreto ainda em estado fresco, se propagando facilmente, diminuindo a resistência do material, e, conseqüentemente, impactando o uso e ocupação da estrutura. (ZAI; MURTHY, 2015).

Cabe destacar que as fissuras se configuram como um fator de degradação pelo enfraquecimento do elemento, e também, pelo ingresso facilitado de agentes externos de deterioração das estruturas, permitindo a ação do dióxido de carbono (CO_2) e dos íons cloreto (Cl^-), além de outros, conduzindo a um estado de dano intenso causado pela corrosão, quando do uso de armaduras. Jonkers (2011) afirma que a maioria dos problemas patológicos são oriundos da formação de fissuras. Para validar a relação entre a formação de fissuras e a durabilidade do concreto, Varlamov, Shapovalov e Gavrilov (2017) realizaram um estudo de estimativa da durabilidade do concreto através de sua fissuração, percebendo esse como um parâmetro de relação direta com a durabilidade das estruturas com base em suas características de composição.

Portanto, para minimizar os danos das estruturas, o impacto financeiro e ambiental, tem-se estudado a ação de agentes que possam atuar autocicatrizando e autorregenerando materiais cimentícios. (LALA, HUSSAIN E AKHTAR, 2014; DI LUZIO; FERRARA; KRELANI, 2018). Espera-se que danos patológicos possam ser mitigados ou pausados. Patel (2015) percebe, nesse cenário, um potencial da redução do dano ambiental relacionado ao uso do concreto nas construções.

Existem diversos mecanismos de autorregeneração dos concretos. Algumas linhas de pesquisa defendem a ideia de que as próprias partículas de cimento anidro podem se hidratar quando surgem fissuras e haja incidência de água, selando tais regiões. (AFIFUDIN et al., 2011; HEARN, 1998; HUANG et al., 2016). Porém, essa reação é única, pois uma vez que as partículas anidras reagem, inviabiliza-se a nova ocorrência do fenômeno. Além disso, pode ser necessário o acréscimo do consumo de cimento, encarecendo o custo do concreto e com impacto ao meio ambiente (CHEN et al., 2010; JONKERS; SCHLANGEN, 2008; SALAS et al., 2016).

Outros pesquisadores analisam que as pozolanas inseridas no concreto, em substituição ao cimento, possam exercer tal função, através das reações secundárias de hidratação (AFIFUDIN et al., 2011; ALYOUSIF, 2016; GRUYAERT et al., 2014). Afifudin et al., (2011) destacam, no entanto, que nem sempre há disponibilidade de uso destes materiais, sendo necessário verificar seu impacto de inserção e sua eficácia diante de múltiplos eventos de fissuração.

Mais recente que os outros métodos, o mecanismo biológico de autorregeneração vem sendo estudado. Este é acionado quando bactérias inseridas no concreto convertem algum tipo de nutriente em calcita, colmatando as fissuras. (ADAK, 2015). Krishnapriya; Venkatesh e Prince (2015) destacam que o método de remediação por bactérias se apresenta superior a outros métodos, por ser menos nocivo ao meio ambiente e vasto potencial durável. Para a aplicação de tal método, é necessário contar com um estudo de compatibilidade da solução bacteriana com a matriz do concreto, assim como prover o nutriente necessário para sua permanência no interior das estruturas, podendo ser necessário seu encapsulamento no interior de agregados leves, esporos ou materiais de comportamento equivalente (JONKERS, 2011; TANG; KARDANI; CUI, 2015; ZHANG et al., 2017).

Tem-se ainda, como possibilidade de autorregeneração, a tecnologia de autocicatrização por encapsulamento de soluções químicas. Alghamri, Kanellopoulos e Al- tabbaa (2016) apresentam a solução de encapsulamento de silicato de sódio em

agregados leves para serem inseridos em misturas de concreto. Gupta, Pang e Kua (2017) informam que, para o encapsulamento, considera-se que a tensão provocada pela fissuração deve ser capaz de romper as cápsulas para liberação do agente regenerante. Destaca-se que os estudos conduzidos pelos autores evidenciaram que já há eficácia na recuperação das estruturas aos 28 dias. Para emprego dessa estratégia podem ser utilizados agregados leves, assim como polímeros superabsorventes (PSA) para inserção dos agentes de autorregeneração no concreto (VAN TITTELBOOM et al., 2016; WHITE et al., 2001), ou ainda, o uso de agregados de RCD, pela sua característica de maior porosidade (BHUTTA et al., 2013; YAP et al., 2018). Redes vasculares também são empregadas (LI; LIM; CHAN, 1998).

Mecanismos envolvendo o uso de aditivos catalisadores cristalinos têm sido estudados, dada a aplicabilidade do método em larga escala (TAKAGI, 2013), por não demandar alterações impactantes no volume do concreto, em termos de procedimentos ou investimento financeiro.

Por fim, tem-se a utilização de materiais com memória de forma (JEFFERSON et al., 2010), que não permitem que a estrutura apresente deformação residual e, portanto, recupera-se após a abertura de fissuras. Na ausência de aquecimento ou resfriamento, os materiais com memória de forma mantêm-se estáveis. Após deformações de até 8% e a ação do calor, o material retorna ao seu estágio não deformado (MALI; MALI, 2017).

Mesmo com diversas tecnologias disponíveis para promoção da autocicatrização, são delineadas lacunas a serem satisfeitas para garantia de confiabilidade de tais métodos. Roig- Flores et al., (2015) expõem a necessidade de se avançar no conhecimento teórico para o uso real das estruturas de concreto, sendo necessário observar o período que pode ocorrer a formação das fissuras, o ambiente de inserção e condição para que ocorra sua autocicatrização.

Esta abordagem já foi apresentada por Van Tittelboom et al., (2016), que compararam a utilização de dois mecanismos de autocicatrização em larga escala laboratorial. Os autores avaliaram o encapsulamento de agente químico, não identificado, em PSA e em redes vasculares, obtendo como resultado que ambas as técnicas podem ser utilizadas em larga escala, todavia, há necessidade de maior preparo prévio na proposta de redes vasculares, e a presença da água é requisito fundamental para regeneração do concreto.

Ainda, Adak (2015) aponta a necessidade de verificar o alcance da vida útil das estruturas de concreto armado e a possibilidade de ocorrência de múltiplos eventos de cicatrização. Até o momento, a selagem total de fissuras é atingida para espessuras reduzidas, de 0,4mm por exemplo (JIANG et al., 2020) então, identifica-se a análise de viabilidade de selagem de fissuras de maiores dimensões. Li e Herbert (2012b) sintetizaram as técnicas disponíveis até o momento para autocicatrização, indicando o estágio atual de desenvolvimento e as lacunas existentes em tais métodos. Um dos pontos trazidos pelos autores é a ausência de estudos que comprovem a confiabilidade dos diferentes mecanismos.

De modo complementar, Li e Herbert (2012b) citam que estudos já indicaram que a eficácia da autorregeneração pode ser reduzida em exposição real das estruturas de concreto armado. Em relação a esse contexto, e em contrapartida ao apresentado pelos autores citados, In et al., (2013) identificam, no ambiente marinho, potencial agressão às estruturas de concreto, prejudicando as características necessárias para a autorregeneração da estrutura. Em termos da presença de CO₂, destaca-se que a própria formação de carbonato de cálcio (CaCO₃) possa atuar como um agente de reparo das fissuras, podendo ou não atuar conjuntamente com outros mecanismos de autorregeneração (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016; VAN TITTELBOOM et al., 2012).

No cenário nacional, não há a consolidação de uma abreviação alusiva ao concreto autorregenerante, dada a divergência que pode haver com siglas utilizadas como CA (concreto armado), CAA (concreto autoadensável ou classe de agressividade ambiental) e CAR (concreto de alta resistência). Assim sendo, nesse estudo utilizou-se a abreviatura internacional, SHC² (*self-healing concrete*).

Devido à escassez de estudos que analisem diversas variáveis na autorregeneração do concreto, somadas à consideração da agressividade do local de inserção, é delineada a lacuna abordada nesse estudo para verificação da resposta destes mecanismos em estruturas inseridas em ambientes de classes de agressividade diferentes, simulados através de ensaios acelerados, variando-se o tipo de cura e o mecanismo de indução da fissura.

² Essa será a terminologia adotada nesse estudo como referência aos concretos autocicatrizantes.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A abrangência das classes de agressividade ambiental envolve, além das características ambientais, como umidade e temperatura, as causas de deterioração do concreto, como a ação do gelo e degelo, a ciclagem térmica e a aplicação de cargas de longa duração. No entanto, no cenário nacional, percebe-se que as classes de agressividade ambiental consideram, apenas, a ação do Cl^- e do CO_2 , através das quatro classes de agressividade, em escala evolutiva, do menor para maior potencial de danos. (NBR 6118, ABNT, 2014), de modo análogo às normas indiana (IS 456, 2000) e australiana (AS 3600, 2018). A PCA - *Portland cement association* - (2002) cita estes agentes como predominantes em termos de agressão às estruturas de concreto armado, dada sua relação com a corrosão das armaduras.

Mihashi e Nishiwaki (2012), ao analisarem o estado da arte dos concretos autorregenerantes, identificaram sua capacidade de autorregeneração quando expostos em ambientes externos, sendo necessária a simulação de condições reais de exposição. Herbert e Li (2012), após submeterem amostras contendo cinza volante por três meses em ambiente externo, provaram que há capacidade de autorregeneração. Há estudos que avaliaram, por exemplo, a presença ou não de umidade e seu impacto no potencial dos SHC (VAN TITTELBOOM et al., 2016).

Tem-se como lacuna a avaliação do potencial das técnicas de autorregeneração em ambientes contendo Cl^- e CO_2 , incluindo a análise de confiabilidade das técnicas. Percebe-se, assim, a necessidade de estudos que considerem a agressão ao longo do tempo, em estruturas de concreto armado, e se mesmo diante da ação dos mecanismos de dano haverá capacidade de autorregeneração. Este estudo delimita-se à verificação da eficácia dos mecanismos de autocicatrização, considerando ambientes acelerados de agressão provocados pela presença de Cl^- e CO_2 e com variações no procedimento de cura e formação da fissura.

A pesquisa apresenta caráter holístico ao avaliar a eficácia dos mecanismos de autocicatrização dos concretos, e reducionista ao avaliar em termos de microestrutura cada um dos mecanismos capazes de reproduzir tal fenômeno. Pertence, ademais, ao grupo de Gestão e Sustentabilidade na Construção - GSC - do PPGEC (Programa de pós graduação em Engenharia Civil), na linha de pesquisa de otimização de processos para a minimização de resíduos.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho dividem-se em geral e específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a eficácia das técnicas de autocicatrização de elementos de concreto, considerando diferentes condições de cura e exposição.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) quantificar as espessuras de fissuras cicatrizadas (potencial e média, contínua e pontual) através dos métodos de autocicatrização do concreto, sendo o consumo de cimento, uso de pozolanas, encapsulamento de soluções químicas e soluções bacterianas, considerando situações controladas;
- b) analisar a efetividade dos mecanismos de geração de fissuras, através do corte das amostras e pelo ensaio mecânico de tração na flexão;
- c) determinar se as condições de cura avaliadas (submersa e em câmara úmida) oferecem ambiente propício para ocorrência da autocicatrização;
- d) verificar a eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto após a aceleração da agressão das estruturas em câmaras de carbonatação e névoa salina;
- e) identificar por semelhança em bibliografia com o ensaio de microscopia eletrônica de varredura, pelos ensaios químicos de difração de raios-X e de energia dispersiva de raios-X quais produtos são formados na cicatrização das fissuras.

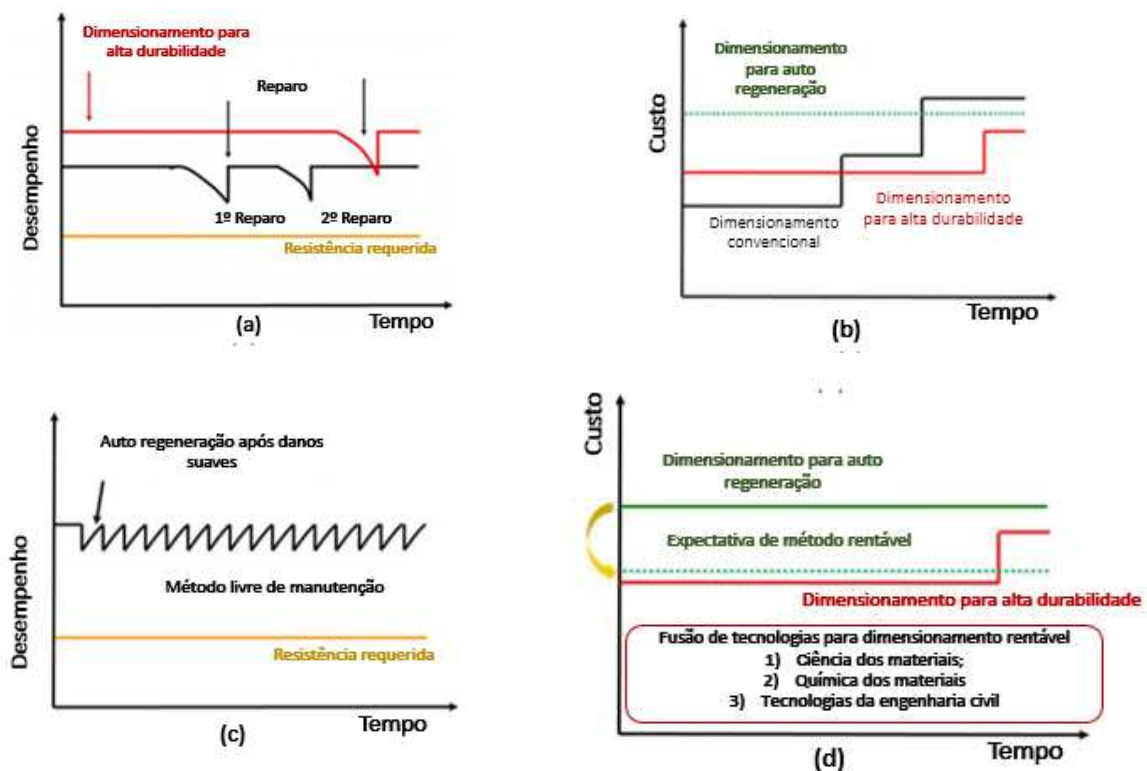
1.4 JUSTIFICATIVA

Patel (2015) afirma que o desenvolvimento da construção ocorrido no início desta década gerou impacto compatível com o ocorrido ao longo de todo o século XX. Conforme o autor, percebe-se o vasto impacto ambiental causado por uma edificação, principalmente devido ao uso de cimento e a extração de recursos naturais, sendo

necessário investir no prolongamento da vida útil de edificações existentes ou novas, mitigando as intervenções e substituição de construções.

Alshalif et al. (2016) informam que o desafio atual é vincular a inovação a materiais naturais, reduzindo o impacto no desenvolvimento de novos produtos, proporcionando benefícios no que tange à durabilidade do material. Neste cenário, quaisquer materiais que tenham a capacidade de prolongar a vida útil das estruturas, através da regeneração após a ocorrência de danos, merecem atenção especial no desenvolvimento de pesquisas (SANGADJI, 2017) . Van Breugel (2007) apresenta, em termos econômicos, o impacto do uso dos SHC, através da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 1 – Comparativo da necessidade de intervenção e custo estimado de reparo das estruturas com e sem a utilização de SHC



Fonte: Van Breugel (2007, p.6); texto traduzido para português

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, em a, percebe-se o desempenho de um concreto convencional, com reparos realizados ao longo do tempo, e o uso de um concreto de alto desempenho (CAD), exigindo menores reparos. Em b, apresentam-se os custos que ocorrem ao longo do tempo ao empregar-se concretos convencionais, CAD e SHC. Percebe-se que o maior custo, alusivo ao uso

dos SHC, pelos insumos necessários e procedimentos específicos, tende a ser compensado, pela ausência de tarefas de manutenção. A imagem c retrata a utilização de SHC, comedindo a necessidade de intervenções na estrutura. Por fim, em d, apresenta-se o dimensionamento de estruturas de SHC como de elevado custo benefício, pela não necessidade de intervenções na estrutura ao longo do tempo. Assim, o custo crescente com o reparo das estruturas ao longo do tempo não se aplica ao SHC. Sangadji, (2017) destaca não apenas o valor econômico das estruturas, citando o consumo de energia e a emissão de carbono para produção do concreto, com valores de 0,95 MJ/kg e 0,35 kg carbono/kg, respectivamente, considerando sua produção, transporte e emprego.

Li e Herbert (2012a) identificam como lacuna a avaliação da eficácia dos SHC, percebendo a escassez de ensaios que possam transpor a barreira laboratorial e simular condições reais de exposição dos concretos. Os diversos mecanismos possuem distintas características, o que pode fazer com que a reação, frente à agressividade ambiental, não seja viável.

Cabe citar que as pesquisas envolvendo o concreto autorregenerante apresentam crescimento nos últimos anos, conforme Van Tittelboom e De Belie (2013). No Brasil, grupos de pesquisa estão se formando, contando com universidades como ITA, UFRGS, UEL, UNILA³, UNISINOS, entre outras. Conhecendo o cenário exposto, de relevância no prolongamento da vida útil das estruturas, mitigação das tarefas de manutenção e conseqüente do custo das estruturas, justifica-se o desenvolvimento desta pesquisa, que avalia a eficácia dos SHC diante da simulação de ambientes de agressividade ambiental reais.

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta tese encontra-se estruturada ao longo de seis capítulos. O primeiro deles apresenta a introdução ao estudo, com conceitos básicos, objetivos e justificativa. No segundo capítulo, apresenta-se o referencial teórico necessário para o desenvolvimento e entendimento da presente pesquisa. No capítulo 3, intitulado de Estudos Piloto, são apresentados estudos iniciais utilizados para definições gerais sobre o método a ser seguido. O programa experimental desenvolvido é apresentado

³ ITA- Instituto Tecnológico de Aeronáutica, UFRGS- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UEL- Universidade Estadual de Londrina, UNILA- Universidade Federal de Integração Latino-Americana.

no capítulo 4, com as normas técnicas, materiais, ensaios, amostras e equipamentos empregados. No capítulo 5 são expostos e avaliados os resultados da pesquisa, e por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas ao longo do estudo.

2 CONCRETO ARMADO

O concreto armado configura-se como a matéria prima mais utilizada na construção civil, dadas suas inúmeras vantagens. No entanto, por muitas vezes, esse material apresenta deterioração precoce, sendo conhecidos os principais mecanismos de dano que podem comprometer seu comportamento em uso, como a reação álcali agregado, a corrosão das armaduras e os ciclos de gelo e degelo (AL-GALAWI; AL-TAMEEMI; AL-JARRAH, 2016; TANG et al., 2015).

Busba (2013) e Chemrouk (2015) corroboram com o apresentado, ao afirmar que há predominância na corrosão das armaduras dentre os danos patológicos verificados nas edificações. Bonić et al., (2015), ao avaliarem os principais mecanismos de agressão das estruturas, verificaram que, além de ser causada pela corrosão, a fissuração pode decorrer de movimentações térmicas e expansão térmica diferencial entre agregados e argamassa. Os autores reforçam que sobrecargas podem culminar na formação de fissuras, facilitando a entrada de agentes de deterioração.

É consenso no meio técnico que não apenas as fissuras configuram-se como uma manifestação patológica, mas ainda, que tais sintomas, se não tratados, proporcionam o ingresso facilitado de agentes de dano no interior das estruturas de concreto, até o alcance das armaduras (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016; WILLIAMS; KIRISITS; FERRON, 2017; ZHANG; WANG; DING, 2018). Por isso, é importante descrever as causas da formação de fissuras, seus limites estabelecidos em norma e análise do potencial de dano nas estruturas.

2.1 FISSURAS EM CONCRETO ARMADO

Estruturas de concreto armado são suscetíveis à ocorrência de fissuração, devido às condições climáticas, aplicação de cargas, corrosão das armaduras, movimentações térmicas diferenciais, entre outros. (HELENE, 2013). Ferrara et al., (2018) pontuam que o surgimento de fissuras se apresenta, atualmente, como uma das principais barreiras ao desenvolvimento de concretos sustentáveis, uma vez que outras dificuldades, como a porosidade da matriz e sua compacidade, já foram contornadas ao longo do tempo.

As fissuras podem ser divididas entre as que se originam no estado fresco e aquelas que surgem no concreto após seu endurecimento. Entre as que se originam antes do endurecimento tem-se as fissuras plásticas, por assentamento e endurecimento inicial, e as oriundas de movimentações. Têm-se as originadas por fenômenos físicos (assentamento e cura), químicos (corrosão e reação álcali agregado), térmicos (variações térmicas, ciclos de gelo e degelo) e estruturais (sobrecargas e deformações) (MEHTA; MONTEIRO, 2014; GJORV, 2014). Afirma-se, assim, que as causas para formação de fissuras abrangem a execução das estruturas, características do meio e situações do projeto estrutural. Ainda, cabe ser destacado que, habitualmente, pode haver a formação de fissuras induzidas por mais de um fenômeno, ou seja, diferentes mecanismos simultaneamente (GUPTA; PANG; KUA, 2017; VINKLER; VÍTEK, 2017).

2.1.1 Limites para abertura de fissuras

Em termos de controle de fissuração, apresentam-se, na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), os limites para fissuração do concreto simples, armado e protendido. Expõe-se, na Tabela 1, os valores limites de fissuração, considerando as diferentes classes de agressividade ambiental propostas na norma.

Tabela 1 – Diretrizes de norma para controle de fissuração visando a durabilidade das estruturas de concreto

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

a) A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com ap= 50 mm

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p.80)

Conforme verifica-se, os limites de aceitação de fissuras são reduzidos, permitindo valores de, no máximo, 0,4 mm, sendo que o limite estabelecido é menor quando há maior concentração de agentes de deterioração, ou seja, quando se aumenta a classe de agressividade na qual a estrutura será inserida.

As normas indianas IS 456:2000 e IS 1343:1980, alusivas à durabilidade e ao dimensionamento das estruturas de concreto, respectivamente, apresentam o valor aproximado de abertura de fissuras para estruturas pré e pós tensionadas. Para as estruturas pré tensionadas tem-se o valor de 0,0003 m (0,3 mm). Para os elementos pós tensionados, aplica-se a Equação 1.

$$0,0002 / (\log 10 (t + 2)) \quad \text{Equação 1}$$

Onde: t = tempo do concreto em dias

Considerando uma vida útil de 50 anos, tem-se 0,0000469 m (0,047 mm), para estruturas pós tensionadas. Contando com atmosfera seca, o valor máximo é ampliado, passando a ser de 0,0003 m (0,3 mm), pois atmosferas secas não são propícias a ocorrência de diversas manifestações patológicas.

Os documentos normativos indianos vão adiante ao explorar o período em que as fissuras costumam aparecer nas estruturas, informando que: *“pode-se assumir que a metade das fissuras são alcançadas no primeiro mês, e três quartos das fissuras ocorrem nos primeiros seis meses após endurecimento do concreto”*

O ACI 533- R11, guia de dimensionamento de paredes pré-fabricadas de concreto, admite uma abertura máxima de 0,012 polegadas, ou 0,3 mm, visando a proteção das armaduras e consequente durabilidade dos elementos.

O boletim 34 da FIB - *Fédération internationale du beton* (2006) Federação internacional do concreto, texto traduzido para português, afirma que o primeiro ponto a ser observado é o local de ocorrência da fissura e seu potencial de dano. Caso a fissura esteja localizada em ponto crucial para a transferência de cargas, deve-se considerar seu limite máximo de abertura diante do ELU. Caso ocorra ao longo do elemento estrutural, poderá ser verificada pelo ELS. Ainda, tem-se a complementação pelo *Fib Model code 2010*, apresentando equações para estimativa de fissuração em estruturas de concreto, considerando o efeito da perda de umidade, a fluência e o tempo.

A fissuração total (ϵ_{cs}) é calculada considerando duas frações, sendo uma delas a fissuração básica (ϵ_{cbs}) e a outra a fissuração causada pela perda de umidade ($\epsilon_{c ds}$),

Equação 2. Destaca-se que a fissuração básica é referente à retração esperada pela hidratação dos compósitos cimentícios.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \quad \text{Equação 2}$$

Consideram-se ainda os seguintes intervalos de tempo:

t: idade do concreto, em dias

t_s: idade do concreto no início da secagem, em dias

t-t_s: duração da secagem, em dias

As componentes apresentadas, respectivamente, são dadas pelas Equações 3 e 4:

$$\varepsilon_{cbs}(t) = \varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) \cdot \beta_{bs}(t) \quad \text{Equação 3}$$

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{bs}(t - t_s) \quad \text{Equação 4}$$

O coeficiente de fissuração é dado pela Equação 5:

$$\varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) = -\alpha_{bs} \left(\frac{(0,1 \cdot f_{cm})}{6 + 0,1 \cdot f_{cm}} \right)^{2,5} \times 10^{-6} \quad \text{Equação 5}$$

Inclui-se, ainda, que os testes para verificação do comportamento do material devem ser feitos de acordo com as normas RILEM TC 107-CSP (1998) e ISO 1920-8 (2009). Por fim, o *Fib Model code 2010* apresenta a Tabela 2 para estimativa de fissuração ao longo de 50 anos, considerando duas situações de umidade relativa do ar.

Tabela 2 – Valores de fissuração total ε_{cs} de um concreto estrutural após 50 anos, considerando concretos de alta resistência (mm)

Condição de exposição	Atmosfera seca (RH = 50%, estruturas internas)			Atmosfera úmida (RH = 80%, estruturas externas)		
	50	150	600	50	150	600
Relação entre a área do elemento estrutural e o seu perímetro (2.A _c /u)						
	Valores de fissuração máxima para cada tipo de concreto					
Concretos normais	-0,61	-0,60	-0,49	-0,38	-0,38	-0,31
Concreto alta resistência	-0,51	-0,51	-0,44	-0,37	-0,36	-0,32

Fonte: Fib Model code (2010, p. 93), texto traduzido para português

De acordo com o apresentado na Tabela 2, os valores previstos em norma para estruturas após 50 anos são reduzidos, de modo que se garanta a durabilidade dos elementos estruturais por pelo menos esse período, indo ao encontro do que preconiza a NBR 15575-1 (ABNT, 2013). Ainda, percebe-se um limite menor

estabelecido para estruturas com maior presença de umidade, uma vez que a presença da água é um pré-requisito para ocorrência da maioria dos danos patológicos.

O ACI 224- R 01 (2001) – *Control of crack of concrete structures* - ou controle de fissuração em estruturas de concreto, texto traduzido para português, estabelece valores máximos de aberturas de fissuras de acordo com o local de inserção das estruturas, dada a intensidade do ataque permitida pela abertura de vazios, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Abertura de fissura limite pela ACI 224 conforme a condição de exposição

Condição de exposição	Abertura da fissura	
	pol.	mm
Ar seco ou com membrana de proteção	0,016	0,41
Umidade, ar úmido e solo	0,012	0,3
Químico de degelo	0,007	0,18
Água marinha, névoa salina, ciclos de molhagem e secagem	0,006	0,15
Barragens e contenção da água	0,004	0,1

Deve-se esperar que parte das fissuras em uma estrutura irá superar os valores apresentados. Ao longo do tempo, uma parte relevante poderá exceder tais valores. Essas são recomendações gerais para serem empregados conjuntamente como uma avaliação técnica. Excluídos da categoria barragens tubulações sem aplicação de pressão.

Fonte: ACI 224- R 01 (2001, p.21), texto traduzido para português

Percebe-se que há semelhança com os valores apresentados pelas principais normas mundiais, sendo comum a fissura máxima próxima de 0,4 mm. Há menor tolerância com estruturas expostas à água e presença de umidade. O ACI 318 - *Building code requirements for structural concrete* (2014), guia de dimensionamento de estruturas de concreto armado, texto traduzido para português, informa que, dependendo da vinculação do elemento estrutural, podem ser necessárias armaduras complementares para que haja resistência à variação térmica e às tensões de fissuração.

Finalizando, Luo et al., (2015) pontuam que a desatenção com a formação de pequenas fissuras configura uma negligência com a vida útil do concreto como um todo, uma vez que as pequenas fissuras acarretam na concentração de tensões, dando origem a fissuras de maior dimensão (abertura) e potencial de dano. A evolução das microfissuras pode conduzir a problemas como o deslocamento da camada de cobrimento e perda prematura de vida útil de serviço dos elementos em concreto, sendo, em casos mais severos, possível de ocorrer o colapso estrutural (GUPTA; PANG; KUA, 2017; HILLOULIN et al., 2016).

2.2 CONCRETO AUTORREGENERANTE E AUTOCICATRIZANTE

Ao concreto que tem a capacidade de selar suas fissuras, dá-se o nome de autocicatrizante. A RILEM 221-SHC (2011, p.9) conceitua autocicatrização como “qualquer processo realizado pelo próprio material que envolva a recuperação e a melhoria na performance de um material que tenha sido danificado por algum processo anteriormente”. Segundo Ferrara et al., (2018), todos componentes cimentícios tem a capacidade de selagem de fissuras. Van Breugel (2007), em relação à evolução dessa descoberta, afirma que o potencial de regeneração autônoma do concreto é de conhecimento longínquo no meio técnico, e, desde a década de 1930, existe uma diferenciação entre as funções exercidas na autorrecuperação dos concretos, que são:

- concreto autorregenerante, ou *self-healing*: trata-se do material que tem capacidade de recuperação das fissuras, contando com a recuperação das propriedades mecânicas iniciais;
- concreto autocicatrizante, ou *self-repairing*, quando há apenas a selagem ou cicatrização das fissuras, sem que sejam recuperadas as propriedades mecânicas do material.

Conforme Mihashi e Nishiwaki (2012), ambos os fenômenos, de cicatrização e regeneração, podem ser intrínsecos ao concreto, assim como, determinados em projeto, com utilização de componentes específicos.

Mesmo diante do vasto conhecimento sobre o assunto, há um caminho a ser trilhado com o emprego destes materiais, proporcionando maior sustentabilidade às estruturas de concreto armado, satisfazendo a demanda atual de estruturas eficientes e duráveis (FERRARA et al., 2018; ROIG-FLORES et al., 2015). Li e Herbert (2012) afirmam que o avanço e o interesse por pesquisas com essa temática decorrem da percepção dos gastos elevados despendidos com reparos e reabilitação das estruturas de concreto armado, sendo o SHC uma esperança na mitigação ou, em casos mais eficazes, da extinção de tarefas de manutenção da estrutura (HE; SHI, 2017). Huseien, Sha e Sam (2019) acreditam que, ao reduzir tais tarefas e a deterioração inerente aos materiais de construção, estará sendo favorecido o aspecto sustentável das edificações.

De acordo com Hager et al. (2010), relacionando-se concretos e cerâmicas, tem-se fenômenos de autorregeneração classificados como possíveis e raros. Dentre

os possíveis estão: encapsulamento dos materiais, uso de canais de condução com o uso de materiais fibrosos, uso de materiais expansivos, acréscimo de temperatura, processos biológicos e eletroquímicos. O fenômeno raro é a separação em fases, utilizada, por exemplo, em metais.

Seifan, Samani e Berenjian (2016) destacam três pontos que necessitam de melhoramentos nos estudos de concretos autorregenerantes, sendo:

- a) realização de simulação numérica para verificação da redução de custo e estimativa da vida do concreto com a utilização de técnicas de autorregeneração;
- b) verificação da vida inativa da bactéria em estruturas expostas ao tempo e agressões corriqueiras em estruturas de concreto armado;
- c) aderência efetiva entre a área recuperada e a estrutura de concreto existente.

Considera-se que materiais com propriedades autocicatrizantes têm sido expressivamente pesquisados, constituindo de uma ciência multidisciplinar analítica.

2.2.1 Tipos de autorregeneração e autocicatrização

Os tipos de autorregeneração e autocicatrização são apresentados nos próximos itens.

2.2.1.1 Classificação

Alghamri, Kanellopoulos e Al-Tabbaa (2016) dividem o processo de autorregeneração em dois grandes grupos:

- a) autogênico: este mecanismo consiste na utilização dos componentes que já são utilizados pelo concreto, como o cimento e as adições e/ou substituições pozolânicas;
- b) autônomo: neste método, materiais não convencionalmente utilizados no concreto são adicionados com o objetivo de proporcionar uma maior capacidade autocicatrizante, como o uso de agregados leves, agentes expansivos, aditivos químicos e soluções bacterianas e químicas.

Gupta, Pang e Kua (2017) também consideram que um dos mecanismos base de autorregeneração dos concretos seja o autogênico, destacando que existem dentre deste grupo duas possibilidades, conforme segue:

a) autocicatrização vascular: neste sistema, de modo análogo ao sistema vascular do corpo humano, pequenos tubos são interconectados, de modo que sejam capazes de conduzir a todos os pontos do elemento estrutural o elemento cicatrizante, inclusive aos locais com formação de fissura. O sistema da autocicatrização através de encapsulamento deve ser acionado externamente, não atuando por si só (VIJAY; MURMU; DEO, 2017). Além disso, o material regenerante empregado pode ser recarregado externamente e conduzido pelos canais (DAVIES et al., 2015).

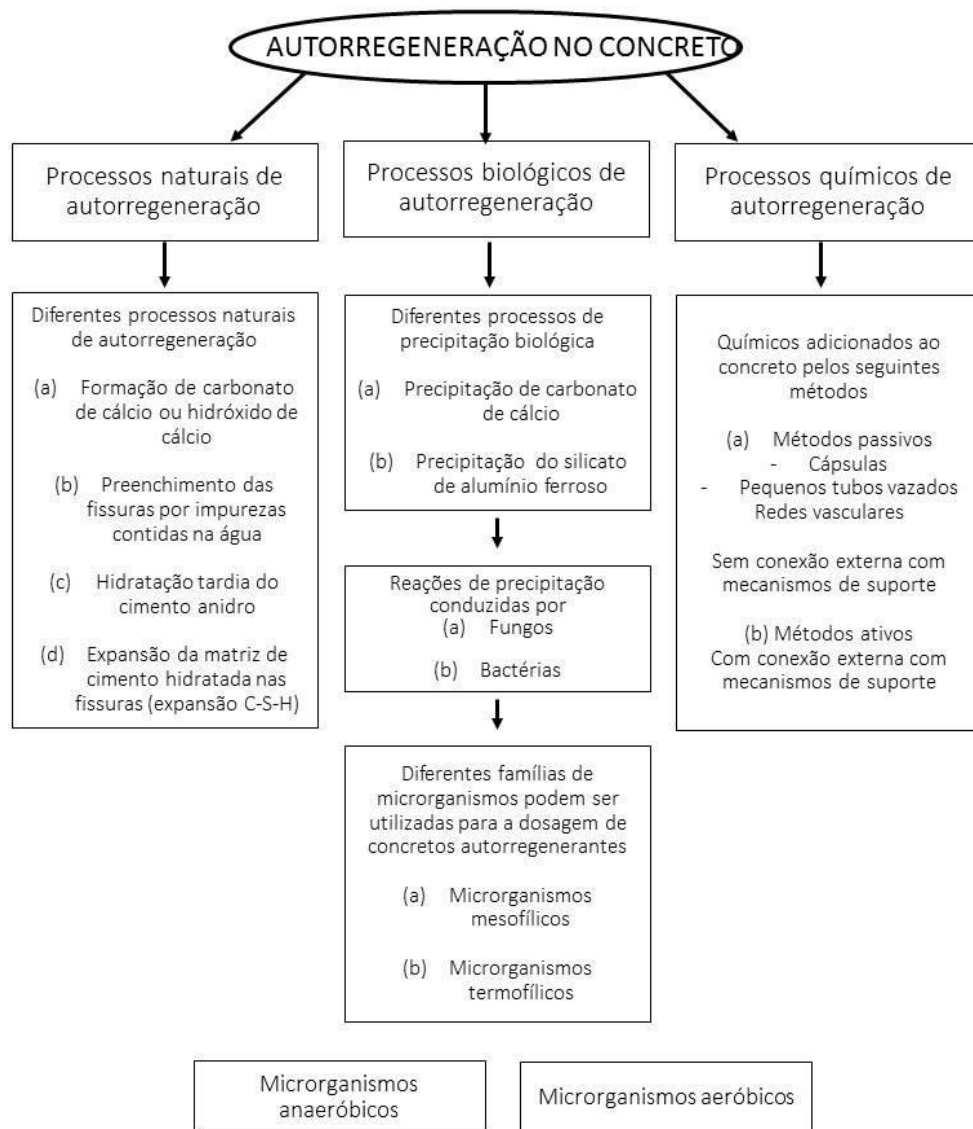
b) autocicatrização através de encapsulamento: trata-se de mecanismo em que os agentes de cicatrização são envoltos, por exemplo, em agregados leves ou materiais de porosidade compatível. Nestes casos, os agentes são acionados por alterações em seu exterior, como sua ruptura por ações mecânicas, alterações no pH, mudanças no teor de umidade, entre outros. Desta forma, libera-se o agente químico, que proporciona o fechamento de fissuras e a maior durabilidade do elemento estrutural (ALGHAMRI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; TAN et al., 2016).

Neville (2015) complementa que o mecanismo autogênico pode ocorrer pela formação de CaCO_3 ou Ca(OH)_2 , pela sedimentação das partículas, ou pela hidratação continuada das partículas de cimento da matriz. É através da formação desta película que se tem uma recuperação do elemento estrutural.

2.2.1.2 Mecanismos

Krelani (2015) propõe fluxograma apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** contendo os principais mecanismos estudados na atualidade e sua participação no desenvolvimento dos SHC. Independentemente do mecanismo de promoção da autorregeneração, o autor destaca parâmetros de influência direta no fenômeno: constituintes da mistura, presença de água, pressão da água e seu pH, condições ambientais, como a umidade relativa do ar e temperatura, abertura da fissura, atividade da fissura, englobando a estabilidade e abertura progressiva, e teor de agente regenerante, quando utilizado.

Figura 2 – Mecanismos de autorregeneração dos concretos (naturais, biológicos e químicos)



Fonte: Krelani (2015, p.19), texto traduzido para português

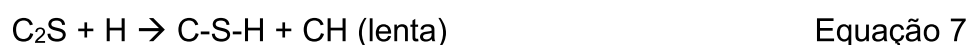
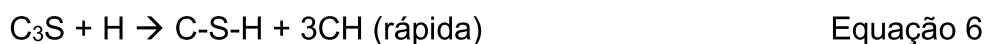
Nos itens a seguir são apresentados os mecanismos de autorregeneração do concreto, pesquisas já desenvolvidas e possíveis barreiras ao seu desenvolvimento.

2.2.1.2.1 Autogênico pelo consumo de cimento

Segundo Hager et al., (2010), através da falha do concreto, especificamente na abertura de fissura, tem-se a presença da água nos sulcos criados no material, induzindo a hidratação de compostos no interior do concreto que tenham

permanecidos anidros, e a criação de produto selante, que passa a ocupar os vazios proporcionados pela fissura.

Diante da hidratação do cimento Portland, há a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H, forma abreviada de $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), hidróxido de cálcio (CH, forma abreviada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) e os sulfoaluminatos de cálcio. Além desses materiais, restam ainda as partículas de clínquer não hidratadas, chamadas também de cimento anidro. A hidratação do cimento pode ser sintetizada pelas Equações 6 e 7, como citam Mehta e Monteiro (2014).



Conforme Equação 6, a reação do silicato tricálcico (C_3S , forma simplificada de $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) com a água conduz à formação de C-S-H e hidróxido de cálcio, ocorrendo de forma rápida e sendo responsável pela resistência inicial do concreto. A Equação 7 apresenta, de modo análogo, a reação do silicato dicálcico (C_2S , forma simplificada de $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), também conduzindo ao ganho de resistência, porém, lenta.

As fases em que ocorre a hidratação são apresentadas na sequência, divididas em 4 etapas (ASOCRETO, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014):

1. Nos primeiros minutos, há a dissolução inicial dos sulfatos e aluminatos alcalinos e a hidratação inicial. Possui alta velocidade de evolução do calor, caracterizando a reação exotérmica inicial. Há transformação da composição inicial da fase líquida de C_3S e formação da etringita;
2. período de 1 a 4h após o início da mistura, caracterizado pela diminuição do silicato e acréscimo na concentração de íons Ca. Inicia-se a formação de núcleos de CH e C-S-H. Há formação dos primeiros produtos de hidratação, reduzida velocidade de evolução do calor. Tem-se o endurecimento inicial. Nessa fase, percebe-se a formação de cristais no formato de lâminas, assim como a concentração de íons Ca^+ com um nível superior;
3. na sequência, no intervalo de 3 a 12 h, ocorrem as rápidas reações dos silicatos de cálcio para formação de C-S-H e CH, reduzindo a saturação de cálcio. Através da rápida formação dos hidratados tem-se uma diminuição da porosidade e alta velocidade da evolução do calor. Há ainda, uma alteração

da consistência de plástica para rígida, tendo um desenvolvimento de resistência ameno;

4. finalizando, tem-se a etapa de pós aceleração, com a formação de CH e C-S-H controlada por difusão, recristalização da etringita a monossulfato e polimerização de possíveis silicatos. São características dessa fase uma redução na evolução do calor e a redução da porosidade. A resistência passa a evoluir de maneira mais amena, com velocidade decrescente.

Em relação à recuperação de fissuras pelas partículas de cimento, diz-se que tal mecanismo de recuperação consiste no uso de uma habilidade natural do concreto de se autorregenerar. Em concordância com Van Tittelboom et al., (2016), quando a água penetra nas fissuras, ela entra em contato com as partículas não hidratadas de cimento, proporcionando uma segunda etapa de hidratação, ou hidratação tardia. Se essa penetração de água conta com a presença de CO_2 , tem-se ainda o fechamento das fissuras, causado pela precipitação do carbonato de cálcio pela carbonatação do CH.

Complementando, Van Tittelboom e De Belie (2013) afirmam que esses são os dois mecanismos que governam o comportamento da autorregeneração autônoma:

- (1) hidratação de partículas de cimento não-hidratadas;
- (2) dissolução e subsequente carbonatação do CH.

Segundo os autores, o mecanismo de hidratação de partículas anidras ocorre ao longo do tempo, e sobretudo, em idades iniciais. Com o passar do tempo, no entanto, com a escassez de partículas anidras, o mecanismo preponderante passa a ser a precipitação do CaCO_3 , sendo que ambos os estágios exigem a presença da água. Para este segundo fenômeno, tem de ter decorrido tempo para ingresso do CO_2 na matriz de concreto.

Estudos apontam que, através de ensaios químicos realizados no material produzido nas fissuras, até 80% de sua massa é caracterizada como lixiviação da portlandita (HUANG et al., 2016; HUANG; YE; DAMIDOT, 2013).

Para os autores, pode inclusive as atividades supracitadas ocorrerem simultaneamente, no entanto, com diferentes velocidades. Enquanto que a hidratação tardia de partículas anidras de cimento pode ocorrer imediatamente após a água penetrar nas fissuras, a recristalização da Portlandita (CH) e formação do CaCO_3 tem velocidade reduzida.

De acordo com Bary e Sellier (2004), há maior presença de CO₂ em volta da fissura em relação a seu interior. Dessa forma, tem-se que a calcita é primeiro formada nos arredores da fissura. Ou seja, a formação de calcita ocorre ao longo do tempo, dada a carbonatação gradual dos elementos em concreto armado.

Gupta, Pang e Kua (2017) afirmam que o mecanismo autogênico pela utilização de maior consumo de cimento limita-se não apenas pela abertura máxima da fissura que pode ser cicatrizada, mas, ainda, pela necessidade de água para hidratação das partículas anidras. Cabe destacar que, em termos financeiros e de impacto ao meio ambiente, não há grande incentivo para que seja acrescido o consumo de cimento (CELADYN, 2016; MÜLLERA et al., 2014; IMBABI; CARRIGAN; MCKENNA, 2012). Há ainda limitação no que tange à ocorrência de múltiplos fenômenos de cicatrização.

Há de ser considerado que a composição dos traços tem influência direta com o potencial de cicatrização a ser verificado. Cappellesso et al., (2019) perceberam, por exemplo, que em seu estudo o potencial de cicatrização foi superior em concretos com menor relação água/cimento.

De acordo com Alyousif (2016), quando não são empregados materiais suplementares, o potencial de autorregeneração do concreto é relacionado diretamente com a formação de calcita e do gel de C-S-H. Ainda, conforme o autor, mesmo que seja atribuída eficácia aos dois fenômenos, é através da formação da calcita que há maior bloqueio ao ingresso de agentes deletérios, apontando este método como o que proporciona maior autorregeneração.

Em termos de exequibilidade, esse método não afeta os procedimentos de dosagem, mistura ou cura do concreto, sendo, portanto, de fácil reprodução.

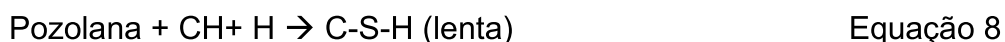
Cabe ser destacado que devem ser analisados a fissura do cimento e a redução da reserva alcalina que pode decorrer da sua composição e das adições empregadas, dado que isso impactará na capacidade de autocicatrização.

2.2.1.2.2 Autogênico pela utilização de pozolanas

Segundo Gupta, Pang e Kua (2017), a utilização de pozolanas, que possuem hidratação mais lenta em comparação com o cimento, constitui-se como uma forma de autocicatrização. O maior tempo necessário para reação das pozolanas decorre da necessidade de utilização do CH, que é resultante da hidratação do cimento como produto para a formação de C-S-H. Quando o concreto fissura, nas idades iniciais,

ainda existem partículas anidras disponíveis de materiais como cinzas volantes, escória de alto forno, entre outros, permitindo sua cicatrização. Importante destacar, no entanto, que tal fenômeno tem dependência da disponibilidade de partículas ainda não hidratadas, e por isso, não se pode atribuir confiabilidade a múltiplos fenômenos de cicatrização.

Mehta e Monteiro (2014) caracterizam a reação pozolânica pela Equação 8.



Percebe-se que há uma reação lenta com o CH resultante da hidratação do cimento, para que o C-S-H secundário possa ser formado, atribuindo resistência ao material. Termkhajornkit et al., (2009) afirmam que a eficácia da recuperação se relaciona com a ocorrência de fissuras por retração, que ocorrem até os 28 dias, período no qual ainda está ocorrendo a hidratação das pozolanas. No estudo conduzido pelos autores, percebeu-se uma relação direta entre o percentual de utilização de cinza volante (CV) e o desempenho do material em termos de fechamento de fissuras.

Para verificação da viabilidade deste mecanismo de autorregeneração, Hung, Su e Su (2018) desenvolveram misturas de concreto contendo hibridismo de CV e escória de alto forno (EAF). De acordo com os autores, foi possível verificar a formação de produtos de cicatrização aos 28 dias, quando as amostras foram mantidas em atmosfera de umidade elevada. Tem-se ainda como uma conclusão deste estudo que nas maiores fissuras verificadas houve uma quantidade crescente de CaCO_3 e decrescente de C-S-H.

Ainda, em relação ao ambiente de cura em amostras contendo adições pozolânicas, Reddy e Ravitheja (2019) perceberam que dentre as condições de cura avaliadas (imersão em água, contato com água, ciclos de molhagem e secagem e atmosfera seca ao ar) apenas a cura ao ar não proporcionou as condições para a formação de produtos de autorregeneração nos concretos.

Krelani (2015) cita como um dos benefícios do concreto com adições pozolânicas o fato de não ser necessária a ativação do agente de autorrecuperação. O autor explica que, pela reação de hidratação levar mais tempo, tem-se o fechamento das fissuras iniciais, sem que haja tempo para a degradação da estrutura pela entrada de agentes deletérios. Considerando que as fissuras cicatrizadas são formadas nas idades iniciais do concreto, pode-se dizer que o potencial de cicatrização seria para fissuras térmicas e de retração, entre outras, desde que ocorridas em idades iniciais.

Analisando comparativamente a eficácia das pozolanas na mistura, Sahmaran, Yildirim e Erdem (2013) perceberam que a principal diferença entre as adições é a espessura máxima cicatrizada. Para amostras contendo CV de categoria F, o potencial máximo de cicatrização foi de 30 μm . Para a categoria C, de 50 μm . O maior potencial foi para amostras contendo EAF, com valores de, aproximadamente, 100 μm . Cabe destacar que a classificação das pozolanas como C e F seguiu a ASTM C618 (2012).

De modo análogo aos estudos citados, Depaa e Felix Kala (2015) buscaram contribuir ao analisar a utilização de sílica ativa (SA) e EAF. Os autores avaliaram as propriedades físicas e mecânicas, verificando que houve benefícios no comportamento mecânico e pequeno crescimento na absorção de água, sem validar o comportamento após abertura de fissuras, apenas afirmando que há maior potencial pela formação de C-S-H secundário.

Mehdipour, Zoughi e Khayat (2018) propuseram mistura ternária contendo cimento Portland, CV e EAF. O intuito dos autores foi validar diferentes técnicas para mensurar a cicatrização do concreto. Foi observada a eficácia através de ensaios não destrutivos, variação na reflectometria de microondas, sendo os resultados de tal ensaio modificados quando há: (I) formação de fissura (II) ingresso da umidade na fissura e (III) formação do produto de regeneração. Em ensaios de caracterização química avançada, percebeu-se o produto de cicatrização formado por CaCO_3 mesclado com C-S-H e CH. Em relação aos traços propostos pelos diversos autores, tem-se síntese na Tabela 4.

Tabela 4 – Características de composição dos SHC com o uso de pozolanas

Autores	Características da composição e resultados obtidos pelos autores
Depaa; Felix Kala (2015)	Os autores adicionaram sílica ativa (SA) nos percentuais de 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5%, em relação à massa do cimento e como aglomerante. Além disso, avaliaram a substituição de cimento nos percentuais de 35 e 55% por escória de alto forno (EAF). O melhor comportamento mecânico foi verificado com 35% de EAF, além de formação de produto de autorregeneração.
Gruyaert et al., (2014)	Os autores optaram pela substituição de cimento por cinza volante (CV) e EAF. Os percentuais de substituição foram de 30 e 50%, e 50 e 85%, respectivamente. Além disso, foram testados diferentes ativadores alcalinos. Os resultados obtidos apontam para um maior potencial de cicatrização das amostras contendo EAF em relação às amostras contendo CV.
Hung; Su; Su (2018)	Foram avaliadas misturas híbridas contendo diferentes percentuais de CV e EAF. A quantidade de água e de agregados foi mantida constante. As misturas contaram com 100% de CV, 80% de CV e 20% de EAF e 60% de CV e 40% de EAF. A quantidade de uso dos materiais seguiu uma relação de 2 vezes a quantidade de cimento. O melhor comportamento mecânico foi verificado na amostra 60CV40EAF. Nas verificações por MEV os autores relatavam que não houve variações impactantes entre as amostras.
Mehdipour; Zoughi; Khayat (2018)	A composição de concreto avaliada contou com 45% de cimento Portland sem adições, 20% de EAF e 35% de CV classe C. Os autores perceberam a formação de materiais alusivos a cicatrização em todas as amostras, pela MEV.
Sahmaran; Yildirim; Erdem (2013)	Os autores utilizaram as três adições pozolânicas (CV categoria C e categoria F, e escória) com relação de 2,2 vezes a quantidade de cimento. A relação água/cimento e a quantidade de agregados foi mantida constante nas diferentes misturas, tendo variado o percentual de uso de aditivo superplastificante. Os autores não avaliaram hibridismo das adições. Os resultados apontaram um potencial de fechamento de fissuras de até 30 µm para cinza volante classe F, 50 µm para classe C e 100 µm para escória de alto forno.
Termkhajornkit et al., (2009)	Os autores substituíram o cimento por CV nas misturas nos percentuais de 15%, 25% e 50%, em volume, contando com valores de relação água/cimento de 0,48, 0,49 e 0,53, respectivamente. A recuperação da fissura foi proporcional à quantidade de adições pozolânicas, sendo mais vantajosa a mistura contendo 50% de adição.

Fonte: elaborado pela autora, texto traduzido para português

Como pode-se perceber, há diversos tipos de pozolanas utilizados pelos autores, o que decorre da disponibilidade do produto em diversas regiões, por exemplo. Além disso, os autores aplicam diferentes percentuais de uso em termos de adição e substituição, analisando não apenas o fenômeno de cicatrização, mas também os impactos mecânicos, físicos e químicos nas matrizes dos concretos.

2.2.1.2.3 Autogênico pelo tratamento com os agregados

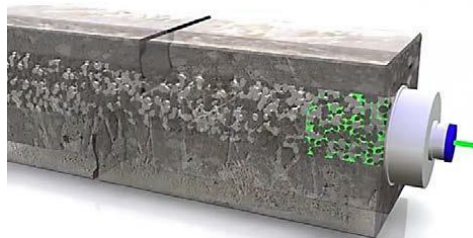
Conhece-se, através dos vastos estudos já desenvolvidos em agregados reciclados, que sua resistência mecânica pode ser inferior ao de agregados naturais e da matriz de concreto, assim como, pode haver maior sensibilidade a ocorrência de

fissuração (BENDIMERAD; ROZIÈRE; LOUKILI, 2016) . Assim, tem-se relevância na impregnação de tais materiais, possivelmente viabilizando sua autocicatrização.

Há estudos, como o de Medjigbodo et al., (2018), que verificam o potencial de autocura proporcionado por agregados reciclados de concreto, que possuem maior porosidade (YAP et al., 2018) e podem conter partículas anidras de cimento. Os autores verificaram o potencial elevado de selagem de fissuras, que chegou a apresentar 60% de recuperação. Foi percebido ainda que os agregados tiveram contribuição em fissuras superiores a 20 μm , não tendo influência em aberturas inferiores a esta dimensão. As fissuras de menor dimensão podem não ter tido profundidade necessária para o alcance do núcleo de ativação do produto de cicatrização e regeneração.

Sangadji et al., (2017) propuseram estudo em que elementos de concreto foram modificados de modo a conter em seu centro um núcleo de concreto permeável, sem a utilização de agregados miúdos, e como uma forma de encapsulamento de soluções para autocura, vide Figura 3.

Figura 3 – Proposta de núcleo de concreto permeável em elemento de concreto - Rede de transporte de agentes autoregenerantes



Fonte: Sangadji et al. (2017 p.606)

Como se percebe, a proposta desenvolvida pelos autores utiliza materiais que convencionalmente são aplicados no concreto, todavia, trabalhando com diferentes proporções de agregados. Foi possível obter nesse estudo potencial de cicatrização das fissuras entre o período de 1 e 28 dias de cura, denotando a eficiência da técnica. Segundo os autores, a utilização de uma matriz porosa permitiu a circulação da solução bacteriana, alcançando diversos pontos localizados próximo à fissura e garantindo a precipitação dos biominerais, principalmente o CaCO_3 .

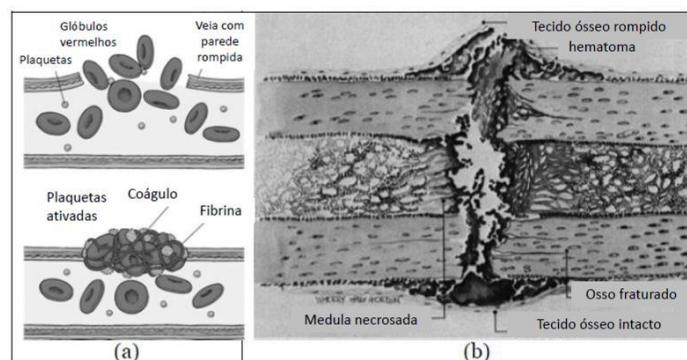
O uso de agregados leves será relatado na sequência, considerando seu uso para impregnação de soluções químicas e bacterianas.

2.2.1.2.4 Autônomo pelo emprego de soluções bacterianas

Segundo Zwaag (2008), embora o fenômeno de autocicatrização tenha sido reconhecido nos materiais ao longo da história, especialmente nos sistemas biológicos, apenas recentemente iniciou-se a avaliação da propriedade de autocicatrização, principalmente focando na capacidade de regressão da deterioração das estruturas de concreto e ampliação da vida útil.

Inicialmente, pode-se citar que a utilização de solução bacteriana pode ser classificada como biomimética. Trata-se da aplicação, neste caso na construção civil, de soluções baseadas nas funções de um corpo orgânico, seja em um elemento, projeto ou produto (CICLO VIVO, 2016). São imitados nessas estruturas fenômenos que já ocorrem na natureza. (TRASK; WILLIAMS; BOND, 2007). Fratzl et al., (2013) apontam que o processo de cura se trata da utilização de um princípio básico, inclusive de ocorrência no corpo humano, citando como exemplo os processos de coagulação do sangue (a) e reconstrução dos ossos (b) como apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fenômenos de cura do corpo humano - (a) coagulação do sangue e (b) recuperação dos ossos



Fonte: Fratzl (2013); Krelani (2015, p.3), texto traduzido para português

Conforme apresenta a Figura 4, quando há o rompimento da parede de uma via (veias ou artérias), há acúmulo dos glóbulos vermelhos e das plaquetas, formando um coágulo e impedindo que exista uma hemorragia. Em b, percebe-se a reconstrução do osso e do tecido ósseo após fratura, ação conduzida pelo próprio organismo.

Cabe, anteriormente a apresentação do fenômeno, pontuar algumas características referentes às bactérias:

- Madigan et al., (2016) informam que há mais de 10 mil espécies de bactérias que já foram descritas, distribuídas em mais de 80 filos¹. As espécies microbianas são descritas de acordo com um conceito filogenético² de espécie, sendo esse alusivo a um grupo de espécies com características diagnósticas compartilhadas. Para enaltecer a diversidade das bactérias, os autores afirmam que, de acordo com as análises de sequenciamento de genes RNAr16s, pode haver mais de 10 mil espécies em 1 grama de solo;
- entre algumas das características que têm importância para categorizar as bactérias, tem-se a fisiologia, que impacta diretamente no ambiente de inserção das bactérias, envolvendo: faixas de temperatura, pH, sal para crescimento, resposta ao oxigênio, entre outros (MADIGAN et al., 2016);
- Ingraham e Ingraham (2010) ressaltam, comparando a outros microorganismos, que para as bactérias o efeito da nutrição sobre o crescimento é impactante;
 - existem algumas coleções de culturas microbianas em diversos países, dentre as quais destacam-se as apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Bases de dados- coleções internacionais de culturas microbianas

Abreviação	Nome	Localização
ATCC	American Type Culture Collection	Manassas, Virgínia, USA
BCCM/LMG	Belgium Coordinated Collection of Microorganisms	Ghent, Bélgica
CIP	Collection de l'Institut Pasteur	Paris, França
DSMZ	Deutsche Sammlung Von Mikroorganismen und Zelikulturen	Braunschweig, Alemanha
JCM	Japan Collection of Microorganisms	Saitama, Japão
NCCB	Netherlands Culture Collection of Bacteria	Utrecht, Holanda
NCIMB	National Collection of Industrial, Marine and Food Bacteria.	Aberdeen, Escócia

Fonte: Madigan et al., (2016, p.375)

Cabe ressaltar que no cenário nacional conta-se com a CBMAI - Coleção Brasileira de Micro-organismos de Ambiente e Indústria.

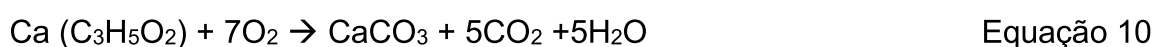
De acordo com Alshalif et al., (2016), a utilização de bactérias ou soluções bacterianas imersas no concreto tem a função de produzir carbonato. Como as

¹ Filos: Filo ou divisão é um dos níveis taxonômicos, usado para classificar os indivíduos. Fica abaixo do nível do reino.

² Filogenética: Tem relação com a origem das espécies, apresentando sua evolução e ancestralidade.

partículas de cimento possuem cálcio, trata-se de uma união para a produção de CaCO_3 . Tratando especialmente nas bactérias reduzidas em sulfato, tem-se a precipitação de dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), produzindo carbonatos de cálcio e magnésio (CaCO_3 e MgCO_3 , respectivamente).

Adak (2015) afirma que a difusão do CaCO_3 (carbonatação), de ocorrência quando há reação dos compostos do concreto com o CO_2 (Equação 9), se assemelha ao processo de autorregeneração com a utilização de soluções bacterianas (Equação 10).



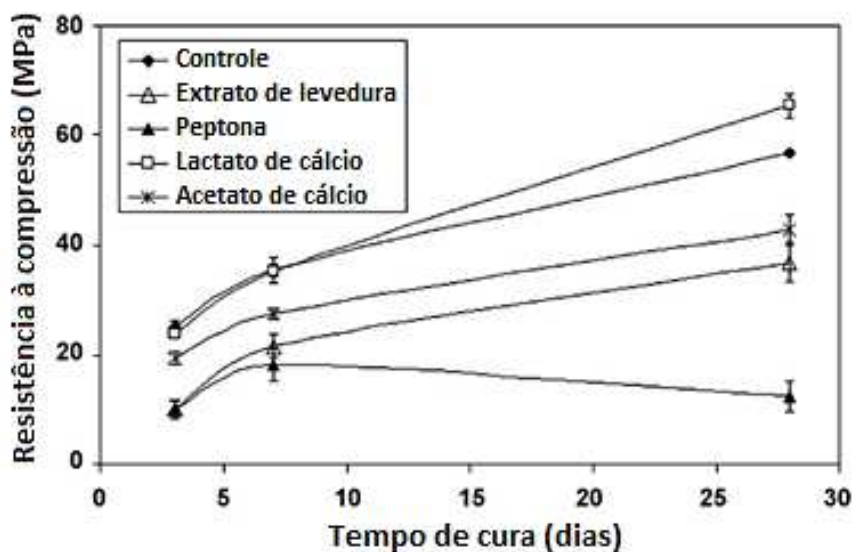
Segundo Adak (2015), a Equação 10 aponta para o processo em que o ingresso de água ativa a bactéria até então dormente. Na sequência, densas camadas de CaCO_3 são produzidas por conversão bacteriana de um mineral incorporado na matriz. Cabe destacar que a equação citada se refere a utilização de lactato de cálcio, sendo a bactéria apenas um agente catalisador da ocorrência.

Assim, para que ocorra a precipitação do carbonato de cálcio é necessário que existam nutrientes cálcios à disposição das soluções bacterianas. Como o lactato de cálcio, podem ser usados íons de cálcio, adicionando-se, por exemplo, cloreto de cálcio. Todavia, a incorporação de tal produto pode gerar um ataque por íons, e conseqüente degradação. Dessa forma, Seifan, Samani e Berenjian (2016) afirmam que, comumente, aplica-se nitrato de cálcio ou lactato de cálcio.

Diversos estudos foram desenvolvidos com o emprego de lactato de cálcio, tais como Jiang et al., (2020), Tziviloglou et al., (2016), entre outros. Além dos nutrientes cálcicos, é possível utilizar nutrientes complexos, como o extrato de levedura (WANG et al., 2012, 2014a, 2017, 2014c, 2014b; ZHANG et al., 2017), extrato de carne (XU; WANG, 2018) e peptona (JONKERS et al., 2010; XU; WANG, 2018).

Para análise desses diferentes tipos de nutrientes, Jonkers et al., (2010) avaliaram diferentes nutrientes frente à resistência à compressão apresentada por amostras de pasta de cimento ao longo do tempo, Figura 5.

Figura 5 – Comparação do desenvolvimento da resistência à compressão das amostras quanto aos nutrientes orgânicos utilizados

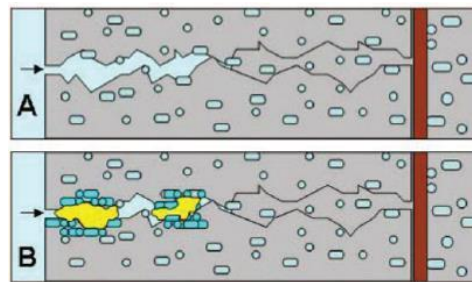


Fonte: Jonkers *et al.*, (2010, p. 233), texto traduzido para português

Ao analisar a Figura 5, pode-se perceber que com exceção do lactato de cálcio, todos os demais nutrientes provocaram queda na resistência à compressão em relação à mistura de referência. O contraponto de uso desse material, segundo Patel (2015b), é seu elevado custo.

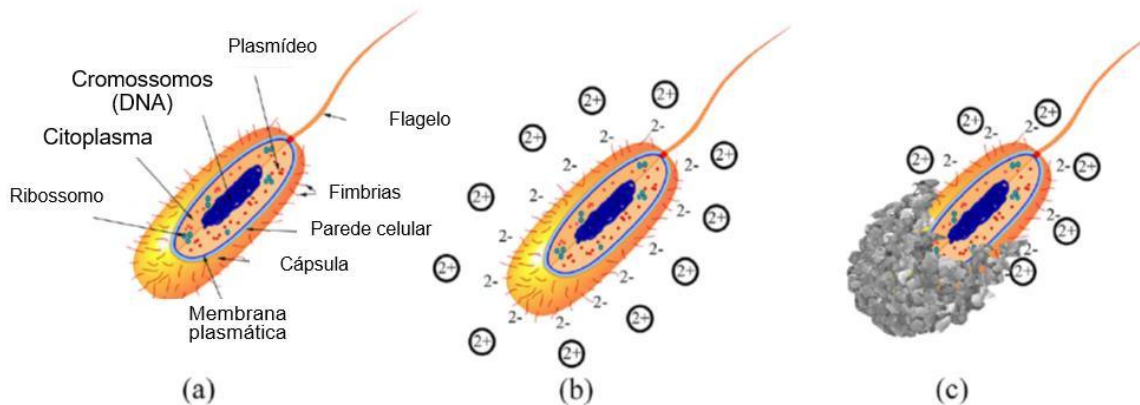
Seifan, Samani e Berenjian (2016) consideram que a precipitação mineral através das bactérias é um fenômeno em que biominerais são formados através da interação entre produtos metabólicos gerados pelos próprios organismos e seu ambiente de inserção. Para sua ocorrência, os autores complementam que deve haver presença de água ou de umidade. Através da Figura 6, tem-se a simplificação do mecanismo de atuação do bioconcreto. Conforme os autores, inicialmente ocorre o ingresso de água no interior das microfissuras do concreto. Na sequência, bactérias selam as fissuras através da produção de calcário, garantindo a proteção as armaduras em seu interior. A esquematização completa da regeneração é apresentada por Seifan, Samani e Berenjian (2016), Figura 7.

Figura 6 – Mecanismo de atuação do SHC- ação de soluções bacterianas



Fonte: Ingenia (2011, p.2)

Figura 7 – Estrutura das bactérias e mecanismos da autorrecuperação (a) estrutura das bactérias (b) células carregadas negativamente (c) produção biomineral pelos íons



Fonte: Seifan; Samani; Berenjian (2016, p.3), texto traduzido para português

De acordo com o apresentado pelos autores e pela Figura 7, a precipitação mineral ocorre através da fixação de íons positivos nas paredes das células microbianas que tem cargas negativas. Na sequência, formam-se produtos biominerais.

As bactérias possuem capacidade de produzir uma variedade de minerais, como carbonatos, sulfuretos, silicatos, fosfatos. (FORTIN; FERRIS; BEVERIDGE, 1997). Porém, ao considerar que o produto formado deve ter compatibilidade com a matriz de concreto que estará em seu entorno, convém a produção de carbonatos, em especial, do CaCO_3 , de alta compatibilidade com a matriz de concreto.

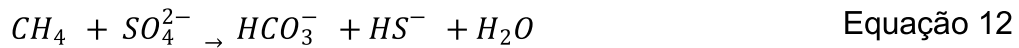
Cabe apresentar que há variações no processo de formação desses minerais, podendo ser por via autotrófica ou via heterotrófica:

a) via autotrófica: ocorre através de três maneiras, caracterizando-se tal método pela ocorrência do fenômeno proporcionado pela presença de diferentes bactérias.

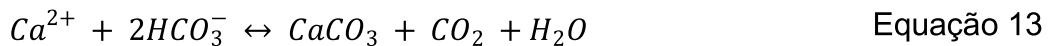
-Metanogênese não-metilotróficas (por archaea metanogênica): reação de acordo com a Equação 11



-Fotossíntese de oxigênio (cianobactérias), conforme Equação 12



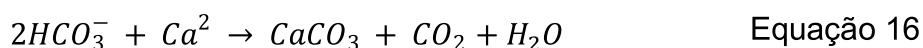
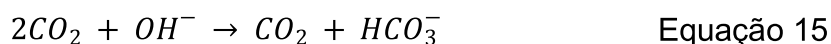
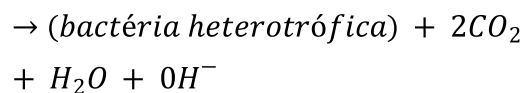
-Fotossíntese anoxigênica (por bactérias púrpuras), conforme Equação 13



De acordo com Seifan, Samani e Berenjian (2016), existem grupos de atuação com bactérias oxigênicas e anoxigênicas. No caso das anoxigênicas, o sulfeto de hidrogênio (H₂S) atua como um doador de elétrons na reação redox. Ainda que exista a possibilidade de precipitação do cálcio através da fotossíntese, não pode ser ignorada a necessidade de presença de CO₂ no ambiente.

b) via heterotrófica

Conforme Seifan, Samani e Berenjian (2016), é decorrente do crescimento das bactérias a precipitação dos cristais. O crescimento heterotrófico de diferentes gêneros de bactérias, como *Bacillus*, *Arthrobacter* e *Rhodococcus* em sais ácidos (acetato, lactato, citrato, succinato, oxalato, malato e glioxilato) resulta na produção de minerais carbonatados (como CaCO₃ e carbonato de magnésio). As equações 14, 15 e 16 sintetizam essa ocorrência.



Quando do uso de bactérias da espécie *Bacillus*, é induzida a precipitação de CaCO₃ através da oxidação de componentes orgânicos em CO₂, que se transforma em CO₃²⁻ em ambientes alcalinos, e precipita em forma de CaCO₃ na presença de íons de cálcio disponíveis no concreto. (WANG et al., 2017).

Existem procedimentos específicos para que ocorra a precipitação do carbonato de cálcio por indução microbiana, sendo (a) redução de ferro (b) redução de sulfato (c) hidrólise de uréia (d) desnitrificação (e) oxidação de metano e (f) fotossíntese (ERŞAN; DE BELIE; BOON, 2015). Madigan et al., (2016) e Jonkers (2011a) apresentam a seguinte classificação biológica:

- a) microrganismos aeróbios: extraem energia de compostos através de respiração, ou seja, através de reações químicas que envolvem a presença de oxigênio;
- b) microrganismos alcalifílicos: tem o maior valor da taxa de crescimento da população quando inseridos em ambientes alcalinos, com $\text{pH} \geq 8$;
- c) microrganismos esporuladores: suas células sofrem diferenciação, criando esporos com grande resistência a estresses químicos e físicos, os quais podem permanecer dormentes por mais de 50 anos.

De Koster et al., (2015) concordam com o apresentando, citando que, através de esporos, bactérias tornam-se capazes de sobreviver sem a presença de água ou de nutrientes por mais de 100 anos. Jonkers e Schlangen (2007), precursores no estudo do bioconcreto, afirmam que os esporos são células especializadas, através da qual se garante a resistência a estresses químicos e mecânicos, podendo, de acordo com Schlegel (1993), permanecer dormente por até 200 anos. Lala, Hussain e Akhtar (2014) complementam, afirmando que, após a selagem de fissuras, a condição se torna inóspita para as bactérias, sendo a formação de esporos uma condição necessária para sua sobrevivência.

De Belie e Wang (2015) citam que há mais de um processo responsável pela formação de carbonato de cálcio através de soluções bacterianas, Tabela 6.

Tabela 6 – Mecanismos de produção de carbonato através de soluções bacterianas

Bactérias autotróficas	Bactérias heterotróficas				
	Metabolismo assimilativo	Metabolismo dissimilativo		Receptor de elétron	
		Oxidação de carbono orgânico			
Metanogênese não-metilotrófica	Decomposição de ureia	Aeróbio		Anaeróbio	
Fotossíntese anoxigênica		Processo	Receptor de elétron	Processo	
Fotossíntese oxigênica	Amonificação de aminoácidos	Respiração	O_2	Respiração	$\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$
		Oxidação de metano	CH_4/O_2	Redução de sulfato	SO_4^{2-}

Fonte: De Belie e Wang (2015, p. 2), texto traduzido para português

Müller, Pacheco e Tutikian (2019) apontam os mecanismos e diferentes espécies que vem sendo empregadas em relação a cada um desses. Na Tabela 7 apresentam-se as espécies empregadas para a hidrólise de ureia. Percebe-se predomínio no uso de espécies do gênero *Bacillus*, devido à sua compatibilidade com o ambiente proporcionado pelo concreto.

Tabela 7 – Espécies bacterianas usadas para formação de CaCO_3 por hidrólise de uréia

Espécies	Autores
<i>Bacillus</i> sp.	Achal, Mukerjee e Reddy (2013)
<i>Bacillus sphaericus</i>	De Muynck et al., (2008) e Wang et al., (2012, 2014a, 2017, 2014b, 2014c)
<i>Bacillus megaterium</i>	Krishnapriya, Babu e Arulraj (2015) e Wang et al., (2017)
<i>Sporosarcina pasteurii</i> ^a	Achal, Mukherjee e Reddy (2011), Bang, Galinat e Ramakrishnan (2001), Chahal, Siddique e Rajor (2012), Ramachandran, Ramakrishnan e Bang (2001), Wang et al., (2017) e Xu e Wang (2018)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Ramachandran, Ramakrishnan e Bang (2001)
Espécies aleatórias coletadas em solos alcalinos:	<i>Bacillus megaterium</i> <i>Bacillus licheniformis</i> <i>Bacillus flexus</i>
	Krishnapriya, Babu e Arulraj (2015)

^a Chamada nos estudos originais de *Bacillus pasteurii*, porém Wang et al., (2017) comentam que houve reclassificação e renomeação da espécie após a publicação original

Fonte: Müller, Pacheco e Tutikian (2019), p170 .

Já a Tabela 8 apresenta as espécies empregadas para o método através de oxidação de componentes orgânicos. É possível notar que apenas o gênero *Bacillus* tem sido estudado nesse campo.

Tabela 8 – Espécies utilizadas para a oxidação de componentes orgânicos

Espécies	Autores
<i>Bacillus</i> sp.	Jonkers (2011) e Tziviloglou et al., (2016)
<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Jonkers et al., (2010)
<i>Bacillus cohnii</i>	Jonkers et al., (2010), Jonkers e Thijssen (2010) e Zhang et al., (2017)
<i>Bacillus alkalinitrilicus</i>	Wiktor; Jonkers (2011)

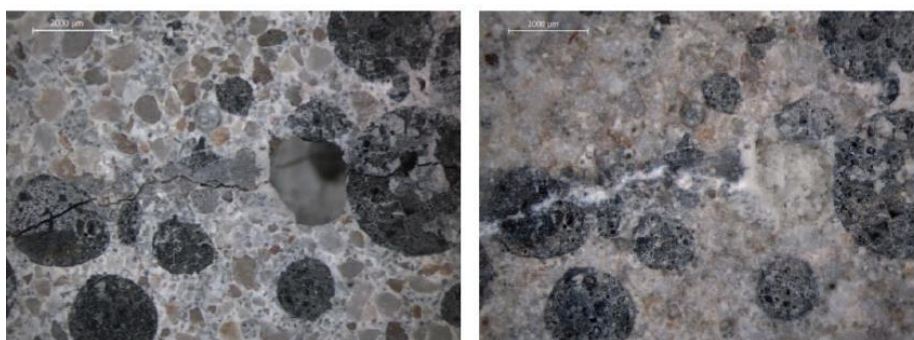
Fonte: Müller, Pacheco e Tutikian (2019), p171.

Afifudin et al. (2011) estudaram a participação de bactérias na formação de C-S-H, de modo similar a formação secundária que decorre da utilização de pozolanas. Os autores investigaram bactérias *Bacillus subtilis* e *Bacillus subtilis* modificadas quimicamente com composições contendo 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 células/mol, além da mistura de referência. Perceberam que houve precipitação de silicato com 10 dias, sem relação proporcional com o percentual aplicado de solução bacteriana. Ainda, não se percebeu benefício na modificação química das bactérias.

Alshalif et al., (2016) ao introduzirem solução bacteriana reduzida em sulfatos, verificaram que as alterações em relação ao material de referência foram o acréscimo de resistência mecânica à compressão e redução da porosidade, observada através do ensaio de absorção de água. Destaca-se que ambas variáveis foram avaliadas até os 28 dias, sem que apresentassem estabilização.

A Figura 8 (INGENIA, 2011) apresenta o estudo de um concreto pós fissuração e a ação do agente autocicatrizante, atuando na selagem da fissura pela precipitação do CaCO_3 , evidenciando o potencial de uso da técnica.

Figura 8 – Verificação da atuação das bactérias em SHC- Diagnóstico por imagens



Fonte: Ingenia (2011, p.3)

Wang et al. (2017) afirmam que a bactéria capaz de precipitar o carbonato é adicionada à mistura com nutrientes em seu estado fresco. Diante da formação de microfissura, espera-se que tais bactérias sejam capazes de precipitar o CaCO_3 , sendo, então, seladas as fissuras presentes no material.

A penetração de água pelas fissuras não somente dissolveria as partículas de calcita ou CaCO_3 presentes na matriz da argamassa, mas também, reagiria junto com o CO_2 atmosférico, o óxido de cálcio e o hidróxido de cálcio (ZAI; MURTHY, 2015).

Anneza et al., (2016), não só afirmam que a utilização de bactérias pode ser favorável para a durabilidade dos SHC, mas também que os materiais constituem uma tecnologia para acréscimo da resistência à compressão dos concretos sem que seja necessária uma maior adição de cimento, ou sua substituição por materiais pozolânicos. Há, ainda, constatações de que a utilização de tais materiais possa influenciar na absorção de água dos concretos, impactando no comportamento durável mediante agentes de deterioração (ALSHALIF et al., 2016).

Alshalif et al., (2016) utilizaram as bactérias reduzidas em sulfatos, obedecendo ao seguinte procedimento de preparo do material: enriquecimento, diluição em série,

placa de estrias, purificação de deformação, coloração de grama e microscopia. SRB - *Sulphate reduction bacteria* (SRB) -, bactérias reduzidas em sulfato, texto traduzido para português, foram enriquecidas sob ambiente especial, visando simular o interior de estrutura de concreto, garantindo confiabilidade na aplicação.

Um dos pontos importantes para a eficácia do método é a escolha das bactérias a serem utilizadas. Segundo Zai e Murthy (2015) *Bacillus* é um tipo de bactéria cultivada em laboratório, que, mediante meios adequados e a presença de uma fonte de cálcio, pode produzir calcita. Ainda segundo os autores, o formato de bastão de um membro desse grupo permite que este se proteja de condições extremas em seu entorno, destacando o potencial do material de ser inserido no concreto sem danos para a sua sobrevivência. Wang et al., (2017) através de análises biológicas de condições de sobrevivência, provaram que a bactéria *bacillus sphaericus* LMG 22257 é apropriada para uso na composição de concretos autocicatrizantes. Cabe destacar que tal classificação é oriunda da WDCM - *World data centre for microorganisms* - Centro de dados mundial para microorganismos, texto traduzido para português, sem data. Cabe ser destacada a pertinência das soluções aos métodos de produção de carbonato de cálcio já citados.

Uma das bactérias mais utilizadas nos estudos referentes ao SHC é a *bacillus subtilis*. Trata-se de uma bactéria do grupo Cocos, com a subdivisão dos endósporos ovais ou cilíndricos, anaeróbicos facultativos, hidrolisam caseína e amido. Além disso, é mesófila e tem posição do endósporo central (MADIGAN et al., 2016).

Schwantes- Cezario et al., (2017) avaliaram a formação de biofilme por parte das bactérias *bacillus subtilis*, em seu estudo com a identificação AP 91, verificando que houve potencial na produção de carbonato de cálcio, tendo os autores se posicionado a favor da utilização dessa bactéria em compósitos cimentícios. Essa identificação é oriunda da coleção de culturas do IBSBF- Coleção de culturas de fitobactérias do laboratório de bacteriologia vegetal.

Autores como Anneza et al., (2016) optaram pela substituição parcial da água de amassamento por solução contendo as bactérias, em oposição ao encapsulamento. Nestes casos, verificou-se que esta substituição conduziu ao acréscimo da resistência à compressão do concreto.

Adak (2015) descreve o procedimento de preparo da solução bacteriana em duas etapas. Inicialmente, 12,5 g de solução do nutriente são adicionadas a um frasco cônico, contendo 500 ml de água destilada. Usa-se para cobrir o frasco algodão, papel

e elástico. Após, é esterilizado o material. A solução apresenta coloração alaranjada (Figura 9a). Depois da esterilização, adiciona-se de 1 ml de bactéria, sendo mantido o frasco em um agitador na velocidade de 150-200 rpm durante 12 horas. A solução torna-se amarela esbranquiçada (Figura 9b). O autor indica que houve cicatrização destacando o potencial da técnica para fissuras de até 5mm.

Figura 9 – Preparo de solução bacteriana (a) líquido base (b) dispersão bactérias



(a)



(b)

Fonte: Adak (2015, p.7)

Ao avaliarem a técnica, Alghamri, Kanellopoulos e Al-tabbaa (2016) afirmam que o ciclo biológico de recuperação reduz o impacto relacionado da substituição parcial ou total das estruturas, a minimização do consumo do cimento e seu potencial de danos ao meio.

Buscando sintetizar o obtido nos estudos já realizados, a Tabela 9 apresenta as características das soluções bacterianas trazidas por diversos estudos.

Tabela 9 – Características das soluções bacterianas empregadas em SHC

Autores	Solução bacteriana
Adak (2015)	O procedimento envolve a utilização de 12,5 g de um nutriente dissolvido em água destilada. Após procedimentos prévios, é adicionado 1 ml de bactéria.
Alsharif et al (2016)	Os autores trabalharam com a bactéria isolada em sulfato, com percentuais de inserção na matriz de 1, 3 e 5%, além da matriz de referência. Houve nesse estudo um enriquecimento da bactéria para resistência no ambiente alcalino do interior do concreto. Para tal, empregou-se sulfato de magnésio hepta-hidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Além disso, empregou-se NaOH para controle do pH da mistura. Obteve-se uso de 25 ml de nutriente e 10 ml do sulfato de magnésio hepta-hidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)
Alazhari et al. (2018)	Os autores utilizaram <i>Bacillus pseudofirmus</i> DSM 8715 (código oriundo da DSMZ - Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen - coleção alemã de microorganismos, texto traduzido para português). As células foram rotineiramente cultivadas em caldo de lisogenia tamponada (LB) que continha 100 ml/l de bicarbonato de sódio para atingir um pH de 9,5. Os esporos foram preparados em meio de esporulação e incubados a 30°C em um agitador orbital por 72 h. Após, houve centrifugação a 10.000 rpm durante 15 min. A formação de esporos foi confirmada por microscopia de contraste de fase. A quantia de esporos foi lavada por três vezes com um tampão de HCl 10 mM gelado, pH 9,5. O esporo foi então liofilizado para obter um pó de esporos e armazenado em um dessecador antes de usar.
Anneza et al (2016)	Os autores optaram por coletar bactérias presentes na urina e na água de rios. Após sua identificação, os autores fizeram dissolução para solução bacteriana, sendo os tipos bactéria ureolítica (<i>Enterococcus faecalis</i>) e bactéria reduzida em sulfato (<i>Bacillus SP</i>). Os autores testaram as soluções atuando isoladamente e em uma composição híbrida com ambas.
Jonkers (2011)	O estudo avaliou a substituição parcial de agregados por argila expandida contendo agente bioquímico de auto cura (bioquímico agente de auto-cura (esporos bacterianos $1,7 \times 10^5$ g-1 partículas de argila expandida correspondendo a 5×10^7 esporos dm^{-3} de concreto, mais 5% em massa de lactato de cálcio fraccionado, correspondente a 15 g dm^{-3} de concreto). A argila foi seca em estufa à 40°C.
Jonkers; Schlagen (2007) e Jonkers; Schlagen (2008)	Os autores testaram soluções contendo as bactérias <i>Bacillus Cohnni</i> DSM 6307, <i>Bacillus Halodurans</i> DSM 497 e <i>Bacillus Pseudofirmus</i> DSM 8715. Segundo os autores, o meio básico para as bactérias foi composto de 0,2 g de NH_4Cl , 0,02 g de KH_2PO_4 , 0,225 g de $CaCl_2$, 0, 2g de KCl , 0,2 g de $MgCl_2$. Para formação dos esporos foram utilizados 50 mM de $NaHCO_3$, 50 mM de Na_2CO_3 e 20 mM de citrato de sódio. Destaca-se que nestes estudos o pH do meio foi de 9,2. As soluções foram incubadas em frascos de Erlenmeyer em um agitador a 150 rpm.
Khaliq; Ehsan (2016)	Bactérias do tipo <i>B. subtilis</i> foram selecionadas, sendo que a quantidade de solução necessária na mistura foi calculada com base na concentração encontrado pelo teste de densidade óptica usando um espectrofotômetro. A concentração de bactérias na solução medida foi de $2,8 \times 10^8$ células/ml. Com base nesses resultados, a concentração de esporos nas amostras foi mantida igual 3×10^8 células/ cm^3 de mistura de concreto.
Krishnapriya; Venkatesh Babu; (2015)	Os autores informam que foram utilizadas cinco cepas bacterianas resistentes a álcali, isoladas de amostras de solo alcalino de uma fábrica de cimento na Índia. Nesse estudo, como substrato de cultivo das bactérias, empregou-se farelo de trigo. Poucas colônias da cultura pura foram inoculadas em caldo nutriente de 25 ml num frasco de 100 ml e a condição de crescimento foi mantida a 37°C e colocadas num agitador orbital de 125 rpm. A composição da mídia utilizada para o crescimento da cultura foi Extrato de Levedura 5 g / l, Excesso de Carne 5 g / l e Farelo de Trigo 20 g / l. O pH foi mantido alcalino em 8.2.2

(Luo; Qian; Li, 2015)	Os autores informam que foram utilizadas bactérias resistentes a álcali formadoras de esporos, sem maior detalhamento. Como procedimento prévio, as bactérias foram cultivadas em meio líquido, contendo 5,0 g de peptona e 3,0 g de extrato de levedura por litro de água destilada (pH = 7,0), que foi autoclavado a 121 ° C por 25 min. Após a inoculação em fluxo laminar, o meio foi incubado a 30 ° C em um agitador a 170 rpm por 24 h. O agente de auto-cura microbiana consistia em substratos e bactérias. As células bacterianas foram colhidas por centrifugação da cultura crescida de 24 h e foram ressuspensos em água destilada. A concentração de bactérias na suspensão foi de 109 células / mL.
Schwantes-Cezario et al (2017)	A solução de 105 esporos/ml de <i>B. Subtilis</i> AP91 foi obtida através do inóculo das bactérias no meio de cultivo LB (Luria-Bertani), considerando a agitação de 170 rpm e temperatura de 37°C durante 48 h. Após esse período, o meio foi centrifugado a 4000 rpm, com temperatura de 23°C durante 3 minutos, descartando-se o sobredrenante e repetindo o procedimento em solução tampão fosfato com pH de 7,2. A contagem das bactérias contou com espectofotômetro.
Shirakawa et al (2011)	Os autores testaram vários tipos de bactérias, sendo que três apresentaram resultado positivo e foram utilizadas para os testes quantitativos, sendo essas: <i>Lysinibacillus sphaericus</i> INQCS 414 (ATCC - American Type Culture Collection - 14577), <i>Bacillus subtilis</i> INQCS 328 (ATCC 23856) e <i>Pseudomonas putida</i> INQCS 113 (ATCC 15175).
Williams, Kirisits, Ferron, (2017)	Nesse estudo empregou-se bactéria do tipo <i>S. pasteurii</i> , alcalifílica e ureolítica, identificação ATCC (<i>American Type Culture Collection</i> , coleção americana de culturas, texto traduzido para português) – 6453. A bactéria foi cultivada em extrato de ureia-levedura, contendo 15,75 g / L de base Tris, 20 g / L de extrato de levedura e 10 g / L de uréia, e o pH foi ajustado para 9 com ácido clorídrico. A bactéria <i>S. pasteurii</i> foi cultivada em lote em meio UYE a 30°C com agitação. Controlou-se a absortância através de um espectrofotômetro BIO-TEK Synergy HT até atingir OD600 = 0,8. Então, as bactérias passaram por tratamentos que simulam as condições de sistemas cimentícios.
(ZHANG et al., 2017a)	Utilizou-se esporos de bactérias não-ureolíticas e alcalifílicas (<i>Bacillus cohnii</i>), e orgânicos compostos minerais. Depois de cultivada de acordo com (Jonkers et al., 2010) o valor de OD600 foi de até 0,4. A concentração dos esporos bacterianos foi de $3,6 \times 10^9$ cel /mL. As células vegetativas e os esporos foram repetidamente lavados em água destilada estéril e depois recolhidos antes de armazenar a 4°C antes dos testes. Para encapsulamento, foram utilizadas argila e perlita expandida (2 a 4 mm), impregnadas sob vácuo com a suspensão de esporos bacterianos preparados. Os agregados foram secos em forno à 45°C por 2 dias até constância de massa. Uma solução incluindo lactato de cálcio ($\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$, 8 g / L) e extrato de levedura (1 g / L) foi pulverizada sobre as partículas. Após este tratamento, as partículas foram ainda submetidas a 45 ° C em forno por 2 dias.

Fonte: elaborado pela autora

Um dos pontos que pode ser destacado da Tabela 9 é que devido aos inúmeros métodos de catalogação das soluções bacterianas, não há um padrão entre os estudos envolvendo a sua utilização. Além disso, pode-se pontuar a utilização da *Bacillus subtilis* como de comum ocorrência, mesmo que sob diferentes classificações.

Seifan, Samani e Berenjian (2016) apresentam a Tabela 10 com os tipos de bactérias já empregadas em estudos anteriores e as consequências de seu emprego.

Tabela 10 – Efeito da inserção de diferentes tipos de bactérias nas características de resistência à compressão, permeabilidade e absorção de água dos concretos

Microorganismo	Efeito na resistência à compressão	Efeito na durabilidade	
		Permeabilidade	Absorção de água
<i>Bacillus sphaericus</i>	N	P	-
<i>S.pasteurii</i>	P	-	P
<i>Bacillus cohnii</i>	P	-	-
<i>Bacillus pseudofirmus</i>	N	-	-
<i>Diaphorabacter nitroreducens</i>	N	-	-

Considerando N para efeito negativo e P para efeito positivo

Fonte: Seifan; Samani; Berenjian (2016, p.2598), texto traduzido para português

Como se percebe através da Tabela 10, as bactérias do tipo *S pasteurii* apresentaram impacto positivo ao aumentar a resistência à compressão e reduzir a absorção de água. Percebe-se benefício mecânico e possível ganho relacionado à durabilidade do material. Vijay, Murmu e Deo (2017) apresentam diferentes bactérias empregadas e seu impacto na resistência à compressão dos concretos, expondo a concentração das diferentes soluções bacterianas, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Soluções bacterianas (tipo e concentração) e impacto na resistência à compressão dos concretos

Bactéria utilizada	Resultados positivos percebidos	Concentração da solução bacteriana
<i>Bacillus</i> sp CT-5	Resistência à compressão 40% superior ao concreto de controle	5×10^4 células/ml
<i>Bacillus megaterium</i>	Alcançou acréscimo de 12% na resistência à compressão em concretos com 50MPa	3×10^6 UFC ³ /ml
<i>Bacillus subtilis</i>	Melhoria em 12% da resistência à compressão quando comparado com o concreto controle com agregados leves	$2,8 \times 10^8$ células /ml
<i>Bacillus aerius</i>	Acréscimo na resistência à compressão de 11,8% comparando com as amostras controle contendo 10% de cinza de casca de arroz	10^5 células/ml
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Acréscimo de 35% mais da amostra de controle	10^5 células/ml
AKKR5	10% de acréscimo na resistência	10^5 células/ml
<i>Shewanella species</i>	25% de acréscimo na resistência à compressão das amostras ao comparar com a referência	10^5 células/ml

Fonte: Vijay, Murmu e Deo (2017, p.1012), texto traduzido para português adaptado pela autora

³ UFC é uma unidade que considera unidades formadoras de colônia. Conforme Swanson, Petran e Hanlin (2001), nem todos os microrganismos existem na forma de células isoladas, mas também como aglomerados e grupos, os quais geram uma única colônia. Assim, a contagem de colônias não deve ser tomada como o valor absoluto do número de células, sendo utilizada a referida unidade de medida.

Como pode-se perceber, nenhuma das amostras apresentou redução na resistência à compressão do concreto, pelo contrário, proporcionando melhorias nessa propriedade. Em termos de concentração, percebe-se uma variação entre 10^5 células e $2,8 \times 10^8$ células/ml.

Essa faixa de variação foi citada por Sidiq, Gravina e Giustozzi (2019) considerando o uso de *B. subtilis*. Os autores apontam que concentrações menores, na ordem de 10^5 células/ml, proporcionaram os melhores resultados de ganho de resistência mecânica.

Além de analisar o efeito da adição de bactérias no concreto, Jonkers e Schlangen (2007) analisaram o impacto na adição de substratos orgânicos para o desenvolvimento das bactérias. Os resultados obtidos apontaram para a solução de Na-aspartato como a de menor danos às propriedades mecânicas do concreto, com redução de menos de 6%, e indicaram que não há viabilidade no emprego de Na-gluconato e Na-ascórbico, que conduziram a valores nulos de resistência à tração na flexão. Achal, Mukerjee e Sudhakara Reddy (2013) informam que a melhoria proporcionada pela adição das bactérias ultrapassa os benefícios mecânicos proporcionados, incluindo uma maior densidade da matriz, o que foi validado pelos autores diante de uma maior resistência a penetração de íons cloreto.

Conforme Luo, Qian e Li (2015), o desafio reside na sobrevivência destes organismos nas condições severas proporcionadas pelo concreto e seu ambiente de inserção. Vijay, Murmu e Deo (2017) informam que o impacto da utilização de soluções bacterianas em matrizes cimentícias é positivo. Os autores relatam que diversos estudos já apontaram para o ganho na resistência mecânica à compressão e um beneficiamento com redução da absorção de água, indicando uma maior compacidade da matriz.

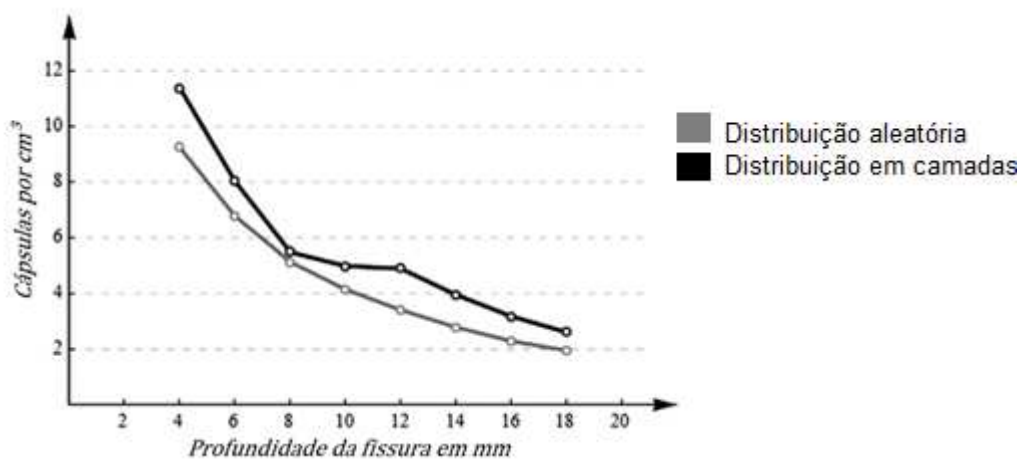
2.2.1.2.5 Autônomo- Encapsulamento de soluções químicas e biológicas em agregados leves

Dentre os diversos mecanismos de autocura do concreto, tem-se como uma opção encapsular as soluções químicas ou biológicas em envoltória proporcionada pelos agregados leves. De acordo com Jonkers (2011), o fenômeno ocorre pela substituição de agregados de dimensões reduzidas pelos agentes cicatrizantes encapsulados, com concentração próxima de 15 kg/m^3 de concreto. Sidiq, Gravina e

Giustozzi (2019) citam o uso de agregados leves como uma das técnicas mais empregadas para o encapsulamento de produtos de autorregeneração.

Milla et al., (2019) citam que uma das vantagens do uso de agentes para encapsulamento é o fato de ter-se proximidade dos agentes com o local de ocorrência da fissura, mesmo considerando que sua distribuição é aleatória na matriz. No que tange à disposição dos agregados na matriz do SHC, Zemskov, Jonkers e Vermolen (2011) desenvolveram dois modelos matemáticos que analisam as probabilidades de ruptura de cápsulas esféricas. Um deles assume que as cápsulas se dispõem em camadas e o segundo prevê uma distribuição aleatória. Na Figura 10 vê-se a relação encontrada pelos autores entre a densidade de cápsulas de raio 2 mm no material e a profundidade da fissura.

Figura 10 – Número projetado de cápsulas para 90% de probabilidade de uma fissura tocar alguma cápsula, para as disposições em camadas (preto) e aleatória (cinza)



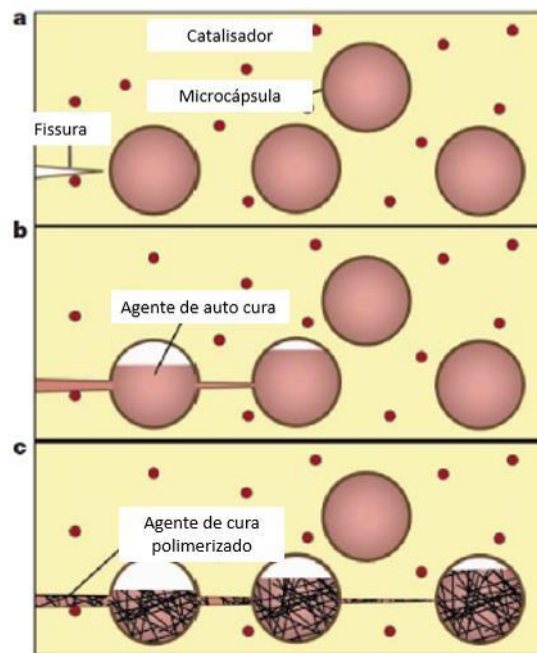
Fonte: Zemskov, Jonkers e Vermolen (2011, p. 3330), texto traduzido para português

Percebe-se que o modelo que prevê a dispersão aleatória exige um menor número de cápsulas. Assim, impacta menos a resistência à compressão, além de apresentar uma execução facilitada.

Em relação ao método de encapsulamento, Wiktor e Jonkers (2011) optaram pela inserção das bactérias envoltas em entorno de proteção, como nos agregados graúdos, tais como a argila expandida (AE). Tais materiais são saturados no vácuo, primeiramente em solução de lactato de cálcio ou outro nutriente, sendo na sequência realizada a suspensão de esporos bacterianos. Anteriormente a sua aplicação, tais agregados leves são submetidos a processos específicos de secagem e saturação.

Por mais que o encapsulamento possa ser vantajoso para assegurar a eficácia do processo, a substituição de agregados por AE, ou outros agregados leves, acarreta numa fragilização do concreto, uma vez que, devido a menor massa específica, tem-se uma diminuição da resistência à compressão. A fragilidade também pode ser percebida em outros agregados utilizados para encapsulamento, sendo necessário que a fissura consiga romper a barreira dos agregados empregados para liberação do agente autorregenerante (Figura 11).

Figura 11 – Mecanismo de cura autonômico com agente de cura encapsulado

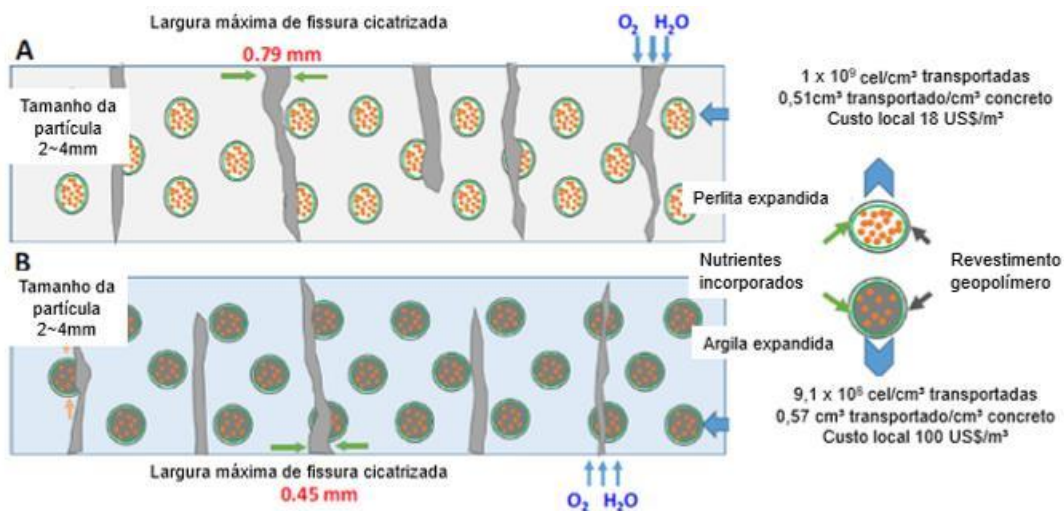


Fonte: White et al. (2001, p.1), texto traduzido para português

Conforme verifica-se na Figura 11, deve haver uma tensão na formação da fissura capaz de romper a parede do material de encapsulamento, liberando o agente recuperador no local da fissura. Para tal, deve haver compatibilidade entre a tensão aplicada e a tensão de ruptura do material utilizado como cápsula. Devido ao elevado teor de vazios, a tensão de ruptura dos agregados leves é reduzida, satisfazendo tal critério.

Ao analisar diferentes materiais para encapsulamento de soluções químicas, Zhang et al., (2017a) propuseram análise comparativa de perlita expandida (PE) e AE como agregados leves, como se observa na Figura 12.

Figura 12 – Comparação entre o encapsulamento com perlita expandida (a) e argila expandida (b)- agregados leves com agente químico autorregenerante

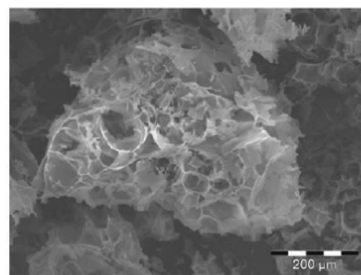


Fonte: Zhang et al., (2017, p.1), texto traduzido para português

Conforme a Figura 12, o encapsulamento com PE apresentou maior potencial na selagem de microfissuras (0,79 mm em relação a 0,45 mm), menor utilização de bactérias, custo 82% inferior no local de aplicação e maior transporte de células no interior do material, podendo significar maior eficácia na sua distribuição.

A perlita é uma rocha amorfa de silicato aluminato vulcânica que se expande rapidamente entre temperaturas de 900 e 1200°C. Estudos revelam que a utilização de PE em substituição aos agregados naturais afeta suas propriedades mecânicas, porém, quando aplicada como fíler, pode favorecer o concreto (RASHAD, 2016; RASHAD, 2018). Uma análise através da técnica de MEV ilustra a estrutura porosa de uma partícula de perlita expandida, Figura 13.

Figura 13 – Estrutura da perlita expandida verificada através da MEV

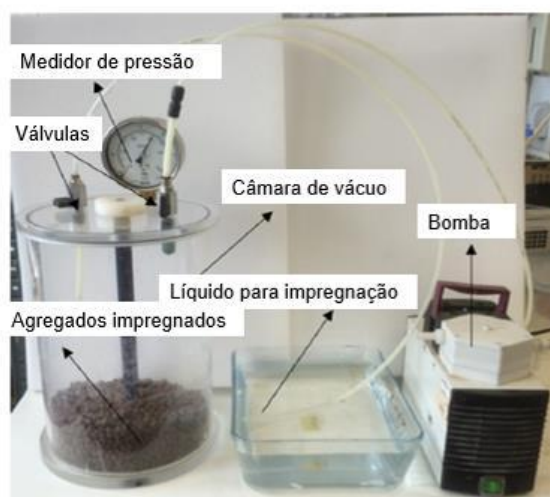


Fonte: Kramar e Bindiganavile (2013, P.206)

Alazhari et al. (2018) também validaram a técnica de encapsulamento de soluções bacterianas com agregados de PE em substituição ao convencional. De acordo com tais autores, houve eficácia na substituição com teor de 20%.

Alghamri, Kanellopoulos e Al-Tabbaa (2016) apresentaram dois métodos utilizados como procedimento prévio para encapsulamento de soluções químicas. Em um deles, houve a imersão dos agregados em solução com silicato de sódio. Para simples imersão, foram monitorados os períodos de 1, 2 e 3 dias, por medição em massa. No segundo método, os agregados leves foram impregnados utilizando-se câmara à vácuo com três saídas (vácuo, ventilação e medição) (Figura 14).

Figura 14 – Impregnação de agregados leves com câmara acrílica à vácuo



Fonte: Alghamri et al., (2016 p.3), texto traduzido para português

Segundo os autores, o procedimento pode ser sintetizado da seguinte forma:

- a) os agregados foram dispostos na câmara à vácuo, na qual foi aplicada pressão de 0,7 bar por uma hora;
- b) após, o silicato de sódio foi disposto sobre os agregados, e sobrepondo-os em pelo menos 20 mm para garantia de que todos ficassem imersos.

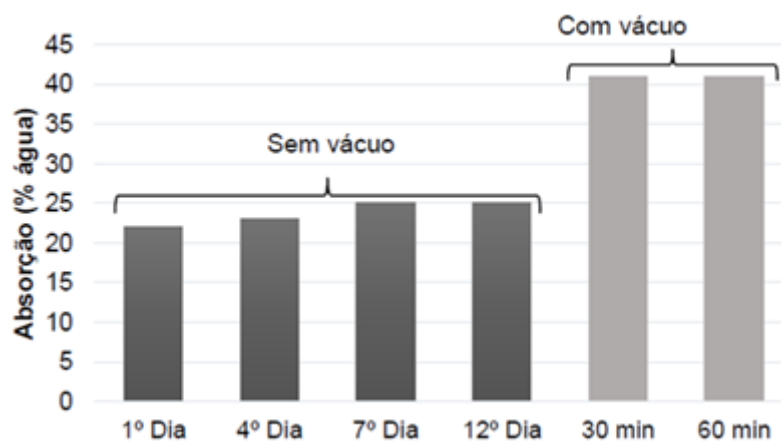
O procedimento foi mantido por 30 min e por 60min para análise de eficácia. Os autores observaram que, enquanto o procedimento de imersão apresentou após 3 dias a variação de 19% de massa dos agregados, o tratamento a vácuo com apenas 30 minutos culminou em acréscimo de 31% da massa. Não se percebeu benefícios na manutenção do procedimento de vácuo por 60 minutos em relação ao de 30 minutos.

Mors e Jonkers (2013) imergiram grãos de AE em água morna saturada com nutrientes e esporos bacterianos. Os autores avaliaram testes com 5g do agregado leve submersos por 15 e 30 minutos em 10ml de solução nutriente saturada (350g/L lactato de cálcio) em temperatura de 80°C. Após, os grãos foram secos, e lavados para remoção dos nutrientes superficiais. Para finalização, foram secos em estufa a 110°C. O procedimento executado pelos autores foi adaptado para uso em larga escala, sendo desenvolvido de acordo com os seguintes itens:

- a água de amassamento foi aquecida a 80°C com rotação constante de 22rpm anteriormente a adição dos nutrientes (350g/l de lactato de cálcio);
- a solução contendo esporos bacterianos foi dispersa por 2 minutos, antes da adição dos agregados (2kg);
- os agregados leves foram imersos em água por 30 minutos, drenados e aplicados úmidos na mistura de argamassa.

Através da Figura 15, os autores Sisomphon et al., (2011) compararam os procedimentos de impregnação com e sem a utilização de vácuo.

Figura 15 – Procedimentos de impregnação de agentes de autorregeneração com e sem vácuo, análise da absorção em percentual



Fonte: Sisomphon, K; Coporogl; Fraaij, (2011, p.17), texto traduzido para português

Conforme a Figura 15, há grande benefício ao utilizar-se equipamentos que possam impregnar a solução química através de vácuo. Ainda, pode-se conceber que, no procedimento de impregnação simples, sem vácuo, há pouca variação no percentual de água absorvida, com variação aproximada de 5% entre o 1º e o 12º dia. Ademais, comparando a solução simples com o emprego de vácuo tem-se um aumento de 15% no percentual absorvido. Avaliando somente as soluções com vácuo,

não se distingue o percentual absorvido com períodos de 30 e 60 minutos, concordando com o apresentado por Alghamri, Kanellopoulos e Al-tabbaa (2016).

Como pré-requisito para eficácia do processo, faz-se necessário que as cápsulas resistam à mistura do concreto, lançamento e moldagem de amostras ou elementos (ARAÚJO et al., 2018). Van tittelboom e De Belie (2013) afirmam que o formato esférico é mais propício a resistir a tais esforços, além de minimizar o impacto no empacotamento das partículas e na resistência mecânica do material.

Além do formato das partículas, tem-se a espessura da parede como fator de relevância, de modo que não ocorra ruptura prematura, devido a paredes finas, tampouco que haja bloqueio na liberação dos agentes de recuperação, causado por paredes muito espessas (GUPTA; KUA, 2016).

Como um dos procedimentos prévios, Sisomphon, Copuroglu e Fraaij (2011), ao adotar argila expandida (AE), optaram por revestir sua superfície com cimento. Os autores dispuseram o cimento em finas camadas, curadas, proporcionando maior resistência mecânica (Figura 16). Perceberam que a técnica contribuiu com a cicatrização e a qualidade do concreto, sendo que, durante a produção de fissuras, evidenciou-se a quebra da parede do agregado e seu revestimento em cimento.

Figura 16 – Encapsulação de argila expandida- tratamento superficial com cimento



a) AE Original

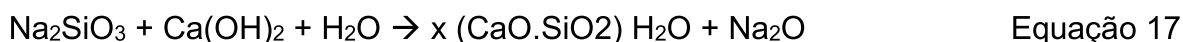
b) AE encapsulada com Cimento.

Fonte: Sisomphon, K; Coporoglu; Fraaij, (2011, p.18), texto traduzido para português

Zhang et al. (2017) também perceberam a necessidade de proteção da envoltória dos agregados utilizados para encapsulamento, destacando que a proteção visa evitar que a água na mistura de concreto dissolva os nutrientes e possa reduzir a absorção de água das partículas. Em seu estudo, no qual utilizaram AE e PE, aplicou-se na superfície dos agregados um revestimento de geopolímero usando um pulverizador de bico de alta pressão. Os revestimentos foram produzidos a partir de

uma mistura em igual proporção de metacaulim e solução de silicato de sódio (15% em massa de concentração). A relação solução / metacaulim foi de 1,0.

Em termos do produto químico a ser encapsulado, algumas pesquisas apontam para a utilização de silicato de sódio. A reação decorrente da sua utilização é apresentada na equação 17 (GIANNAROS; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; MANOJ PRABAHAR et al., 2017).



Os autores citam que a reação entre o silicato de sódio e o hidróxido de cálcio na presença de água proporciona a formação de gel de C-S-H, sendo tais cristais responsáveis pela cicatrização das fissuras.

2.2.1.2.6 Autônomo através do uso de polímeros superabsorventes

Os polímeros superabsorventes (PSA) possuem elevada capacidade de absorção, permitindo a infiltração de um líquido de seu ambiente de inserção com valor de até 500x sua massa. Sua utilização inicial envolveu a mitigação da fissuração autógena, porém, atualmente, tem-se percebido seu potencial de autorregeneração (SNOECK et al., 2016). Tsuji, Shitama e Isobe (1999) afirmam que três são as razões para utilização destes materiais:

- (a) aplicação para cura interna do concreto - imersão saturada dos polímeros para cura do interior para exterior;
- (b) aplicação para prevenção de fissura causada pelo endurecimento inicial do concreto;
- (c) para evitar o vazamento de água através da fissuração.

Segundo Snoeck et al., (2016), quando a fissura ocorre e os polímeros entram em contato com o ambiente exterior, acabam por absorver a umidade, aumentando seu volume e selando as fissuras. Snoeck et al., (2016) utilizaram fibras de PVA (acetato de polivinila) como PSA para desenvolver SHC. O percentual de utilização desse estudo foi de 1% de substituição em massa pelo cimento total da mistura. Os autores verificaram que as amostras contendo PSA apresentaram menor permeabilidade e menor absorção de água por capilaridade.

Lee, Wong e Buenfeld (2016) perceberam, após uma fissura padrão, que a utilização do polímero de poliacrilato-co-acrilamida apresentou resultados melhores do que o polímero poliacrilato. Além disso, indicam que a maior granulometria dos polímeros conduziu a um melhor desempenho em materiais cimentícios. Gruyaert et al., (2014) citam que, ainda que exista esse potencial para autorregeneração, o uso de PSA apresenta uma desvantagem: há uma elevada absorção de água enquanto o concreto ainda está sendo misturado, o que acaba por conduzir a um aumento no volume dos macroporos após o endurecimento do material. Fissuras de maiores dimensões ou macroporos podem reduzir a eficácia da cicatrização. Há de ser considerado que o potencial de autorregeneração do material pode ser influenciado pela alcalinidade e o conteúdo iônico do seu ambiente de inserção. (LEE; WONG; BUENFELD, 2016).

2.2.1.2.7 Autônomo através de redes vasculares

Pesquisas como as de Li, Lim e Chan (1998) têm avaliado o uso de vidro como material de encapsulamento de produtos autorregenerantes. O material possui propriedades desejáveis para a autocura: tem ruptura facilitada por ter comportamento frágil e não reage quimicamente com matrizes cimentícias, tampouco com os químicos alusivos a autocura (MINNEBO; HEMELRIJCK, 2015).

De acordo com Minnebo et al., (2017), estudos diversos já tiveram como objeto o uso de cápsulas de vidro tubulares e curtas. Os autores apontam, no entanto, que deve-se atentar para as desvantagens: o vidro pode fomentar as reações álcali-sílica, pode sofrer deterioração no ambiente do concreto, além de sofrer ação do adensamento e compactação do concreto.

A ideia de uso do sistema é a atuação em múltiplos fenômenos de cicatrização, atuando de modo análogo ao sistema de vasos sanguíneos, com canais diversos através dos quais pode ocorrer a cicatrização (MINNEBO et al., 2017; TRASK; WILLIAMS; BOND, 2007) A outra vantagem é sua possibilidade de contato com o exterior da estrutura, possibilitando o enchimento do agente de cura após o seu consumo, como apresenta a Figura 17.

Figura 17 – Sistema de conexão - disposição dos microvasos ao longo do elemento de concreto



Fonte: Davies et al., (2015, p.3), texto traduzido para português

Van Tittelboom et al., (2016) analisaram comparativamente a utilização de redes por microvasos de vidro e o uso de PSA, ambos utilizando o mesmo agente de cicatrização, não discriminado no estudo. Concluíram que a utilização de PSA é mais vantajosa, uma vez que o preparo prévio é menor do que no sistema vascular, além de tal sistema ter apresentado resultados superiores em termos de cicatrização. Os autores destacaram como desvantagem, a questão da disposição dos vasculares, tendo sido dispostos manualmente em seu estudo, o que não é uma possibilidade para uso industrial e em larga escala para produção de elementos estruturais.

Hu et al., (2018) avaliaram a utilização de poliuretano em sistema vascular, percebendo que, após 48h da formação da fissura, seu percentual de regeneração era de 75%. Além disso, identificaram que o espalhamento do agente regenerante após ruptura dos microvidros ocorreu de modo uniforme, através de verificação por Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Araújo et al., (2018) avaliaram a utilização de polimetacrilato de metila (PMMA) em substituição as redes de microvasos de vidro comumente empregados. As amostras contendo PMMA apresentaram potencial de cicatrização inferior, devido a sua distribuição na matriz, segundo os autores. Todavia, não são suscetíveis à reação álcali-sílica, dano que os microvasos de vidro podem sofrer.

2.2.1.2.8 Aditivos químicos para concreto - Catalisadores cristalinos

De acordo com Takagi (2013), catalisadores cristalinos atuam de modo a proporcionar melhorias na colmatação natural dos poros do concreto. O fenômeno

que rege a autorregeneração causada por esse material pode ser sintetizado nos seguintes passos:

- a ocorrência de fissura possibilita a penetração de água;
- a água no interior do elemento estrutural ativa o catalisador cristalino;
- a ativação do catalisador proporciona as faces internas da fissura uma superfície formada por cimentos sub-hidratados e pozolanas não ativadas, como a EAF;
- o catalisador eleva a alcalinidade da água, proporcionando ambiente propício para a formação de produtos hidratados estáveis, colmatando os vazios originados nas fissuras.

Cristalizadores cristalinos são compostos de sílica ativa e compostos químicos. Tais componentes químicos reagem com o Ca(OH)_2 formando produtos cristalinos que são capazes de preencher os espaços vazios deixados pelas fissuras (TAKAGI et al., 2018).

Takagi, Lima e Helene (2012) avaliaram diferentes composições de cimentos brasileiros com o uso de catalisadores cristalinos diante de cargas aplicadas. Os autores perceberam que a formação de uma microfissura alterou a microestrutura do concreto, conduzindo a uma redução na resistência à compressão, de até 18,9%. Percebeu-se, no entanto, após 56 dias, uma recuperação de 99% em relação aos corpos de prova ilesos para concretos com ativadores cristalinos e 92% para concretos sem tais ativadores.

O estudo desenvolvido por Ahn e Kishi (2010) avaliou três métodos diferentes de autorregeneração dos concretos: agentes expansivos, geo-materiais e agentes químicos, que se relacionam com os fenômenos de expansão, inchamento e precipitação mineral, respectivamente. Os autores verificaram que os agentes químicos e as adições minerais afetaram significativamente a formação de produtos de reidratação, assim como a sua velocidade.

Mirelen (2016) avaliou a utilização de aditivo redutor permeabilidade em diversas amostras, constituídas com o uso de 4 tipos de cimento nacional. Em termos de cicatrização, a autora percebeu que houve redução de até 44% na redução de penetração de água, indicando um benefício no uso do aditivo. Não houve mudanças significativas em termos de resistência mecânica, que foi de até 80%.

2.2.1.3 Lacunas identificadas na técnica

A Tabela 12 oriunda de Li e Herbert (2012), apresenta as lacunas no desenvolvimento e estudos de diferentes mecanismos de autocura.

Tabela 12 – Estudos já desenvolvidos nas diferentes técnicas de autorregeneração

Característica	Encapsulamento químico	Encapsulamento de bactéria	Misturas minerais	Químico em tubos de vidro	Cura intrínseca com controle da fissura
Validade	Potencial de longa vida útil, dependente do químico encapsulado	Testes apontaram esporos que resistem por 6 meses	Longa vida útil, considerando que as pozolanas permanecem sem atividade e não hidratadas	Potencial de longa vida, dependendo do agente químico	Longa vida útil sem a utilização de aditivos nos compósitos cimentícios avançados
Penetração	Há, cápsulas dispersas na matriz podem impactar no concreto	Há, cápsulas dispersas na matriz podem impactar no concreto	Há, pois os componentes minerais se dispersam uniformemente no concreto	Não há, pois os tubos devem ser dispostos em locais estratégicos para formação de fissuras	Há, pois o controle intrínseco ocorre em qualquer ponto da estrutura ou orientação das fissuras
Qualidade	Há necessidade de verificar as propriedades mecânicas, autorregeneração deve ser investigadas	Verificação completa da autorregeneração, pouca recuperação mecânica	Verificação completa da autorregeneração, recuperação mecânica não avaliada	Autorregeneração e recuperação mecânica, mas não 100% eficiente	Autorregeneração e recuperação mecânica, 100% eficiente
Confiabilidade	Não há dados suficientes para atestar sua confiabilidade	Não há dados suficientes para atestar sua confiabilidade	Não há dados suficientes para atestar sua confiabilidade	Não há dados suficientes para atestar sua confiabilidade	Não há dados suficientes para atestar sua confiabilidade
Versatilidade	Há, o mecanismo de recuperação é independente das condições externas	Atualmente ainda depende da presença de água contínua	Atualmente ainda depende da presença de água contínua	Há, o mecanismo de recuperação é independente das condições externas	Há, verificou-se viabilidade em condições diversas de exposição
Repetitividade	Nenhum estudo foi conduzido avaliando mais de um ciclo de carga	Nenhum estudo foi conduzido avaliando mais de um ciclo de carga	Nenhum estudo foi conduzido avaliando mais de um ciclo de carga	Não pode ser repetido	Verificada recuperação parcial na rigidez com mais de um ciclo de carga

Fonte: Li e Herbert (2012, p.214), texto traduzido para português

Conforme o destaque apontado na Tabela 12 percebe-se que nos diferentes mecanismos a lacuna comum e a confiabilidade de ocorrência da regeneração, o que decorre da realização predominante de pesquisas laboratoriais, sem envolver a inserção real das estruturas de concreto.

Ainda, uma das necessidades verificadas ao se estudar as técnicas reside na minimização dos gastos na produção dos agentes cicatrizantes. Para viabilizar seu emprego em larga escala e em estruturas de dimensões relevantes, deve-se reduzir perdas, contar com dimensionamento preciso e, se possível, reduzir o uso de processos complexos, como aquecimentos, resfriamentos e aplicação de vácuo. Ainda, ao avaliar os danos no desempenho do concreto, estes agentes limitam a possibilidade de aplicação em construções nas quais a estanqueidade à água e altas resistências à compressão são necessárias. Por consequência, o desenvolvimento de um agente cicatrizante mais eficiente e econômico poderia ampliar o alcance de potenciais aplicações (ADAK, 2015).

No caso do uso de agentes cicatrizantes e não de mecanismos autônomos, a maior parte dos custos extras provém do lactato de cálcio, que é caro e é empregado como nutriente para as bactérias. O processo de encapsulamento das bactérias e dos nutrientes é também altamente custoso, pois envolve uma técnica a vácuo (ADAK, 2015). Ao considerar os outros mecanismos disponíveis, também há custos relacionados a compra dos insumos, como cimentos e pozolanas, ou das soluções químicas. A rede vascular, como já citado, apresenta necessidade de preparo inviável para aplicação em estruturas reais (VAN TITTELBOOM et al., 2016).

A Tabela 13 complementa o já apresentado, identificando as vantagens e desvantagens residentes em cada método de autorrecuperação.

Tabela 13 – Comparação de diferentes estratégias de autorrecuperação, vantagens e desvantagens

Estratégia/método	Vantagens	Desvantagens
Encapsulamento agente externo	1. Agente de autocura liberado de acordo com a necessidade	1. Dificuldade na moldagem
	2. Grande quantidade ajustável de agente de autocura	2. Efeito negativo no que tange a resistência mecânica se utilizados muitos materiais fibrosos e com vazios
	3. Tem possível eficácia diante de eventos múltiplos de danificação	
Encapsulamento agente interno	1. Agente de autocura liberado de acordo com a necessidade	1. Dificuldade na moldagem
		2. Efeito negativo no que tange a resistência mecânica se utilizados muitos materiais fibrosos e com vazios
		3. Possível dificuldade de liberação do agente de reparo
Microcapsulas	1. Agente de autocura liberado de acordo com a necessidade	1. Dificuldade de preparo das capsulas e moldagem do concreto
	2. Responde a várias danificações	2. Quantidade limitada de agentes expansivos
	3. Tem possível eficácia diante de eventos múltiplos de danificação	3. Preocupação em relação a argamassa e o concreto e a sua adesão com as cápsulas

		4. Efeito negativo no que tange a resistência mecânica se utilizados muitos materiais fibrosos e com vazios
Pozolanas e agentes minerais expansivos	1. Boa eficiência na autorregeneração	1. Expansão não desejada se não tratado 2. Não há garantia da formação dos produtos de autorregeneração quando necessários
	2. Boa compatibilidade com os componentes da matriz cimentícia para regeneração do concreto	3. Efeito negativo no que tange a resistência mecânica se utilizados muitos materiais fibrosos e com vazios (continuação)
(Bactéria)	1. Componentes baseados em atividades biológicas, sem gerar resíduos ou impacto	1. Vários pré-requisitos a serem satisfeitos; 2. Devem ser tomadas medidas para preservação das bactérias no interior do concreto 3. Recuperação das propriedades mecânicas deve ser avaliada quando com múltiplos eventos
Materiais com memória de forma	1. Fissuras de maior dimensão podem ser recuperadas	1. Custo elevado
	2. Elevado percentual de recuperação das propriedades mecânicas	2. Pode ser necessário aquecimento para a estimular a autorregeneração
	3. Tem possível eficácia diante de eventos múltiplos de danificação	

Fonte: Wu; Johansson; Geiker (2012, p.579), texto traduzido para português

Como percebe-se, diversas são as estratégias de desenvolvimento de SHC analisadas pela bibliografia. Para finalizar a relação das lacunas apontadas nos estudos, Mullem et al., (2019) citam os seguintes aspectos (a) a variação que ocorre ao se avaliar o método da abertura de fissuras variável entre as amostras; (b) a falta de um método padronizado para analisar a redução da permeabilidade e (c) a necessidade de usar uma mesma amostra ao longo do tempo, evitando as variações inerentes a matrizes cimentícias.

2.2.2 Influência do ambiente de inserção das estruturas: ambientes com a presença de cloretos e dióxido de carbono

In et al. (2013b) afirmam que o ambiente marinho, de vasta extensão no território brasileiro, proporciona todas as características necessárias para que a autorreparação do concreto possa ocorrer. Seifan; Samani; Berenjian (2016) complementam, ao afirmar que o mecanismo de autorregeneração depende fortemente de fatores como a presença de água, além dos itens requeridos para cada um dos métodos autorregenerantes.

Palin, Wiktor e Jonkers (2013) avaliaram a cura de amostras de concreto autorregenerante com o uso de pozolanas, considerando sua imersão em água potável e em água marinha (desenvolvida em laboratório). Verificou-se nesse estudo que os concretos curados em água potável apresentaram recuperação de 10 μm , enquanto os curados em água salgada produziram camada de recuperação de 50 μm . Os autores afirmam que a maior espessura referente à água salgada pode ser atribuída ao uso de Mg^{2+} utilizado na água do mar sintética, inibindo a calcita mais termodinamicamente estável e permitindo formar a aragonita, podendo esse resultado ser diferente em aplicações reais.

Conforme já citado, Achal, Mukrjee e Sudhakara Reddy (2013) perceberam que o uso de soluções bacterianas proporcionou menor penetração de Cl^- no concreto, alterando de um nível moderado para muito baixo, o que corrobora como um aspecto positivo para sua utilização nas zonas contendo névoa salina, uma vez que, pode beneficiar o concreto mesmo antes ou se não houver a formação de fissura.

Ao considerar ambientes com a presença de CO_2 , afirma-se que a reação da carbonatação reduz o pH do concreto, tornando-o menos alcalino. Há benefícios no que tange o crescimento e a sobrevivência das bactérias, dado que, Parida et al., (2012) informam que a alcalinidade característica das estruturas de concreto pode ser uma barreira ao crescimento de bactérias e as funções de dissociação e solubilização de várias moléculas na enzima bacteriana. Em contraponto, deve haver sobrevivência pelo menos por certo período, até que o efeito do CO_2 atue na estrutura. Seifan, Samani e Berenjjan (2016) reforçam o apresentado, enfatizando que a própria carbonatação já contribuiu com potencial de regeneração dos concretos.

Também considerando ambientes com elevada concentração de CO_2 , Kalhori e Bagherpour (2017) afirmam que o uso de SHC é de suma importância para redução das microfissuras em túneis rodoviários, mitigando a ocorrência da carbonatação do concreto.

Yildirim et al., (2018) propuseram estudos após o envelhecimento de amostras de compósitos cimentícios avançados por um ano. Após, as amostras sofreram fissuração por ensaio de tração em amostras cilíndricas, contando com imersão em água, imersão em água contendo CO_2 e cura ao ar atmosférico, também contendo CO_2 . Segundo os autores, a melhor opção de cura é a água contendo CO_2 , apresentando capacidade de recuperação total de fissuras no período de 90 dias.

Evidencia-se assim, que os ambientes reais de inserção das estruturas de abrangência na norma brasileira podem apresentar potencial para a ocorrência do fenômeno.

Em relação ao ambiente proporcionado no interior do concreto, Williams, Kirsits e Ferron (2017) avaliaram quais os parâmetros de influência no interior das estruturas de concreto. Os autores optaram por avaliar as situações de ausência de nutrientes, ação do calor e ambiente alcalino, decorrente do pH elevado das estruturas de concreto armado. Os resultados obtidos apontaram para a temperatura e o ambiente alcalino - mesmo que em pequenos períodos de exposição - como as principais desvantagens para o desenvolvimento das bactérias.

Boquet et al., (1973) apud Erşan, De Belie e Boon (2015) afirmam que as bactérias produzem um ambiente de pH adequado para a produção de CaCO_3 . De acordo com Madigan et al., (2016), no entanto, muitos microorganismos são difíceis ou até impossíveis de reproduzir, dada a peculiaridade de suas exigências em termos de ambiente de inserção. Pereira, Campos e Monterani (2009) pontuam que há uma preponderância das bactérias que tem seu desenvolvimento ocorrendo em relação a uma faixa de pH entre 6,5 e 7,5. Há níveis de variação para diferentes tipos de bactérias, que podem incluir faixas de 4 a 9. Neto (2016) divide as bactérias em três grupos:

- bactérias acidófilas: se desenvolvem com pH entre 0 e 6,5 (pH considerado ácido);
- bactérias neutrófilas = tem desenvolvimento em uma faixa de pH entre 6,5 e 7,4 (pH entre o levemente ácido, neutro e levemente alcalino);
- bactérias alcalófilas = se fortalecem em ambientes que contenham pH entre 7,5 e 14 (pH alcalino).

De acordo com Ingraham e Ingraham (2010), as bactérias basófilas se desenvolvem bem em ambientes ou meio de cultura básicos, como as estruturas de concreto armado. Ao considerar o ambiente alcalino proporcionado pelo concreto, tem-se de optar pelo uso de bactérias alcalófilas para garantia de sucesso em sua utilização. A exposição do concreto ao CO_2 poderá, no entanto, atuar na redução desse pH, tornando-o mais neutro.

2.2.3 Ensaio e técnicas de laboratório para provocação de fissuras e verificação de eficácia da autorregeneração do concreto

Neste item seguem apresentadas as técnicas utilizadas em outros estudos tanto para a produção de fissuras, quanto referente a ensaios para verificação da eficácia dos métodos.

2.2.3.1 Ensaio e técnicas para indução de fissuras

Diversos são os mecanismos e técnicas que podem ser aplicados para a indução de fissuras e posterior verificação da eficácia dos SHC. A técnica utilizada influenciará na área e configuração das fissuras, como a orientação, distribuição no elemento estrutural e dimensão. A seguir, são apresentadas as características dos ensaios e demais técnicas para indução de fissuras.

2.2.3.1.1 Ensaio mecânicos

Segundo Ferrara et al., (2018), dentre as técnicas, destacam-se os mecanismos de aplicação de cargas, induzindo as fissuras. Os autores informam, no entanto, que existem diferenciações no que tange as características da matriz e a possibilidade de emprego de um ensaio, conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Ensaio para indução de fissuras baseados no tipo da matriz de concreto

Tipo de ensaio	Concreto armado	Concreto reforçado com fibras	Concreto têxtil	Concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras
Compressão	Comum	Possível	Possível	Possível
Tração direta	Muito raramente empregado	Possível, mas não empregado comumente	Comum, devido à elevada resistência à deformação o material tende a apresentar múltiplas fissuras	Comum, devido à elevada resistência à deformação o material tende a apresentar múltiplas fissuras
Tração por compressão diametral	Comum. Se a espessura da fissura for controlada, medidas especiais devem ser tomadas	Comum	Possível	Possível
Ensaio de tração na flexão com 3 ou 4 pontos	Comum, porém, pode exigir uso de armadura de	Comum	Tração na flexão com 4 pontos é mais comum. Permite a formação de múltiplas	Tração na flexão com 4 pontos é mais comum. Permite a formação de múltiplas fissuras na

	aço para estabilização da fissura		fissuras na parte central da amostra	parte central da amostra
Pré deslizamento entre fibra e matriz	Não se aplica	Comum	Comum	Possível

Diz-se comum de um ensaio encontrado com frequência em fontes de pesquisa

Fonte: Ferrara et al., (2018, p.118), texto traduzido para português

Conforme percebe-se, dependendo do tipo de matriz, tem-se os ensaios de aplicação mais adequada. Para ensaios de concreto armado, tem-se como mais comuns os ensaios de tração direita, tração na flexão e compressão. De acordo com Yildirim et al., (2018) em amostras de compósitos cimentícios avançados foi utilizada 70% da tensão máxima de tração para a confecção de fissuras em amostras cilíndricas, sendo o percentual de tensão variável também de acordo com a matriz.

Cabe destacar ainda que o concreto simples possui ruptura frágil, com pequenas deformações (MEHTA; MONTEIRO, 2014), e assim, pode não apresentar a formação de fissuras no decorrer do ensaio de tração na flexão. Diante disso, nesse ensaio em específico, pode ser adotada a estratégia de inserção de barra de aço, de modo que exista uma resistência aos esforços de tração, suportando maiores deformações e formando fissuração. Alyousif (2016) afirma que, normalmente, adota-se o ensaio de tração na flexão pela complexidade na realização do ensaio de tração direta. Todavia, através do ensaio de tração direta, forma-se um número maior de fissuras a ser observada em um mesmo corpo de prova.

Cappellesso et al., (2016) citam que utilizaram procedimento adaptado em relação ao prescrito pela NBR 12142 (ABNT, 2010). Segundo os autores, aplicou-se a carga para geração de uma fissura e não para rompimento da amostra. Para tal, a carga do ensaio foi de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, sem choques, sendo mantido o carregamento até perceber-se uma queda na aplicação da força, indicativa de abertura de fissura. Dessa forma, tem-se o monitoramento em cada corpo de prova, adotando-se diferentes espessuras de fissura.

2.2.3.1.2 Aberturas com disposição de juntas

Alguns estudos relatam a utilização de elementos para produção das fissuras, posicionados ainda no estado fresco, geralmente em protótipos de vigas.

Krishnapriya, Venkatesh e Babu (2015) contaram com placa fina de cobre, com menos de 0,3 mm de espessura, e profundidade de 10 mm. Com uso desse método, foi possível limitar a espessura e o local de ocorrência da fissura, sem variações entre diferentes amostras e matrizes propostas.

Em estudo avaliando o efeito de fissuras em argamassas, no que tange a absorção de água, Van Belleghem et al.,(2016) optaram pela fissuração através de placas de alumínio com espessura de 0,3 mm. Essas placas foram posicionadas em hastes de aço nos moldes, para que a profundidade da fissura fosse controlada no valor de 20 mm, simulando o cobrimento nominal de estruturas de concreto (Figura 18). Após o posicionamento das placas, a argamassa foi lançada nos moldes. Após 24horas as placas foram removidas, tendo a fissura uma espessura definida.

Figura 18 – Dispositivo com placas metálicas para a produção de fissuras no estado fresco

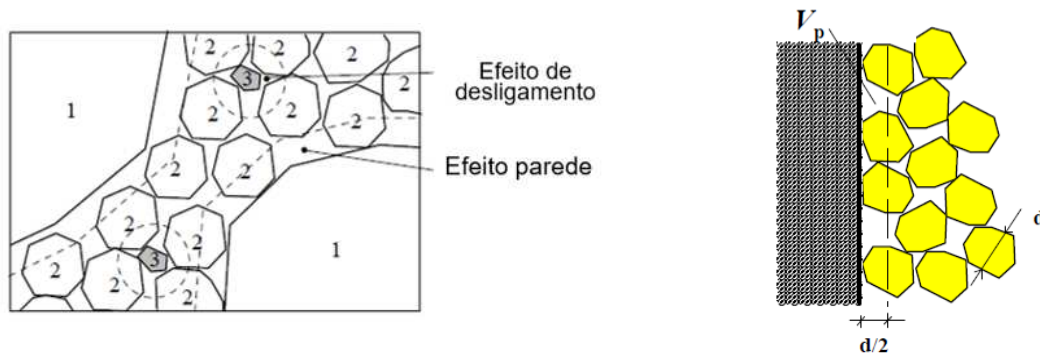


Fonte: Van Belleghem et al., (2016, p.2)

A disposição de placas ou outros objetos no concreto, no entanto, pode alterar a compactação e a distribuição do material ao longo de uma amostra. Tal alteração pode conduzir a formação de zona com maior presença de vazios ou de água, sendo considerado, nesse caso, o efeito parede⁴, também presente no perímetro das formas no lançamento do concreto (Figura 19).

⁴ Conforme Mangulkar e Jamkar (2013, p.144, texto traduzido para português) “Quando um agregado graúdo se encontra isolado da matriz e consequentemente dos agregados miúdos, há perturbação do empacotamento dos agregados miúdos. Nesta região, aumenta-se o vazio no entorno das partículas do agregado miúdo, sendo tal efeito conhecido como efeito parede”

Figura 19 – Efeito parede em elementos de concreto



Fonte: De Larrard (2009, p.2; p.4)

De acordo com De Larrard (2009), o efeito parede é verificado nas extremidades de volume de concreto e é geralmente causado pelos vazios entre agregados graúdos. O autor expõe que tal efeito causa uma zona perturbada (V_p), ou afetada pela menor presença de agregados miúdos e menor densidade na matriz.

2.2.3.1.3 Aberturas pela ação do calor

Estruturas de concreto corriqueiramente apresentam retração durante o processo de hidratação do cimento, devido a sua variação volumétrica. Na ação do calor, tem-se a potencialização desse efeito, ampliando a retração pela perda acelerada de água do concreto. Tal fenômeno ocorre em maior proporção em estruturas massivas, como já citado no capítulo 2.1.1 (KLEMCZAK, 2014).

De acordo com Klemczak e Knoppik-Wróbel, (2011), nas idades iniciais, a fissuração pode ser causada por dois motivos: retração por secagem e variação de temperatura decorrente do processo de hidratação. As fissuras causadas pela ação do calor possuem configuração aleatória, não se apresentando com orientação definida do elemento estrutural. A retração por secagem ocorre após o endurecimento inicial, de acordo com a perda de água no interior, quando o ambiente tem umidade inferior a 100%, e ainda, de acordo com a temperatura em que as amostras estão submetidas.

Morales, Campos e Faganello, (2011) afirmam que, com reduzidos gradientes de temperatura, quando o concreto é aquecido lentamente, a condutividade térmica do material pode garantir que não ocorrerão grandes danos, devido à pequena variação térmica. Nesse cenário, podem ser necessárias elevadas temperaturas para

fissuração. Em termos de criação de fissuras propositalmente pela ação do calor, Khoury (1992) afirma que com temperaturas aproximadas a 300°C tem-se o aumento da porosidade e o surgimento de microfissuras. Zhang e Davie (2013) afirmam que, entre os inúmeros efeitos que podem surgir no concreto em elevadas temperaturas, tem-se a expansão de seu esqueleto rígido, causado pela dilatação do material.

2.2.3.1.4 Aberturas após endurecimento do concreto

Além da possibilidade de dispor materiais durante o estado fresco em corpos de prova de concreto ou argamassa para a garantia da fissura, estudos como os de Hilloulin et al., (2016b) produziram um corte nas amostras para, em região definida, acompanhar a eficácia de criação do fenômeno de autocura. De acordo com os autores, a fissura aberta foi de 15 mm de extensão e 5 mm de largura no centro de todas as amostras. Após esse procedimento, as amostras foram curadas submersas por 3 dias (grupo A) e 18 dias (grupo B). Os autores realizaram ainda o ensaio de tração na flexão, provocando fissuras na parte inferior das amostras. Devido a elevada abertura percebeu-se apenas formação de produto no interior da fissura.

A abertura da fissura após o endurecimento exige a aplicação de um esforço mecânico sobre a amostra, o que pode danificar a estrutura ao seu redor, fragilizando o concreto. Tal método faz com que o interior das fissuras não apresente irregularidades, o que pode dificultar a aderência dos produtos de regeneração. Al-Tabbaa et al., (2019) relataram a influência de superfícies de parede irregulares e com presença de água para promoção da regeneração.

2.2.3.2 Avaliação da eficácia dos SHC

De acordo com Tang, Kardani e Cui (2015), diversas são as maneiras de análise da eficácia da autorregeneração do concreto. Segundo os autores, os métodos abordam a visualização e quantificação do reparo e a recuperação da resistência mecânica. Para análise de um ponto específico, podem ser empregadas ferramentas gráficas avançadas combinadas a ensaios de diagnóstico.

Ferrara et al., (2018) listam alguns parâmetros de suma importância para análise da eficácia dos concretos, sendo estes:

- a abertura inicial da fissura e sua idade;

- as condições de cura durante o período de cicatrização e sua duração;
- a presença de carga atuante durante a cicatrização;
- a repetibilidade da fissuração e a eficácia do concreto diante de múltiplos fenômenos.

Gupta, Pang e Kua (2017) sintetizam, através da Tabela 15, os testes utilizados para verificação do potencial de cicatrização.

Tabela 15 – Testes utilizados para avaliar a cicatrização e recuperação das propriedades mecânicas e de durabilidade após a cicatrização

Tipo	Teste	Propósito	Limitações
Visualização e determinação	Microscopia Eletrônica de Varredura	Visualização do cristal depositado para cicatrização e liberação do agente cicatrizante em cápsulas inteligentes.	A precisão e a visualização da imagem dependem de onde a imagem é tirada e a resolução escolhida. Pode não capturar a uniformidade de deposição.
	Análise por infravermelho	Determinação de produtos precipitados.	Presença de umidade no concreto pode afetar a precisão infravermelha. É adequado apenas para ver componentes proeminentes e, portanto, pequenas deposições podem não ser discerníveis (Ramachandran e Beaudoin 2000).
	Microscopia Eletrônica de Varredura Ambiental	Visualização de ruptura de cápsulas embutidas.	Pressão muito baixa que deve ser mantida, pode alterar a microestrutura do concreto desidratando-o.
	Microscopia óptica com análise de imagem	Visualização do depósito de cristais e taxa de cicatrização.	Depende da resolução do microscópio óptico, que pode ser limitado pela seção fina.
Recuperação de impermeabilidade à água e ao ar (características de durabilidade)	Permeabilidade à água (baixa e alta pressão)	O coeficiente de permeabilidade da água pode ser determinado pelo fluxo de água através de fissuras curadas.	A eficácia depende de como as rachaduras foram introduzidas.
	Permeabilidade ao ar	A taxa de fluxo de ar após a cura, mede a resistência contra a penetração de umidade / substâncias estranhas através de rachaduras curadas	Muito sensível à composição da amostra.
	Difusão de Cloreto	Medição de resistência contra a penetração de cloretos. Relevante e aplicável a estruturas costeiras.	-
Recuperação de propriedades mecânicas	Teste de compressão e teste de tração	Mede a recuperação da força devido à autocura.	Fortemente influenciado pelo teor de umidade, tamanho e cura das amostras.
	Teste de flexão (três pontos e quatro pontos)	-	Os resultados da frequência de ressonância são afetados pelo tamanho e efeito geométrico da amostra. (Waiching et al. 2015).
	Análise de frequência de ressonância	Medição de recuperação de rigidez.	-
Recuperação de propriedades mecânicas	Análise de emissão acústica	Sinais de sensores que são anexados à superfície são capturados e analisados para detectar a quebra da cápsula e recuperar a energia.	Sensível à qualidade do ruído ambiental e do sinal. (Huang et al. 1998).

Fonte: Gupta; Kua, (2016, p.10), texto traduzido para português, adaptado.

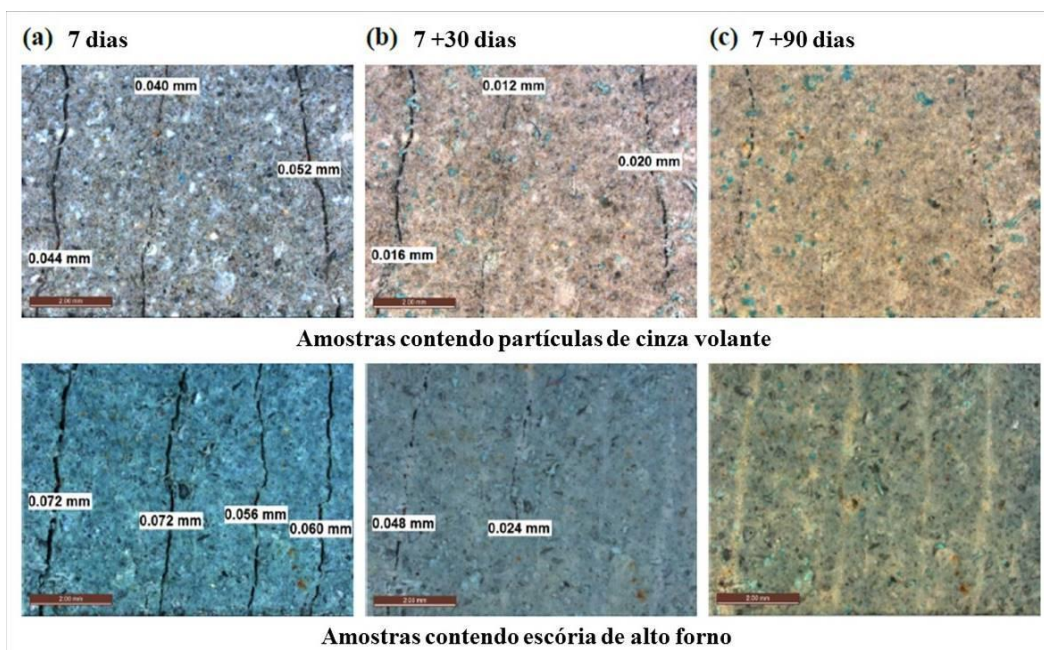
Os itens apresentados na sequência abordam ensaios e técnicas empregados em estudos diversos.

2.2.3.2.1 Ensaios de diagnóstico por imagem

Dentre as técnicas utilizadas para verificação da eficácia, destacam-se os diagnósticos por imagem, através dos quais pode-se comparar a espessura inicial de uma fissura, e acompanhar ao longo do tempo sua cicatrização (SAHMARAN; YILDIRIM; ERDEM, 2013).

No estudo desenvolvido por Alyousif et al., (2017), os autores analisaram, ao longo do tempo, o potencial de autorregeneração de amostras, contendo partículas de CV e de EAF, com a utilização de microscópio de alta precisão e softwares de processamento de imagens, vide Figura 20. Os autores atribuíram a coloração branca nas microfissuras à formação de calcita em amostras pozolânicas.

Figura 20 – Análise de amostras de SHC contendo CV e EAF, com uso de microscópio de alta precisão (7 dias, 7+30 dias e 7+90 dias)



Fonte: Alyousif et al., (2017, p73), texto traduzido para português

Ainda, ao verificar a espessura das fissuras formadas, tem-se que nas amostras contendo CV a abertura das fissuras reduziu de 0,044 mm para 0,016 mm, de 0,040 mm para 0,012 mm e de 0,052 mm para 0,020 mm. Nas amostras contendo EAF a redução foi de 0,072 mm para 0,048 mm, e de 0,056 mm para 0,024 mm.

Adotando a Equação 18, proposta por Wiktor e Jonkers (2011), para cálculo do percentual de recuperação de uma fissura, foi possível verificar que o percentual de recuperação da fissura foi em média de 65% para amostras contendo CV e 45% para amostras com EAF.

$$\text{Percentual de cura} = \frac{Cw_i - Cw_t}{Cw_i} \times 100 \quad \text{Equação 18}$$

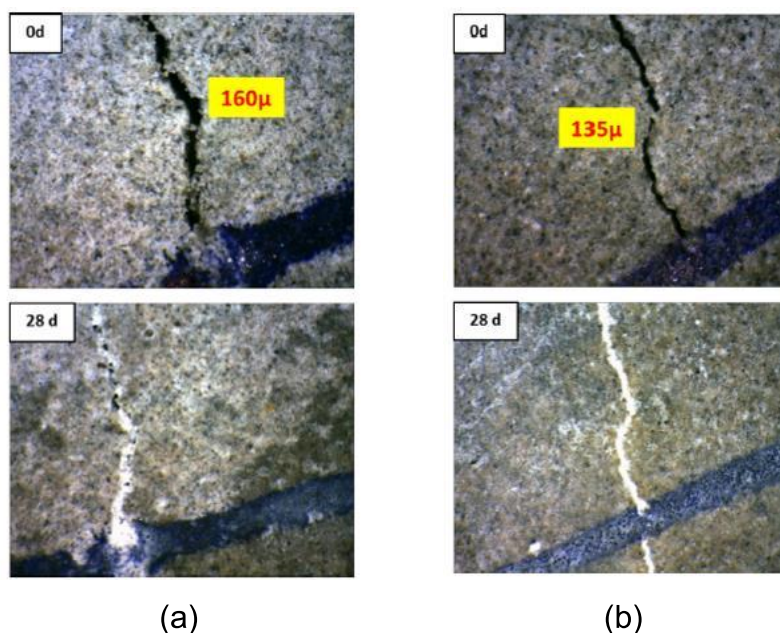
Onde:

Cw_i : abertura inicial da fissura;

Cw_t : abertura da fissura em um tempo t .

Alghamri, Kanellopoulos e Al-tabbaa, (2016) empregaram a técnica de MEV, ou *scanning electron microscopy (SEM)*, através da qual os autores identificaram que, já aos 28 dias, com impregnação de silicato de cálcio em agregados de argila expandida, houve grande potencial de recuperação (Figura 21).

Figura 21 – Utilização da MEV para identificação da selagem de fissuras (a) concreto convencional (b) SHC

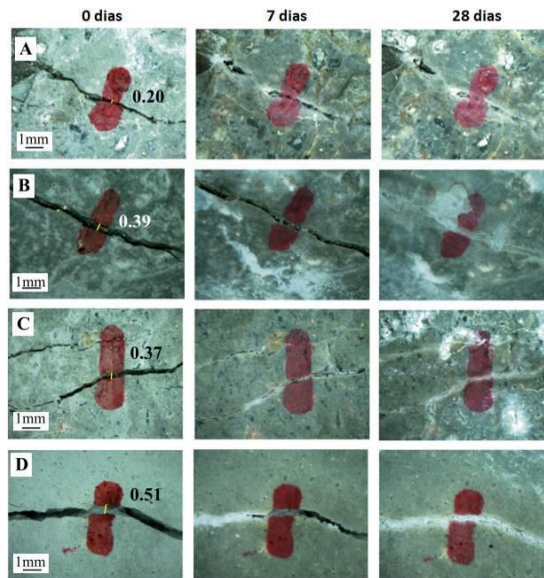


Fonte: Alghamri et al. (2016, p.7)

Conforme a Figura 21, inicialmente havia falhas na formação do produto de regeneração, passando a ser contínua a sua formação na idade de 28 dias. Tais resultados vão ao encontro com o apresentado por Zhang et al. (2017). Os autores avaliaram amostras contendo soluções bacterianas adicionadas através de diferentes métodos, como apresenta a Figura 22. Perceberam que o fenômeno da regeneração

pode iniciar de modo pontual, avançando para um formato de cicatrização contínua ao longo do tempo, mesmo com período reduzido de 28 dias.

Figura 22 – Verificação do comportamento de amostras contendo soluções bacterianas (a) controle (b) em água de amassamento (c) encapsuladas - AE e (d) encapsuladas -PE

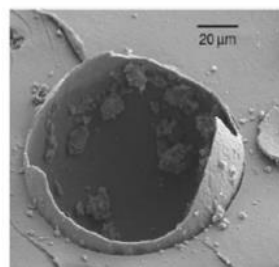


Fonte: Zhang et al., (2017, p. 613).

Para utilização da técnica, é necessário que as amostras sejam previamente secas. Considerando essa finalidade específica de uso, faz-se necessária a identificação da área da fissura a ser inspecionada, e que seja mantida a mesma região de análise e magnitude de aproximação.

Não apenas o fechamento das fissuras pode ser acompanhado pelo ensaio de MEV. White et al., (2001) empregaram a técnica e puderam perceber o ponto de ruptura de microcápsula para liberação do agente de autorrecuperação, assim como, o formato da quebra das paredes do material (Figura 23).

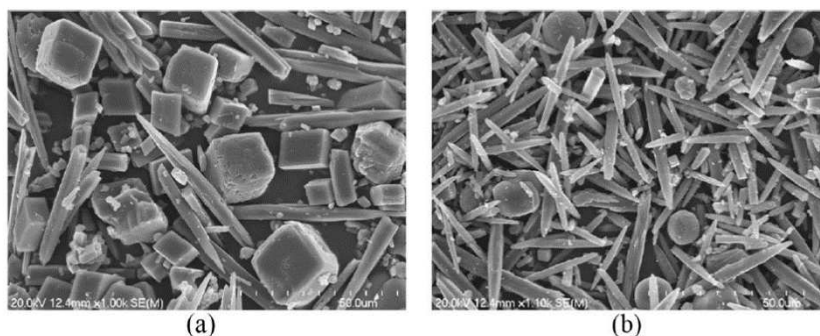
Figura 23 – Utilização da técnica da MEV para identificação da ruptura de microcápsula



Fonte: White et al., (2001, p.795), adaptado pela autora

Seifan, Samani e Berenjian (2016) empregaram a técnica de MEV para analisar, comparativamente, a precipitação de calcita quando da utilização das bactérias *sphaericus* e *subtilis*, respectivamente, conforme Figura 24.

Figura 24 – Utilização da técnica da MEV para verificação da precipitação da calcita pelas bactérias (a) *sphaericus* e (b) *subtilis*

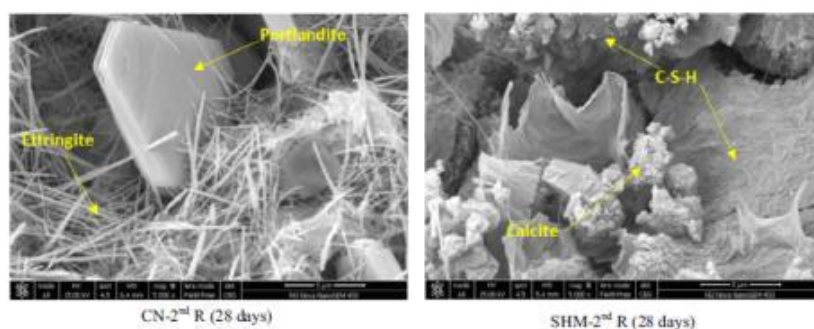


Fonte: Seifan; Samani; Berenjian (2016, p.2597)

Os formatos de produtos encontrados pelos autores também foram apresentados por Escoffres, Desmettre e Charron (2018), tendo os autores vinculado o formato retangular à calcita, o formato de agulhas à etringita e a formato espicular à formação de aragonita.

Alghamri, Kanellopoulos e Al-Tabbaa (2016) verificaram a formação de produtos na região das fissuras, comparando amostras de concreto convencional e de concretos autorregenerantes, conforme Figura 25. Tais amostras foram identificadas como CN e SHM, respectivamente.

Figura 25 – Utilização da MEV para verificação dos produtos formados na regeneração de concretos – *Calcite* (calcita), *ettringite* (etringita), *portlandite* (portlandita)

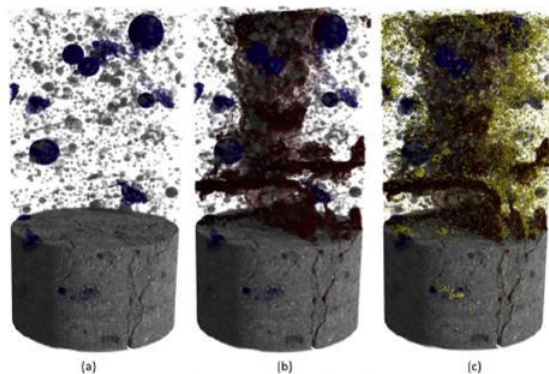


Fonte: Alghamri; Kanellopoulos; Al-Tabbaa (2016, p.919)

Considerando o apresentado na Figura 25, os autores atribuem o formato de agulhas à presença de etringita, as lâminas no formato de “escama de peixe” são associada à presença de portlandita e a calcita é presente em alguns pontos. Ao analisar as amostras, os autores evidenciaram a participação do silicato de sódio para uma maior criação do gel de C-S-H. Ainda, perceberam que, em comparação à amostra de concreto convencional, a amostra de SHC, em uma mesma idade, apresentou maior ganho de resistência, atribuída à maior presença de C-S-H. Somou-se a essa verificação pela MEV a realização das técnicas de DRX (difração de raios-X) e FTIR (espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier), que também apontaram para maior presença de C-S-H.

Snoeck et al., (2016) reportaram a utilização de microtomografia computadorizada para avaliação do produto formado na região da fissura, conforme ilustra a Figura 26. A técnica de recuperação do concreto utilizada pelos autores foi o emprego de PSA. Sobre essa técnica, Tang, Kardani e Cui (2015) citam como desvantajosa sua aplicação, uma vez que permite apenas a análise de amostras de pequena dimensão.

Figura 26 – Utilização de microtomografia computadorizada para visualização da eficácia de uso de PSA em SHC - umidade de cura de 90%



Fonte: Snoeck et al., (2016, p.90), adaptado pela autora

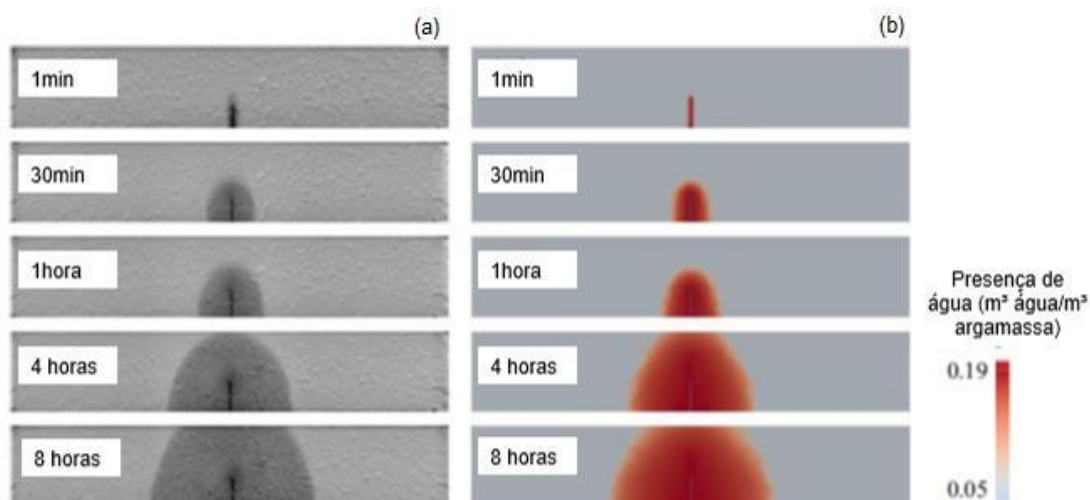
Na Figura 26, a imagem (a) apresenta elevado índice de porosidade das amostras. A imagem (b), em coloração marrom, aponta para a fissura causada na amostra. A figura (c) aponta a formação do produto de recuperação da fissura. Os autores avaliaram diferentes condições de cura, sendo a retratada na imagem a cura com 90% de umidade relativa. Ferrara et al., (2018) afirmam que a técnica apresenta grande pertinência nesse tipo de análise, podendo proporcionar muitos ganhos

quando se conta com análise quantitativa da formação dos produtos de regeneração, avaliando a eficácia dos SHC com diferentes aberturas e profundidades de fissura.

Dependendo da densidade do produto formado e da matriz, podem ser obtidos parâmetros quantitativos com o uso da tomografia computadorizada, como na identificação do percentual de vazios em determinado volume de amostra (PACHECO, 2016).

A análise através de microscopia por raios-X permitiu a visualização da presença e distribuição da água no interior de uma fissura em amostra de argamassa. Van Belleghem et al., (2016) compararam a distribuição de água verificada em ensaio (a) e a previstas por modelos matemáticos (b), Figura 27.

Figura 27 – Verificação da presença e distribuição de água no interior de uma fissura em amostra de argamassa – (a) por ensaio e (b) por modelos matemáticos



Fonte: Van Belleghem et al., (2016, p.160), texto traduzido para português

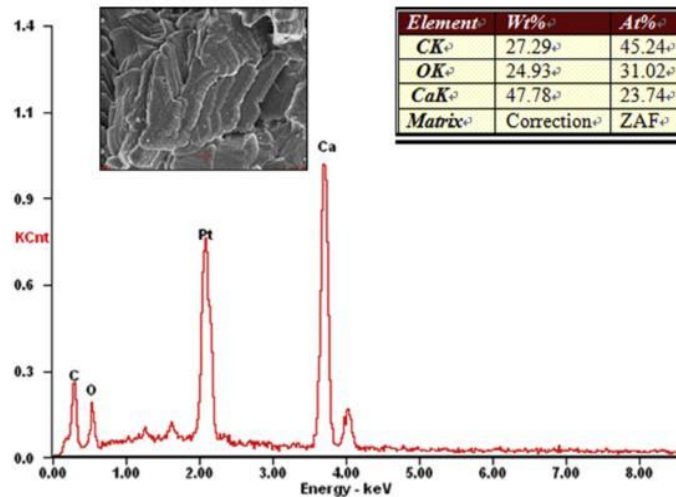
Indica-se, através da pertinência dos dados a um mesmo comportamento, que tal análise pode ser conduzida para diferentes tamanhos e configurações de fissuras.

2.2.3.2.2 Diagnóstico por imagem somado a ensaios químicos e ensaios químicos independentes

O MEV pode ser associado à EDS - energia dispersiva de espectroscopia de raios-X para diagnóstico da autorregeneração. Através da EDS pode-se obter de modo qualitativo os elementos químicos presentes em espectros de análise da amostra. No estudo de Luo, Qian e Li (2015) empregou-se as técnicas de EDS e MEV,

Figura 28, visando uma análise quantitativa dos elementos químicos presentes em um ponto de observação.

Figura 28 – Utilização da técnica de EDS somada à MEV em elemento de concreto



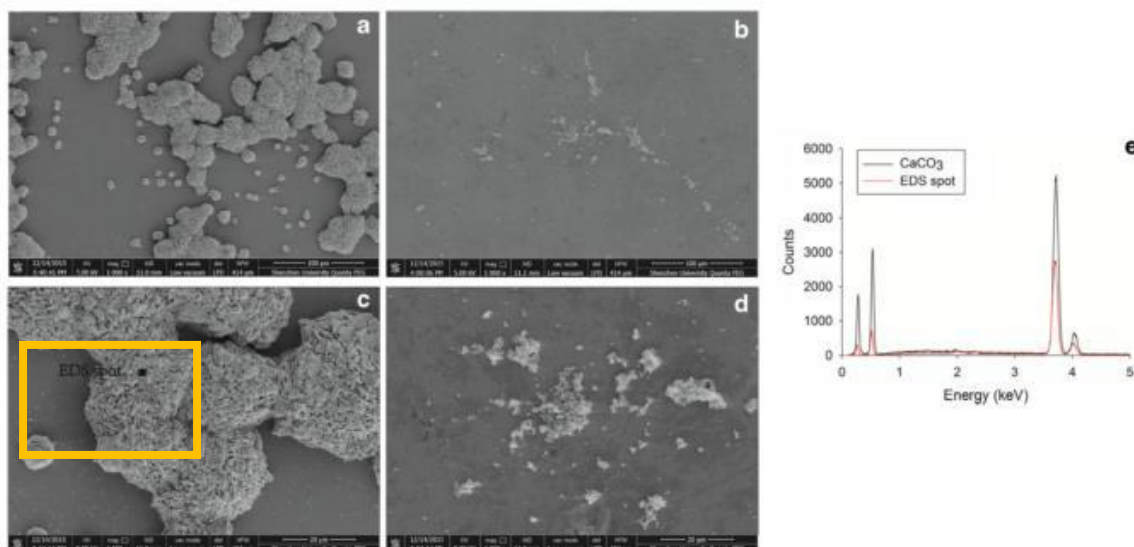
Fonte: Luo; Qian; Li (2015, p;4)

Obteve-se na superfície da fissura a presença majoritária de carbono, oxigênio e cálcio, conforme Figura 28, após a regeneração promovida pela solução bacteriana. Dedavid, Gomes e Machado (2007) afirmam que elementos de baixo número atômico, como carbono e oxigênio, apresentam bandas na região de baixa energia, onde as perdas por absorção na amostra são grandes. Por tal motivo, a identificação na análise de EDS pode apresentar equívocos.

A microanálise eletrônica consiste na mensuração de raios-X característicos emitidos por uma região microscópica da amostra, que recebe a incidência de um feixe de elétrons (MANSUR, 2012). Importante destacar que a técnica de EDS possibilita a análise pontual da amostra, não podendo os dados obtidos serem extrapolados para a totalidade da superfície.

Zhang et al., (2016) apresentam resultados da técnica de MEV realizada em SHC contendo soluções bacterianas, sendo que, através da junção com a técnica de EDS, verificou-se comportamento referente à presença de CaCO_3 , vide Figura 29.

Figura 29 – Técnica de MEV somada a EDS de SHC contendo solução bacteriana

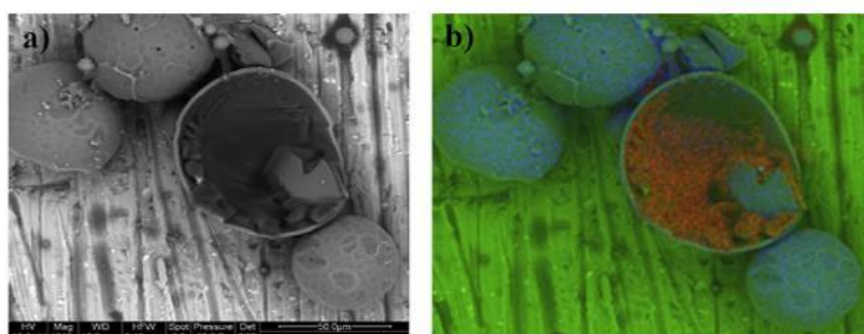


Fonte: Zhang (2016b, p6666)

A formação de carbonato de cálcio na zona da fissura indica para uma efetividade na regeneração empregando-se soluções bacterianas (AL-TABBAA et al., 2019).

De modo análogo ao proposto por White et al., (2001), com a análise da ruptura de agregado leve, Perez et al., (2015) realizaram análise envolvendo a visualização da amostra após ruptura, somando a análise química do material, também obtida pela técnica de EDS, Figura 30.

Figura 30 – Análise de ruptura de agregado leve para encapsulamento e composição química da amostra pela técnica de EDS

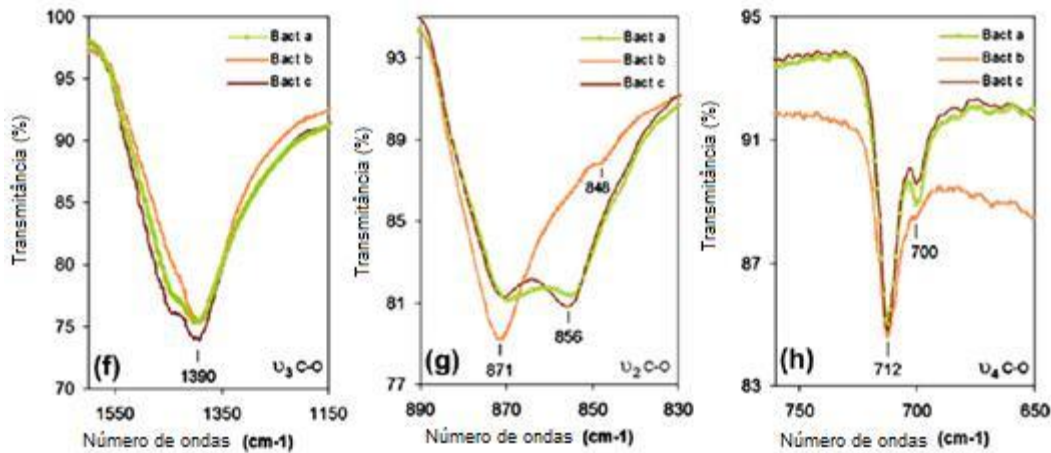


Fonte: Perez et al. (2015, p.42)

Perez et al. (2015) identificaram a ruptura do agregado (a), percebendo na análise química (b), sílica em azul, presença de carbono em laranja e de alumínio reportado em verde.

Wiktor e Jonkers (2011) observaram as amostras contendo solução bacteriana imersa em AE através de MEV, combinando com a utilização de FTIR, conforme Figura 31, apontando para outra possibilidade de combinação da técnica.

Figura 31 – FTIR em amostra contendo solução bacteriana imersa em AE

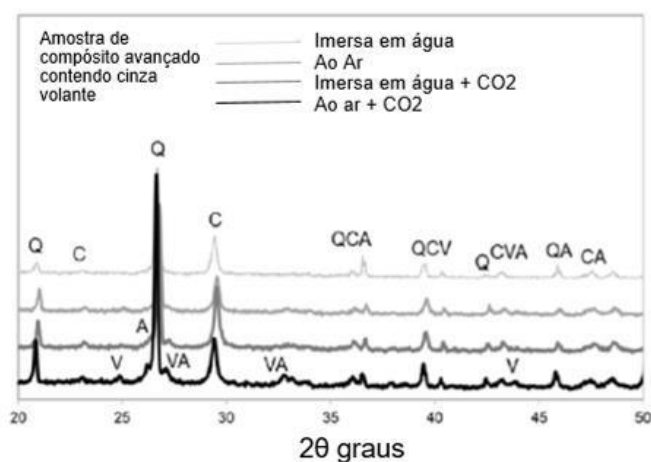


Fonte: Wiktor; Jonkers (2011, p.766)

Os autores indicaram que a técnica foi empregada devido à estrutura cristalina diferente dos precipitados minerais, sendo possível sua identificação. Em todas as amostras percebeu-se a presença de calcita e aragonita. Observaram ainda que as principais bandas vibracionais indicativas da calcita foram identificadas na bactéria B. Já a presença de aragonita foi atribuída ao padrão vibracional apresentado pelas amostras de bactéria A e bactéria C.

Yildirim et al., (2018) empregaram a técnica de DRX para análise de amostras contendo CV, CV com adição de cal hidratada e EAF. Apresenta-se os resultados obtidos para a amostra contendo CV na Figura 32.

Figura 32 – Emprego de DRX em amostra de compósito cimentício com CV na composição - diferentes situações de cura



Fonte: Yildirim et al. (2018, p.183)

Conforme os autores, os picos de quartzo foram mais pronunciados do que os de outros cristais, para todas as condições de cura avaliadas no estudo. Tal fato pode ser associado à presença da areia na sílica, e ainda, à formação de géis de C-S-H e C-A-S-H nas microfissuras. Foram obtidos, além dos picos de quartzo (Q), picos bem definidos de calcita (C), vaterita (V) e aragonita (A). A influência da cura foi percebida através da maior presença de CaCO_3 , quando na cura com imersão em água contendo CO_2 .

Em relação a combinação de técnicas, Yildirim et al., (2018) somaram a técnica de MEV com os métodos de EDS e DRX, para análise das regiões com microfissuras. Os autores empregaram cura em água pura e com CO_2 e amostras secas ao ar. Independentemente do tipo de cura empregada, foi verificada a ocorrência de picos preponderantes de quartzo na técnica de DRX. Na análise por EDS, percebeu-se a presença de cálcio. Nos traços contendo pozolanas, verificou-se ainda silício e alumínio, o que pode ser um indício da formação de C-S-H e C-A-S-H e uma suave formação dos géis de hidratação do cimento e das pozolanas. Cabe ressaltar que a abertura máxima cicatrizada foi de $458\mu\text{m}$.

Zhang et al., (2017) ao utilizarem solução de bactéria *bacillus cohnii* encapsulada em AE e em PE, conduziram as técnicas de MEV e DRX. Através da DRX percebeu-se a formação de calcita nas regiões de recuperação das fissuras. Na MEV os autores perceberam os esporos da bactéria encapsulada na mistura e a formação de cristais de CaCO_3 após a recuperação.

Finalizando, Yildirim et al., (2018) apontam que o emprego da técnica de TGA, ou análise termogravimétrica, é viável, visando a identificação da presença de CaCO_3 . A decomposição do CaCO_3 ocorre na faixa de temperatura entre 500 e 900°C, porém, sua forma amorfa pode se decompor na mesma temperatura do CH, tornando a análise complexa. Como estratégia, essa análise contempla apenas a faixa polimorfa do CaCO_3 .

2.2.3.2.3 *Ensaaios mecânicos*

Tang, Kardani e Cui (2015) citam diversos ensaios mecânicos que podem ser empregados na verificação da eficácia dos mecanismos de autorregeneração do concreto, expondo que tais técnicas podem ter seus resultados influenciados pelo teor de umidade das amostras, dimensões e formato dos corpos de prova e método de aplicação de carga.

Alghamri; Kanellopoulos; Al-tabbaa (2016) realizaram ensaio de resistência mecânica à compressão para avaliar a utilização de soluções químicas inseridas em concretos leves, uma vez que a substituição dos agregados convencionais por agregados porosos conduziu à redução de sua capacidade portante. Os autores revelam que, dada a liberação de C-S-H após a formação da fissura, é pertinente realizar o ensaio em idades avançadas, como 60 dias, período no qual ainda se percebe alterações no comportamento dos concretos.

Anneza et al., (2016) utilizaram o ensaio de resistência à compressão apenas para identificar o efeito da inserção de diferentes soluções bacterianas em matriz de concreto, obtendo como resultado que os materiais sofreram sensíveis alterações, como pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16 – Misturas contendo diferentes soluções bacterianas e referente resistência mecânica à compressão

Mistura	Descrição	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
Mistura 1	Controle	36,0
Mistura 2	Bactéria ureolítica <i>Enterococcus faecalis</i>	38,2
Mistura 3	Bactéria reduzida em sulfato <i>Bacillus SP</i>	42,4
Mistura 4	Composição com as bactérias das misturas 3 e 4	40,6

Fonte: Anneza et al., (2016, p.4), texto traduzido para português

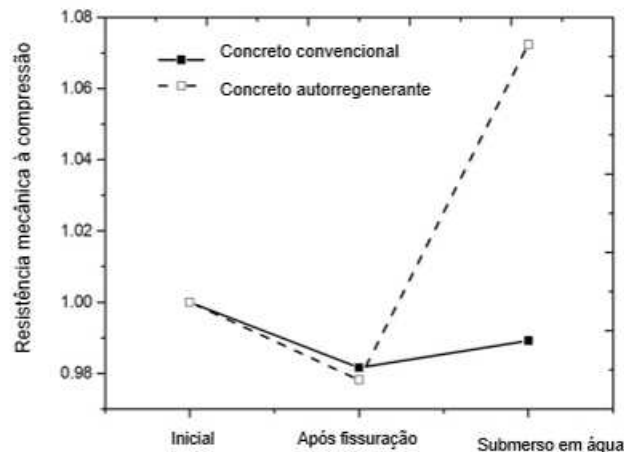
De modo semelhante, Afifudin et al. (2011) observaram um acréscimo ao comparar-se amostras de composição controle e com a utilização de soluções bacterianas. O acréscimo foi de até 50% da resistência nas idades iniciais, com pequeno decréscimo aos 60 dias, sendo este decorrente de um fenômeno não identificado.

Kalhari e Bagherpour (2017) avaliaram a utilização de solução bacteriana na água de amassamento de concretos projetados, verificando que, em todos os percentuais, houve ganho na resistência mecânica à compressão e à tração na flexão. Segundo os autores, a porosidade de um concreto projetado, mais elevada que de um concreto lançado convencionalmente, proporcionou a atuação da solução bacteriana.

Constata-se que os estudos em geral utilizam os ensaios mecânicos para caracterização dos concretos desenvolvidos, não necessariamente indicando a eficácia da cicatrização (ALSHALIF et al., 2016; ESCOFFRES; DESMETTRE; CHARRON, 2018; KHALIQ; EHSAN, 2016).

Como exemplo dos estudos que verificam os benefícios da cicatrização, Tan et al., (2016) verificaram a resistência de amostras de concreto convencional e de concreto autorregenerante (Figura 33). Na referida figura, o ponto 1 no eixo vertical aponta para a resistência inicial do concreto.

Figura 33 – Análise mecânica de concreto convencional e SHC após fissuração.



Fonte: Tan et al. (2016, p.11), texto traduzido para português

O estudo revelou que, através da formação de produtos da autorregeneração, teve-se o ganho de resistência do material. No concreto convencional, no entanto, a fissuração apenas fragilizou o concreto, que apresentou pequeno ganho de resistência, o que pode ter sido causado pela regeneração menos expressiva do cimento anidro presente no concreto.

Alghamri, Kanellopoulos e Al-Tabbaa (2016) avaliaram não apenas a resistência à compressão do concreto utilizado em seu estudo, mas ainda, como a regeneração influenciou na resistência à compressão diante de três induções de fissura. Os autores perceberam que a regeneração do concreto contendo agregados leves com silicato de sódio foi de até 80%, sendo esse valor até 5x superior ao obtido nas amostras de referência.

Ao avaliar amostras de SHC contendo pozolanas, Alyousif (2016) percebeu que, após decorrido o período de análise de regeneração, as amostras apontaram valores iguais ou superiores a amostra de controle, evidenciando que mesmo com a formação de fissura não houve danos mecânicos nos materiais.

Hilloulin et al., (2016b) examinaram a capacidade de autorregeneração dos concretos somada à recuperação das suas propriedades mecânicas. Os autores verificaram que em duas semanas já é possível perceber uma recuperação mecânica, considerando fissuras formadas em idades iniciais, e ainda, cura das amostras submersas. Os autores variaram o período de cura, a abertura residual das fissuras, provocadas por ensaio mecânico, conforme Tabela 17. A Figura 34 apresenta as

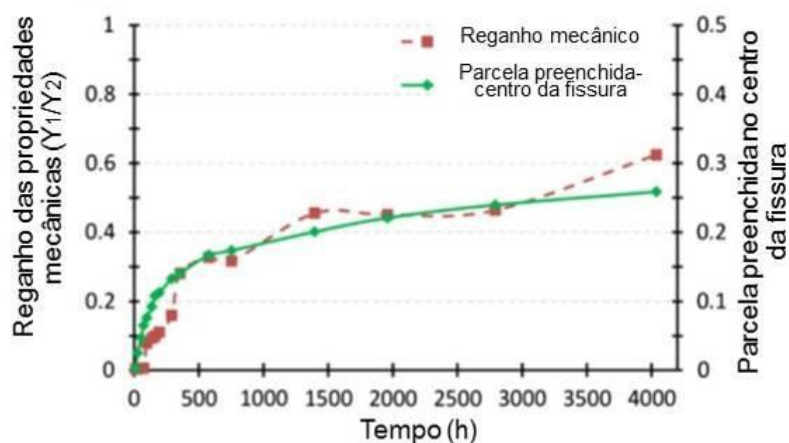
propriedades avaliadas pelos autores, de reganho de resistência e percentual de fechamento no centro da fissura.

Tabela 17 – Experimento de análise de recuperação das propriedades mecânicas

Amostra	Idade na fissuração	Resistência à flexão e média de espessura da fissura provocada (μm)	Período de regeneração
S1	24h	35 (10)	2 semanas
S1-5m	24h	25 (5)	2 semanas
S1- 20m	24h	45 (20)	2 semanas
S1-72h	72h	35 (10)	2 semanas
S1-7d	7 dias	35 (10)	2 semanas
S1- h2d	24h	35 (10)	2 dias
S1-h7d	24h	35 (10)	7 dias
S1-h5w	24h	35 (10)	5 semanas

Fonte: Hilloulin et al. (2016b, p.23), texto traduzido para português

Figura 34 – Reganho de propriedades mecânicas



Fonte: Hilloulin et al., (2016b, p.11), texto traduzido para português

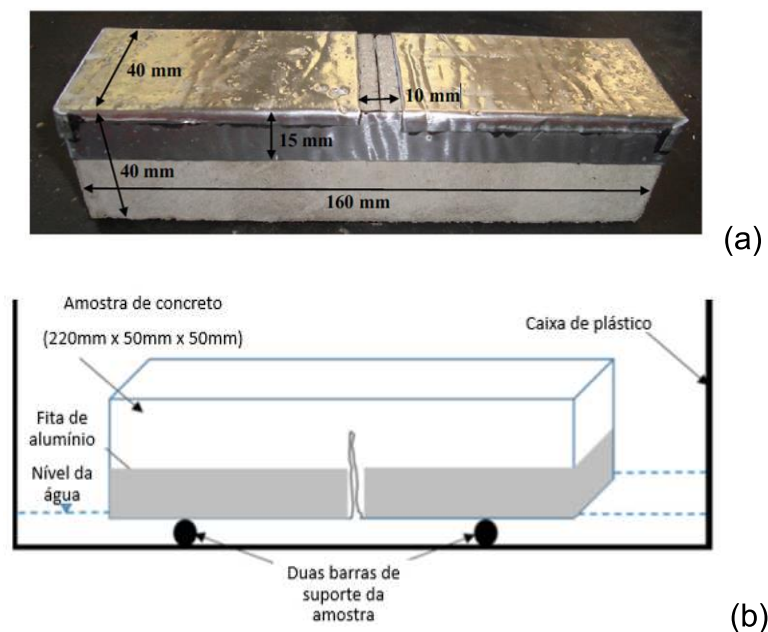
A Figura 34 apresenta a síntese das conclusões observadas pelos autores, em que se percebeu que partindo de 10% de preenchimento de fissura nota-se reganho das propriedades mecânicas, o que se percebeu próximo à 50h após o início da recuperação.

2.2.3.2.4 Ensaios físicos

Como as técnicas visam a selagem e possível recuperação de fissuras, e considerando ainda que essas se configuram como trechos atípicos que conduzem a maior absorção de água, ensaios de absorção por capilaridade são corriqueiramente empregados nos estudos de autorregeneração dos concretos.

Para o ensaio de capilaridade, em conformidade com Tang, Kardani e Cui (2015), há a necessidade da envoltória da amostra para análise pontual da fissura como um ponto de absorção da água. No estudo de Van Belleghem et al., (2016), os autores adotaram estratégia de envoltória na amostra, de modo que a absorção ocorresse pontualmente na região na qual a fissura foi produzida (Figura 35). O mesmo procedimento foi realizado por Alghamri, Kanellopoulos e Al-tabbaa (2016), também demonstrado na Figura 35.

Figura 35 – Amostra para ensaio de capilaridade- Envoltória da região não fissurada para bloquear a troca de umidade com ambiente externo



Fonte: (a) Van Belleghem et al. (2016, p.3); (b) Alghamri; Kanellopoulos; Al-tabbaa, (2016, p.915)

No cenário internacional, percebe-se a utilização de ensaios sônicos e ultrassônicos para diagnóstico do concreto, dada sua facilidade de realização, somada a confiabilidade atribuída à seus resultados, inclusive, para propor relação com as características mecânicas do material. In et al., (2013b) utilizaram, para monitorar

estrutura *in loco*, as análises com ultrassom difuso, após induzir por pré-tensão fissuras em elementos de concreto armado expostos a névoa salina. Os parâmetros verificados pelos autores foram: difusividade efetiva e tempo de máxima energia. As medições contaram com um dispositivo emissor e outro receptor de onda, medindo-se três vezes sua transmissão na região contendo a fissura. Tal análise pode ser repetida diversas vezes ao longo do tempo para verificação da densidade do produto de autorregeneração. CAPPELLESSO, 2016)

Yildirim et al., (2018) utilizaram a técnica de impedância elétrica para verificação do potencial de selagem das fissuras em amostras de concreto.

2.2.4 Considerações sobre o referencial teórico

Como pode ser observado, diversas são as estratégias que podem ser empregadas para promover a autocicatrização e a autorregeneração do concreto. São percebidas, no entanto, lacunas relacionadas as diferentes técnicas, como já trazido por Li e Herbert (2012) tais como os pré-requisitos para ocorrência dos fenômenos, a cicatrização máxima possibilitada por cada método e a padronização dos procedimentos.

Assim sendo, nesse estudo, propõem-se a definição de variáveis de pesquisa através de estudos piloto e a condução de um programa experimental para avaliar condições de cura, mecanismos de formação de fissuras, e o diferente comportamento obtido pelos distintos mecanismos.

3 ESTUDOS PILOTO

Para o desenvolvimento do programa experimental, fez-se necessária a realização de estudos piloto para definições iniciais. A seguir, são descritos tais estudos, seus objetivos, métodos, resultados e considerações.

3.1 ESTUDO PILOTO A - VERIFICAÇÃO DA IMPREGNAÇÃO DE SOLUÇÃO QUÍMICA EM AGREGADOS DE ARGILA E PERLITA EXPANDIDA

O estudo piloto A foi desenvolvido para analisar comparativamente o encapsulamento de soluções química de silicato de sódio neutro em agregados de AE e PE. Para tal, foram testadas composições contendo os percentuais de 15 e 30% de AE e PE, substituição realizada em massa combinada com volume dos agregados miúdos. A Tabela 18 apresenta as composições unitárias avaliadas. O método envolveu a moldagem e confecção de amostras, o ensaio de resistência à tração na flexão para produção de fissuras, a verificação dos produtos de autocicatrização por microscópio óptico do tipo estéreo zoom, complementando-se com os ensaios de compressão e absorção de água por capilaridade. Como a análise é comparativa entre dois agregados para encapsulamento, optou-se por realizar sua análise também pela técnica de MEV.

Tabela 18 – Traços unitários do estudo piloto A - Amostras com uso de PE e AE

Material	Traço unitário				
	Referência	PE 15	PE 30	AE 15	AE 30
Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Areia	1,50	0,89	0,73	0,89	0,73
Perlita	-	0,16	0,32	-	-
Argila	-	-	-	1,40	2,80
Brita	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Água	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Aditivo superplastificante Tecflow 8000	0,20%	0,13%	0,12%	0,15%	0,20%

3.1.1 Seleção dos materiais

São apresentados nos próximos tópicos os materiais empregados.

3.1.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Portland CP V-ARI. As características do cimento apresentadas pelo fabricante constam na Tabela 19. A escolha desse cimento concorda com os estudos de Zhang et al., (2017) e Alghamri, Kanellopoulos, Al-tabbaa (2016), considerando sua equivalência internacional.

Tabela 19 – Propriedades físicas e químicas do cimento

Propriedades físicas	Resultado	Teor de elementos e compostos (%)	Resultado
Exp quente (mm)	0,18	Al ₂ O ₃	4,42
Tempo início pega (s)	197	SiO ₂	19,39
Tempo fim de pega (s)	245	Fe ₂ O ₃	3,05
Cons.normal (mm)	30,1	CaO	62,26
Blaine	4,42	MgO	1,89
#200	0,07	SO ₃	3,11
#325	0,33	CaO	3,67
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	CaO livre	1,17
	3 dias	Resíduo insol.	0,85
	7 dias	Equiv.alcal	0,7
	28 dias		

Fonte: Fabricante (2018)

3.1.1.2 Agregados convencionais

O agregado miúdo é areia quartzosa extraída de rio. A massa unitária foi de 1,41 g/cm³ e a massa específica de 2,53 g/cm³. A determinação da curva granulométrica foi realizada através da NBR NM 248 (ABNT, 2003), sendo os resultados apresentados na Tabela 20. O módulo de finura foi de 2,07 e o diâmetro máximo igual a 2,4 mm.

Tabela 20 – Granulometria do agregado miúdo - estudo piloto A

PENEIRA		1ª Determinação		2ª Determinação		% Retida Media	% Retida Acumulada
N	mm	Peso Retido	% Retido	Peso Retido	% Retido		
3/8"	9.5	0.00 g	0.0	0.00 g	0.00	0.00	0
1/4"	6.3	0.00 g	0.00	0.00 g	0.00	0.00	0
4	4.8	0.70 g	0.07	0.10 g	0.01	0.04	0
8	2.4	9.80 g	0.98	10.00 g	1.00	0.99	1
16	1.2	60.70 g	6.05	58.20 g	5.80	5.92	7
30	0.6	181.50 g	18.10	122.70 g	12.22	15.16	22
50	0.3	520.20 g	51.86	637.40 g	63.48	57.67	80
100	0.15	203.20 g	20.26	149.90 g	14.93	17.59	97
Fundo	0.01	26.90 g	2.68	25.80 g	2.57	2.63	100
Total		1003.00 g		1004.10 g		Módulo de Finura	2.07

O agregado graúdo utilizado foi a brita basáltica com dimensões de 4,8 mm a 9,5 mm. Foram realizados os ensaios de determinação da curva granulométrica do agregado graúdo através dos procedimentos descritos na NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009), massa unitária NBR NM 45 (ABNT, 2006), massa específica do agregado graúdo NBR NM 53 (ABNT, 2009). A média da massa unitária da brita foi de 1,64 g/cm³. A distribuição granulométrica dos grãos é apresentada na Tabela 21. A dimensão máxima característica de 9,5 mm. A massa específica foi obtida pela NBR NM 53 (ABNT, 2009), sendo o resultado obtido de 2,48 g/cm³.

Tabela 21 – Granulometria do agregado graúdo- estudo piloto A

PENEIRA		1ª Determinação		2ª Determinação		% Retida Media	% Retida Acumulada
N	mm	Peso Retido	% Retido	Peso Retido	% Retido		
3/4"	19	0	0.00	0	0.00	0.00%	0
1/2"	12.5	0	0.00	0.5	0.10	0.05%	0
3/8"	9.5	17.3	3.46	19.9	3.98	3.72%	4
1/4"	6.3	292.9	58.59	291.2	58.25	58.42%	62
4	4.8	142.3	28.47	141.75	28.35	28.41%	91
Fundo	0.01	47.4	9.48	46.6	9.32	9.40%	100
Total		499.9		499.95		Dimensão máxima	9,5 mm

3.1.1.3 Agregados leves

Foram empregadas duas dimensões de AE, a de código 0500, com dimensões entre 1,2 mm e 4,75 mm e a de código 1506 com dimensões entre 12,5 mm e 2,4 mm, ambas da Cinexpan Indústria e Comércio de Argila Expandida. A utilização se deu na

mesma faixa granulométrica substituída de areia, apenas com agregado miúdo. De acordo com o fabricante, a argila de menor dimensão tem densidade aparente de 850kg/m³ e a de maior dimensão de 600 kg/m³. A composição química consta na Tabela 22.

Tabela 22 – Composição química da AE

Componentes	Unidade	Percentual obtido
SiO ₂	%	63,19
Al ₂ O ₃	%	18,02
Fe ₂ O ₃	%	7,63
TiO ₂	%	0,92
CaO	%	0,64
MgO	%	3,26
Na ₂ O	%	0,61
K ₂ O	%	4,91
P ₂ O ₅	%	0,2
MnO	%	0,08
Bao	%	0,09
Perda ao fogo	%	0,2

Fonte: Fabricante (2018)

A PE foi fornecida pela empresa Pervale Minerais, com granulometria entre 1,2 a 4,8 mm. A média da massa unitária da PE foi de 110,1 kg/m³. Não foi verificada a distribuição granulométrica da perlita pois a substituição foi realizada em relação ao percentual do diâmetro retirado da areia. Ou seja, de acordo com o percentual de cada faixa granulométrica retirada (areia) foi realizada adição do agregado leve (perlita). Com o auxílio de peneira mecânica, pode-se classificar a PE com grãos que variavam de 4,8 mm a 2,4 mm e 2,4 mm a 1,2 mm. As propriedades da perlita oriundas do fabricante são apresentadas na Tabela 23 e na Tabela 24 para a composição química e propriedades físicas, respectivamente.

Tabela 23 – Composição química da PE

Componentes	Unidade	Faixa de valores indicada pelo fabricante	
SiO ₂	%	71,00	78,00
Al ₂ O ₃	%	8,50	15,00
Fe ₂ O ₃	%	0,30	1,20
TiO ₂	%	0,01	0,01
CaO	%	0,30	1,20
MgO	%	0,10	0,30
Na ₂ O	%	2,50	4,20
K ₂ O	%	3,00	7,00
SO ₃	%	0,01	0,01
P ₂ O ₅	%	0,01	0,03
MnO	%	0,01	0,04
Perda ao fogo	%	0,1	2,00

Fonte: Fabricante (2018)

Tabela 24 – Características físicas da PE

PROPRIIDADE	UNIDADE	Faixa de valores especificados	
Densidade aparente	kg/m ³	48,00	56,00
Peso específico	N/m ³	2,20	2,40
Temp. de amolecimento	°C	871,00	1093,00
Temp. de fusão	°C	1260,00	1343,00
Calor específico	J/kg.K	837,00	870,00
Condutividade térmica a 24°C	W/m.k	0,04	0,06
Índice de refração	%	0,10	0,40
Não expandidos	%	0,10	0,40
pH	-	6,50	8,00
Umidade	%	0,30	1,00

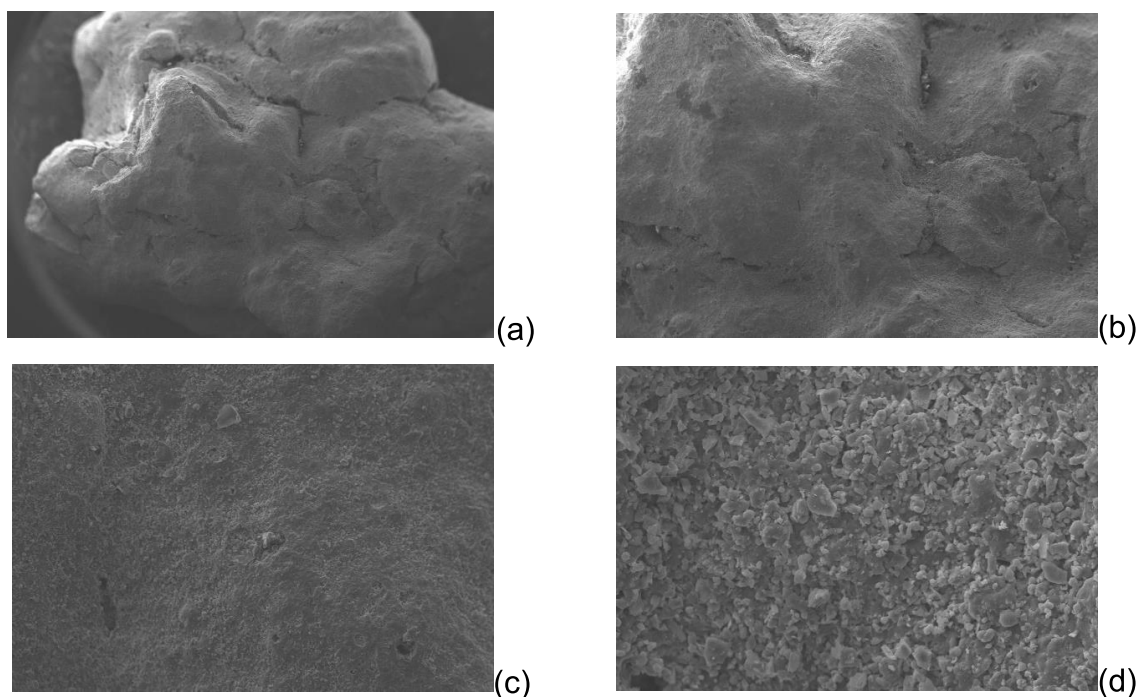
Fonte: Fabricante (2018)

Para verificar a estrutura de vazios de cada material, foi utilizada a técnica de MEV em amostra fraturada. O ensaio de microscopia foi realizado no IIT FUSE - Instituto Tecnológico em Ensaio e Segurança Funcional, da UNISINOS. Para o ensaio, a amostra foi previamente seca e metalizada com ouro. O sistema contou com a análise conjunta de EDS para identificação da composição química dos materiais. O equipamento empregado foi microscópio eletrônico de varredura, da marca Zeiss.

3.1.1.3.1 Argila expandida

A Figura 36 apresenta imagens da AE obtidas com o uso da MEV.

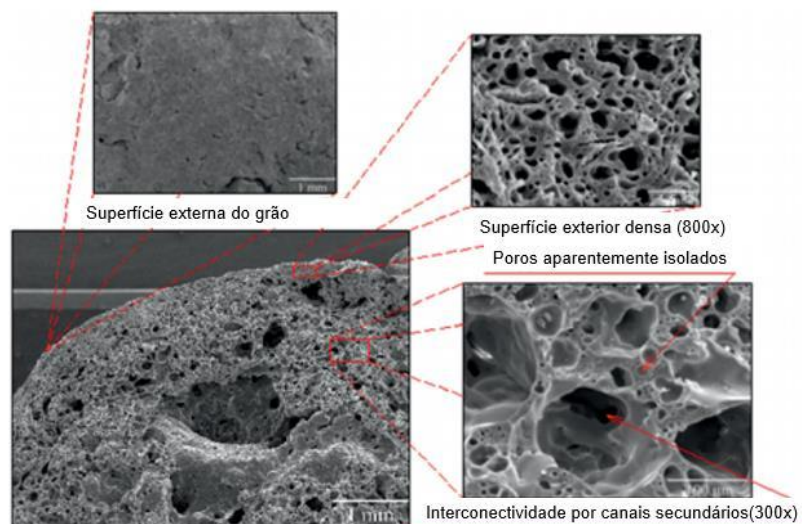
Figura 36 – Comparação da estrutura porosa da AE e da PE por MEV- AE (a) aprox. de 51x e (b) aprox. de 100x (c) aprox. de 500x e (d) aprox. de 2000x



Riaz et al. (2019), ao analisarem a AE através da técnica de MEV, verificaram a estrutura porosa da AE com aproximação de 100x. Os autores empregaram, no entanto, AEs com densidades de 800 kg/m³, 1000 kg/m³, 1200 kg/m³ e 1300 kg/m³. Nessa pesquisa, como verificado na Figura 36b, com essa aproximação, não foi possível verificar internamente a estrutura de poros apresentada pelo material.

No estudo de Bogas, Mauricio e Pereira (A, 2012) os autores verificaram com aproximação de 800x a superfície exterior do agregado de AE, denotando para uma ligação através de canais com diversos poros. Com a aproximação de 300x já foi possível perceber que existiam poros isolados em relação a sua distribuição no grão, vide Figura 37.

Figura 37 – Imagens de MEV da AE



Fonte: Bogas, Maurício e Pereira (2012)

Conforme citado, a diferença entre a microestrutura verificada por imagem pode ser decorrente de diferentes composições, ou ainda, de materiais de diferentes densidades, o que tem relação direta com a estrutura e a distribuição de vazios do material. Além disso, a imagem obtida pelos referidos autores é no interior do agregado e no caso do presente estudo a análise se deu na superfície do agregado.

A Figura 36d foi utilizada para análise da composição química da AE, sendo os resultados apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Elementos identificados em percentual- Análise semiquantitativa via EDS- AE

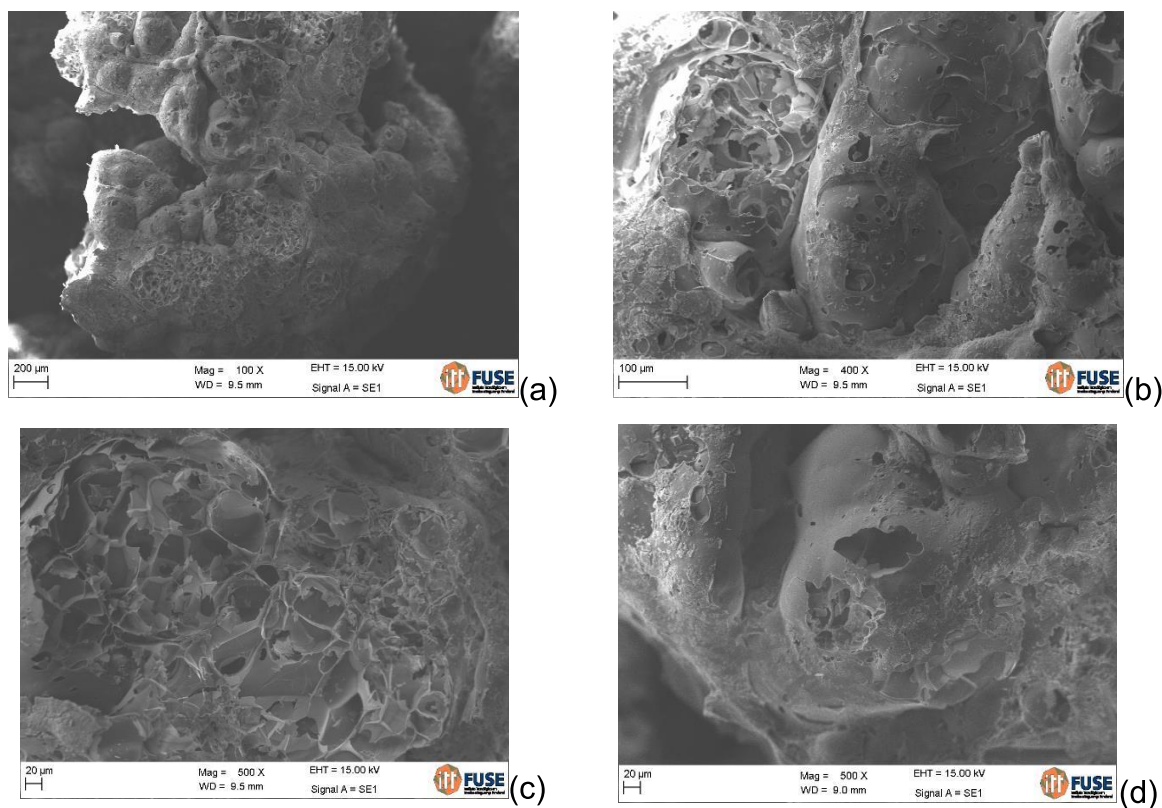
Componentes	Percentual obtido
O	42,8
Si	30,87
Al	10,23
Fe	7,10
K	4,48
Mg	1,78
Ca	1,16
Ti	1,15
Na	0,43

Os elementos obtidos pela técnica de EDS concordam com as características de composição apontadas pelo fabricante que indicam que os componentes majoritários são SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

3.1.1.3.2 Perlita expandida

A Figura 38 apresenta as imagens de microscopia eletrônica obtidas da PE.

Figura 38 – Imagem gerada – MEV - PE (a) aprox.de 100x (b) aprox. de 400x (c) aprox. de 500x interna (d) aprox. de 500x aspecto superficial da PE



A análise de EDS realizada na perlita expandida, tomando como base a imagem apresentada na Figura 38a, revelou os elementos químicos apresentados na Tabela 26.

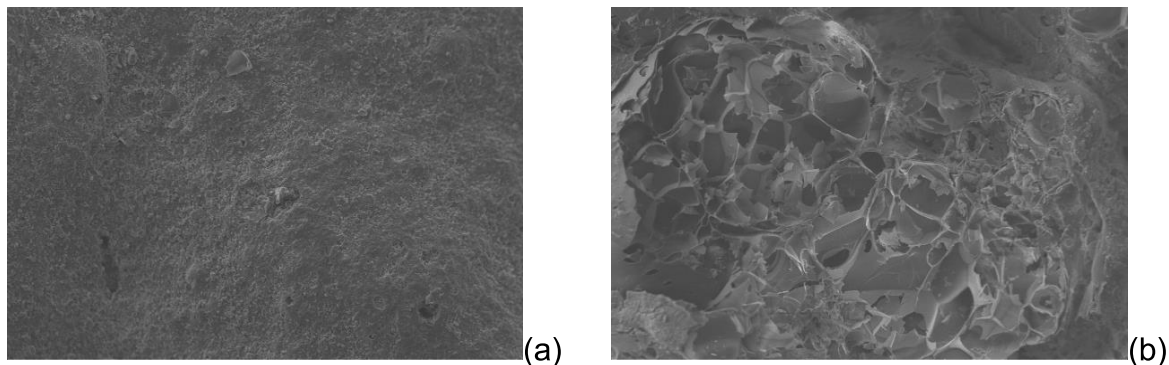
Tabela 26 – Elementos identificados em percentual- Análise semiquantitativa via EDS- PE

Componentes	Percentual obtido
O	43,05
Si	40,7
Al	7,18
K	4,76
Na	2,27
Fe	1,41
Ca	0,62

Novamente, percebe-se semelhança com as características fornecidas pelo fabricante, que apontam como componente majoritário no material o SiO_2 .

Ao analisar comparativamente os materiais analisados, pode-se perceber que a PE possui, em uma mesma aproximação (vide Figura 39), a verificação de uma estrutura porosa, apontando para uma maior existência de vazios. O aspecto superficial da AE, no entanto, não retrata para essa existência de canais ou redes para distribuição do material de regeneração.

Figura 39 – Análise comparativa da microestrutura de amostras de (a) AE na superfície e (b) PE nos poros, ambas com aprox. de 500x, por MEV



3.1.1.4 Agente para encapsulamento

O agente de cura utilizado neste estudo foi o silicato de sódio neutro (Na_2SiO_3) em forma líquida com diluição de 50% em água deionizada, como proposto por diversos estudos (GIANNAROS; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; MANOJ PRABAHAR et al., 2017). Ele foi adicionado encapsulado ao concreto por impregnação a vácuo seguindo o processo de encapsulamento descrito por Sisomphon, Coporoglu e Fraaj (2011). Alguns parâmetros do agente cicatrizante estão

de acordo com o que foi descrito na literatura, tais como, a viscosidade entre 100 e 500 mPa.s e a relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, que deve estar entre 1,60 a 3,75 (DRY, 1994 apud (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). Na Tabela 27 tem-se as especificações técnicas concedidas pelo fornecedor.

Tabela 27 – Laudo técnico - Silicato de Sódio Neutro Lote 0218

Análise	Especificação	Resultado
Aspecto	Líquido viscoso	Conforme
Densidade °Bé	Entre 38,50-41,50	39,92
Massa específica	Entre 1,37-1,42 g/cm ³	1,38
Viscosidade	Entre 250-500 mPa.s	496
Óxido de Sódio	Entre 8,0-9,20	8,43
Óxido de Silício	Entre 26,00-29,50	27,65
R (SiO_2)/(Na_2O)	Entre 3,00-3,35	3,27

Fonte: SIMOQUÍMICA (2018).

3.1.2 Procedimentos metodológicos

Seguem descritos os procedimentos alusivos a este estudo Piloto.

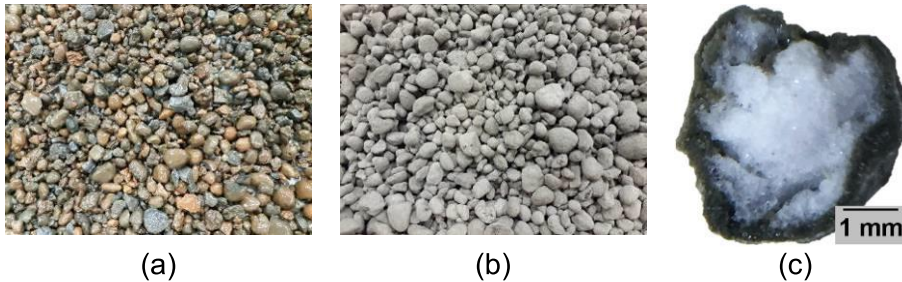
3.1.2.1 Encapsulamento dos agregados

O processo de encapsulamento foi conduzido após a separação grãos por faixa granulométrica. Para tal, o silicato de sódio foi diluído com água deionizada¹ em 50% e as cápsulas foram submersas por 6 horas na solução, a fim de prover uma pré-saturação. Após, o recipiente contendo as cápsulas de PE e a solução de silicato de sódio foi encaminhado para a câmara de vácuo por duas horas, acoplada em um dessecador de vidro, com pressão de 0,43bar. Na sequência, cobriu-se com o cimento CP V-ARI, visando sua proteção mecânica, como descrito por Sisomphon, Coporoglu e Fraaij (2011). Esse procedimento foi realizado por outros autores, como Zhang et al., (2017a), porém, esses autores utilizaram polímeros, e optou-se pelo cimento para a compatibilidade com a matriz e disponibilidade dos insumos. A Figura 40 ilustra o procedimento nas AE (a e b) e nas PE (c e d). Por fim, as cápsulas foram curadas em

¹ Devido a reduzida dimensão esperada nos poros dos materiais e elevada densidade do silicato de sódio, optou-se por essa diluição.

câmara úmida com 100% de umidade relativa do ar por 7 dias para serem empregadas na moldagem.

Figura 40 – Encapsulamento de agregado - proteção com envoltória de cimento (a) argila expandida durante o processo de encapsulamento (b) perlita expandida já revestida de cimento e (c) perlita com rompimento



3.1.2.2 Moldagem e cura

A moldagem das amostras foi realizada em formas cilíndricas (10x20 cm) e prismáticas (6x6x18 cm), e as amostras foram curadas de duas formas diferentes: em câmara úmida e submersa, ambas em ambientes controlados com temperatura de 23 ± 2 °C e de umidade relativa do ar de 95 ± 5 %. O ensaio de abatimento do concreto foi realizado conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Todos os concretos apresentaram classe de consistência S50. A moldagem das amostras seguiu a NBR 5738 (ABNT, 2015), além disso, houve a necessidade da inserção de um trecho de barra de aço CA 60 de 5 mm de diâmetro e 16,5 cm de comprimento, para que fosse possível a formação das fissuras, e não houvesse o rompimento do corpo de prova no ensaio de tração na flexão por 4 pontos. A altura total das amostras foi de 6 cm, e a barra foi inserida a 2 cm da base e 4 cm do topo.

3.1.2.3 Ensaio

Os próximos itens apresentam os ensaios realizados.

3.1.2.3.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), nas idades de 07, 28 e 84 dias, com 2 corpos de prova por idade.

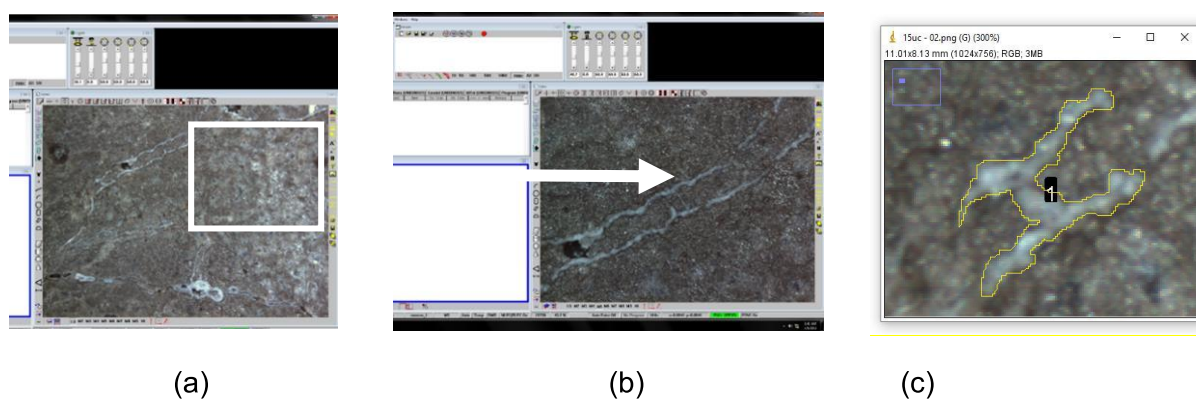
3.1.2.3.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade seguiu a RILEM TC 116 PCD nas idades de 7, 28 e 56 dias, e períodos de ensaio de 10min, 20min, 30min, 40min, 50min, 60min, 1h, 2h, 3h, 4h e 24h. A fissura foi provocada pelo ensaio de resistência à tração na flexão, NBR 12142 (ABNT, 2010), aos 7 dias. Não houve constância na tensão aplicada, sendo monitorada a formação de fissura da amostra.

3.1.2.3.3 Verificação da cicatrização

A avaliação das fissuras ocorreu através de sistema de medição óptico. Empregou-se equipamento de medição tridimensional, do laboratório de metrologia da UNISINOS, da marca Starret®, modelo Galileo AV 300+ Automático. Com o auxílio deste equipamento, foi possível gerar imagens com ampliação de 62x e 164x. Após a coleta em laboratórios, as imagens foram processadas pela ferramenta computacional “ImageJ”, desenvolvida pela RSB. A Figura 41 demonstra uma captura de tela das informações geradas pelo próprio software do equipamento.

Figura 41 – Capturas de tela geradas pelo equipamento de medição tridimensional (a) captura inicial (b) ampliação e (c) fissura e cicatrização



O processamento das imagens sucedeu as etapas a seguir:

- A.** foi calibrado o sistema com uso de uma imagem com ampliação de 62x. Com a imagem carregada, cria-se um segmento de linha em dois pontos conhecidos, através do comando *Straight Line*. Após, utilizam-se as funções “*Analyse*” > “*Set Scale*”;

- B.** escolhe-se em nova janela a relação dos pixels pela distância que a linha possui. Desta forma, no segundo campo “*Know distance*” foi inserido o valor 1 e no quarto campo “*Unit of length*” insere-se a unidade desejada, neste caso, milímetros (mm). Para finalizar a calibragem, clica-se com o botão esquerdo do *mouse* em: “*Global*” > “*OK*”;
- C.** com a escala definida, pode-se inserir as imagens das amostras. Utiliza-se as opções “*Analyse*” > “*Tools*” > “*ROI Manager*”;
- D.** uma nova janela se abre e apresenta o menu “*ROI Manager*”. Marca-se as opções “*Labels*” e “*Show All*”, feito isso, com a ferramenta (*Straight Line*) selecionada, insere-se os segmentos de linha onde deseja-se medir. No menu “*ROI Manager*”, clica-se em “*Measure*”. Um novo menu denominado “*Results*” é apresentado, com os resultados das medidas. Na coluna “*Lenght*” as medidas são exibidas. Após traçados os segmentos de linha, com o programa “*Image J*” e a ferramenta *Freehand line* verifica-se a área.

3.1.3 Resultados do Estudo Piloto A

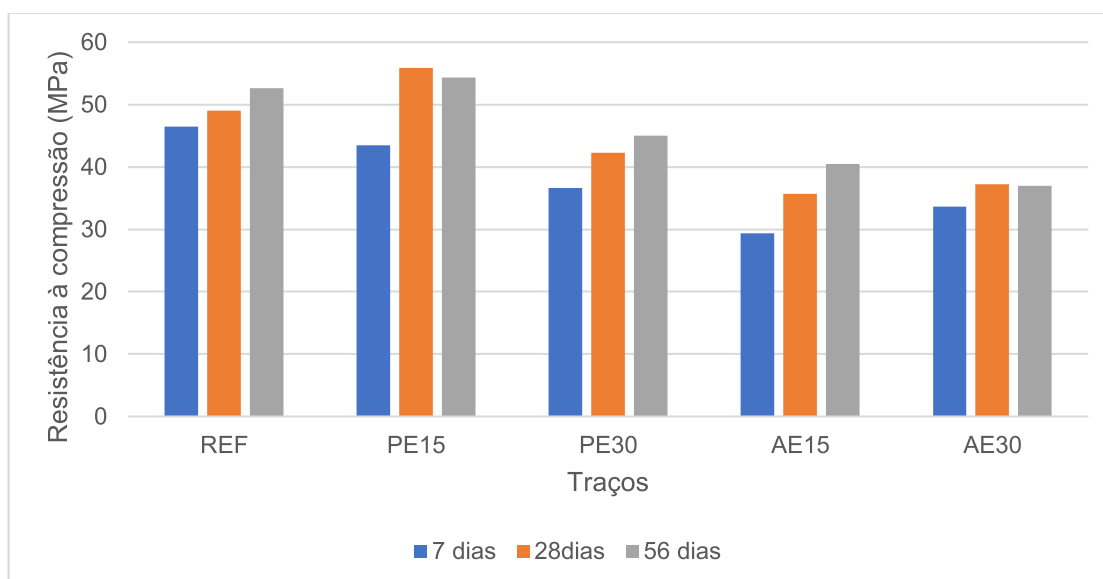
3.1.3.1 Resistência mecânica à compressão

A Tabela 28 e a Figura 42 apresentam os valores obtidos de resistência à compressão no estudo piloto. As amostras identificadas como REF contaram apenas com agregados convencionais. Utiliza-se a sigla alusiva ao agregado leve empregado seguido do seu percentual de substituição, de 15 e 30%, respectivamente.

Tabela 28 – Resistência à compressão- estudo piloto A - valores individuais e potenciais

Lote	Idade (dias)					
	7		28		84	
	Valor (MPa)	Potencial (MPa)	Valor (MPa)	Potencial (MPa)	Valor (MPa)	Potencial (MPa)
REF	46,5	46,5	48,5	49,0	52,6	52,6
	46,3		49		42,9	
PE15	40,2	43,5	51,1	55,9	52,8	54,3
	43,5		55,9		54,3	
PE30	34,8	36,6	37,6	42,3	45	45,0
	36,6		42,3		44,4	
AE15	27,2	29,4	35,7	35,7	40,5	40,5
	29,4		34,9		34,9	
AE30	32,1	33,6	37,2	37,2	37	37,0
	33,6		35,7		36,5	

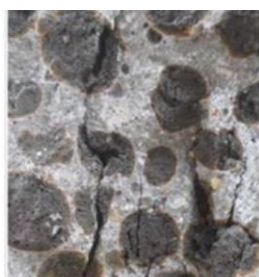
Figura 42 – Resistência à compressão- estudo piloto A



Como pode-se perceber através dos resultados de resistência à compressão, houve menor impacto no uso de PE em relação ao emprego de AE. Para o teor de substituição da PE de 15%, foi verificado incremento na resistência à compressão, e com teor de 30% a redução da resistência em relação ao traço de referência foi de 13%. Sengul et al., (2011) apresentaram valores que não se assemelham a esse, apontando que para substituição de 20% da PE ocorreu 50% de decaimento na resistência à compressão, sendo essa redução ainda maior em maiores teores.

Sha et al., (2018) afirmam que no uso de AE, assim como no uso de agregados graúdos convencionais, há uma tendência de acúmulo de água na periferia destes agregados, fragilizando o concreto, e reduzindo sua capacidade de resistência de carga. A ruptura apresentada pelos autores consta na Figura 43.

Figura 43 – Mecanismo de ruptura de concretos contendo AE



Nguyen et al. (2014) analisaram comparativamente o uso de xisto, pedra pomes e argila, todos esses expandidos. Percebeu-se que em relação a um concreto referência, a redução causada pelos três agregados se equivaleu, sendo de aproximadamente 30%, valor próximo ao obtido nesse trabalho. O comportamento verificado no traço contendo 30% de argila consente com o percebido por Sha et al., (2018), que afirmam que, em traços com substituição de agregados convencionais por AE, se percebeu que após 7 dias de idade houve pouca variação no ganho de resistência mecânica à compressão.

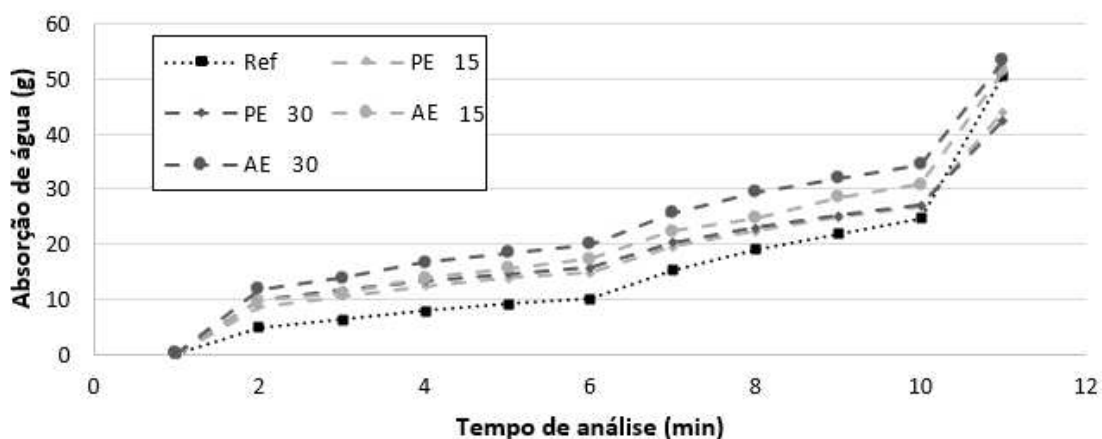
3.1.3.2 Absorção de água por capilaridade

A Tabela 29 apresenta um comparativo da média aritmética da absorção de água por capilaridade das amostras com idade de 7 dias (referência) e após a provocação das fissuras, nas idades de 28 e 56 dias. A Figura 44 apresenta os valores obtidos aos 28 dias.

Tabela 29 – Absorção de água por capilaridade do estudo piloto A (g)

t	REFERÊNCIA			PE 15			PE 30			AE 15			AE 30		
	Idade de análise (dias)			Idade de análise (dias)			Idade de análise (dias)			Idade de análise (dias)			Idade de análise (dias)		
	7	28	56	7	28	56	7	28	56	7	28	56	7	28	56
Zero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10min	5,2	4,7	1,9	13,0	8,7	8,4	15,8	9,8	9,4	17,2	9,8	10,1	17,8	11,8	12,6
20min	7,4	6,5	3,3	16,4	10,6	10,3	19,2	11,6	11,9	19,9	11,2	12,5	20,5	13,8	16,3
30min	9,0	7,8	4,7	19,0	12,5	12,9	21,3	13,3	14,4	21,7	13,9	15,9	22,4	16,7	19,1
40min	10,0	9,2	5,5	21,4	13,9	14,4	23,7	14,7	15,9	24,6	15,6	17,9	25,4	18,3	21,2
50min	11,0	10,1	6,4	23,5	14,9	15,5	26,0	15,7	17,5	26,9	17,3	19,4	27,8	20,0	22,6
1 h	14,9	15,3	11,2	33,8	19,5	21,5	35,8	20,2	25,0	37,6	22,3	25,8	39,0	25,6	30,4
2 h	17,2	19,1	13,9	40,3	22,4	25,8	42,6	22,9	29,0	44,3	24,7	29,3	45,6	29,4	36,4
3 h	19,1	21,7	15,7	45,3	24,8	28,4	46,4	25,2	32,2	49,9	28,5	33,1	51,2	32,0	39,5
4 h	20,5	24,5	17,4	50,0	26,8	31,4	50,6	27,2	34,9	55,1	30,9	36,8	56,2	34,5	42,0
24 h	33,1	50,7	38,0	85,2	44,0	55,4	85,9	42,7	59,8	93,9	51,4	57,1	88,9	53,4	59,2

Figura 44 – Absorção capilar de água (g) aos 28 dias, no estudo piloto A



Considerando-se o emprego de agregados leves e porosos, esperava-se o acréscimo da absorção de água nas matrizes, o que foi comprovado pelos resultados apresentados. Percebe-se, em todos os traços, que houve um comportamento semelhante e comum entre matrizes de concreto, indicando uma primeira etapa de absorção inicial e na sequência, uma saturação. Mesmo com a envoltória dos agregados com cimento, há indícios de que o agregado leve tenha apresentado relevante participação na absorção de água dos traços, comparando com a amostra referência.

Ao analisar as amostras identificadas com PE e AE, denota-se que a utilização de PE nos traços conduziu a uma menor absorção de água em relação ao uso de AE. Analisando os valores de densidade dos materiais, tem-se que, enquanto a PE apresenta o valor aproximado de 110kg/m^3 , a AE é entre 600 e 850kg/m^3 . Não pode-se atribuir a maior absorção por capilaridade da AE em função de seu índice de vazios ou reduzida massa específica, mas sim, a relação com o impacto de seu uso no traço, influenciando no empacotamento dos grãos. Tais resultados concordam com o obtido em termos de resistência mecânica à compressão, uma vez que os traços com PE tiveram comportamento superior, em decorrência também da redução dos vazios.

3.1.3.3 Análise da cicatrização das fissuras através de microscópio óptico

A Tabela 30 apresenta uma síntese dos resultados obtidos de cicatrização das fissuras, considerando os valores potenciais para cada caso e condição de cura. Nesse estudo optou-se pela mensuração da área da fissura e não de sua abertura (largura).

Tabela 30 – Cicatrização das fissuras- Estudo piloto A

Amostra	Condição de cura	Abertura de fissura inicial (mm ²)	Cicatrização (mm ²)		Percentual cicatrizado (%)	
			28 dias	56 dias	28 dias	56 dias
REF	Úmida	0,085	0	0,033	0,00	38,8
	Úmida	0,16	0	0,075	0,00	46,9
PE15	Úmida	0,066	0,038	0,038	57,6	57,6
	Úmida	0,092	0,079	0,082	85,9	89,1
	Submersa	0,125	0,076	0,125	60,8	100
	Submersa	0,141	0,118	0,134	83,7	95,0
PE30	Úmida	0,109	0,106	0,109	97,3	100
	Úmida	0,106	0	0,088	0,0	83,0
	Submersa	0,056	0,056	0,056	100	100
	Submersa	0,201	0	0,172	0,0	85,6
AE15	Úmida	0,137	0	0,047	0,0	34,3
	Úmida	0,095	0	0,012	0,0	12,6
	Submersa	0,036	0,025	0,032	69,4	88,9
	Submersa	0,099	0,06	0,089	60,6	90,0
AE30	Úmida	0,105	0	0,02	0,0	19,1
	Úmida	0,147	0,065	0,075	44,2	51,0
	Submersa	0,073	0,06	0,065	82,2	89,0
	Submersa	0,103	0,088	0,095	85,4	92,2

Conforme apresentado, aos 28 dias de cura algumas amostras já apontaram para a ocorrência da cicatrização, após análise pelo equipamento de medição tridimensional. A Figura 45 apresenta os indícios da cicatrização da amostra AE15, curada em condição úmida.

Figura 45 – Indícios de cicatrização da amostra AE15

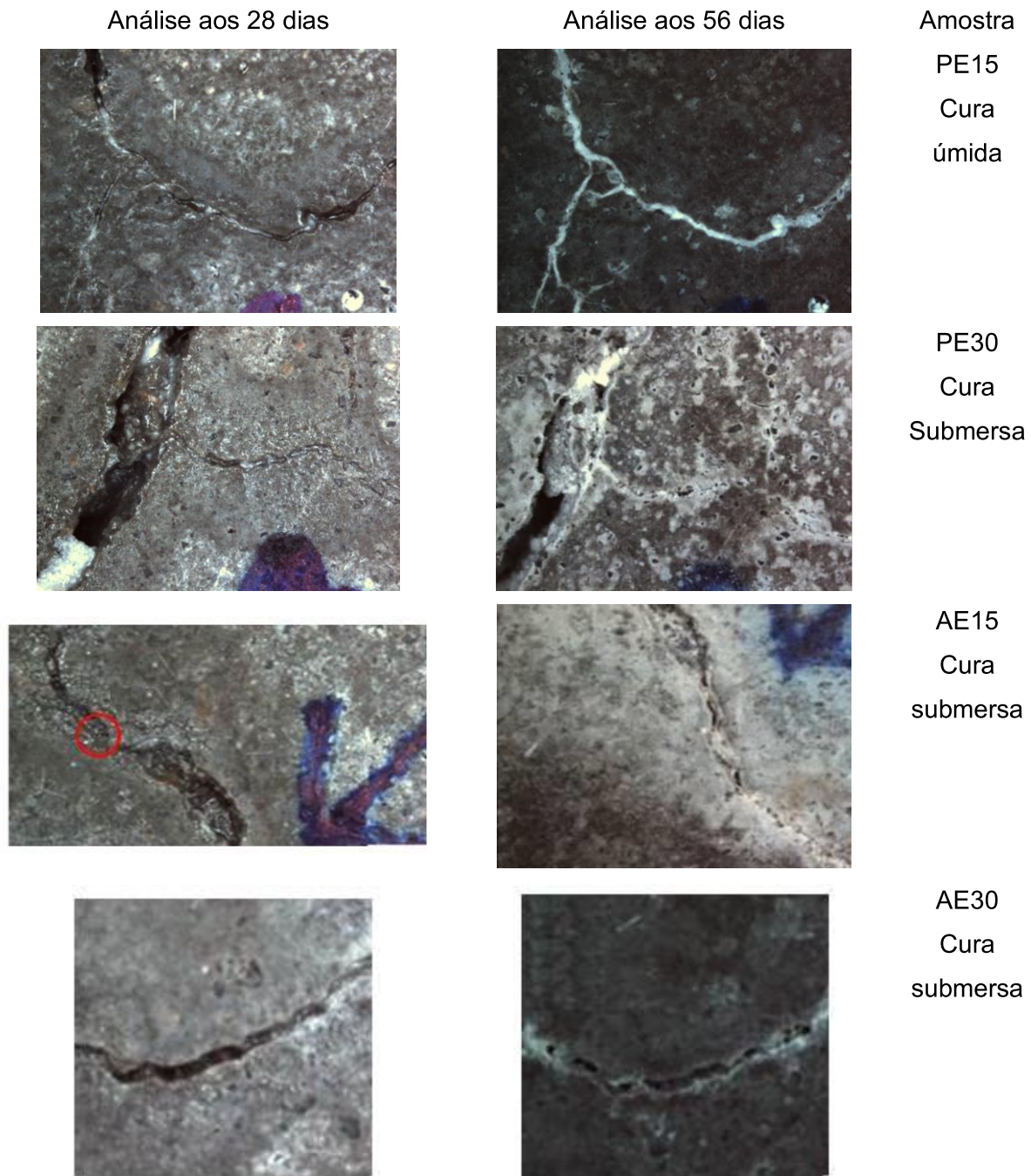


Analisando comparativamente amostras com PE, tem-se que, no percentual de 15%, houve maior influência do tipo de cura, sendo a cura submersa a que apontou

nas amostras potenciais valores muito próximos da cicatrização total, analisando a idade de 56 dias. A superioridade da cura submersa para ocorrência da cicatrização já foi apontada nos estudos de Reddy e Ravitheja (2019), Roig-Flores et al., (2015) e Sangadji et al., (2017). Com a utilização de 30% de PE, no entanto, notou-se uma maior semelhança entre os valores obtidos para as diferentes curas. Comparando os resultados obtidos com AE, tem-se que a cicatrização por PE mostrou-se mais eficaz, podendo ser um fator de influência a dimensão do agregado e a tensão necessária para sua fratura e liberação do agente cicatrizante. No estudo de Zhang et al., (2017), que também avaliou tais agregados, percebeu-se um comportamento superior da PE. Em relação ao revestimento superficial, cabe citar que os dois tipos de agregados foram submetidos ao mesmo procedimento de preparo, e assim esse fator não deve influenciar nos resultados obtidos.

Apenas em relação aos traços com utilização de AE, destaca-se que houve comportamento semelhante nos diferentes teores de uso do agregado. Para esses, notou-se como decisiva a utilização de cura submersa, uma vez que na cura úmida não houve a cicatrização de mais de 51% em nenhum dos teores. Zhang et al., (2017) realizaram procedimento semelhante ao utilizado neste estudo. Com o auxílio de equipamento de ampliação de imagem microscópico, foi realizado o controle de recuperação de quatro amostras. Seus resultados mostram que o método utilizado foi capaz de recuperar fissuras de até 0,79 mm em 28 dias. A seguir, na Figura 46, tem-se um comparativo da cicatrização de algumas amostras.

Figura 46 – Comparativo de cicatrização aos 28 e 56 dias do estudo piloto A



Percebe-se que há indícios de cicatrização no local fissurado em algumas amostras. Conforme apontado em bibliografia, o silicato de sódio reage com o CH, produto da hidratação do cimento, e produz gel de C-S-H. Esse gel preenche parcialmente a fissura e permite uma recuperação da força (YOW; ROUTH, 2006). A cicatrização visual aponta para a possibilidade de ocorrência do fenômeno, sendo pertinente destacar que uma análise química pode complementar tal hipótese.

Observou-se, através dos resultados, assim como no estudo de Alghamri, Kanellopoulos; Al-Tabbaa (2016) o caráter progressivo da cicatrização, evoluindo de pontual para contínua ao longo das idades de análise. Os referidos autores também apontam que os resultados demonstraram que os principais mecanismos de autocura são a reação entre os cátions de cálcio e o silicato de sódio dissolvido e a cristalização do silicato de sódio.

Notou-se que não houve linearidade na recuperação da fissura. Van Tittelboom e De Belie (2013) salientam que esse fenômeno pode ocorrer, pois a cicatrização ocorre quando há disponibilidade de material, não havendo o fechamento da fissura o agregado não absorveu quantidade suficiente do composto químico, ou o agregado não fissurou para liberá-lo.

Vale salientar que o concreto com uso de AE fissura no agregado e não na zona de transição, pois a resistência à tração nos agregados leves é mais afetada que a resistência à compressão, sendo esta relação inversamente proporcional ao tamanho do grão (ROSSIGNOLO, 2009a). Desta forma, se a fissura ocorreu em um local de grãos menores, possivelmente o rompimento não ocorreu e o silicato de sódio não entrou em contato com a fissura, possibilitando a formação dos produtos de regeneração. Nota-se que algumas amostras obtiveram bons resultados frente à recuperação da fissura, sendo que em alguns casos não se percebeu mais a presença de fissura superficialmente, ficando todo o espaço preenchido pelo composto químico.

A maior cicatrização verificada em partículas de PE concorda com o estudo de Zhang et al., (2017a). Tais autores afirmam que a estrutura porosa das perlitas permite que exista fornecimento de água e de oxigênio para a atuação quando do uso de soluções bacterianas, ou ainda, que permita maior fluidez quando do uso de soluções químicas, objeto de análise desse estudo piloto.

3.1.4 Considerações sobre o estudo piloto A

Finalizado o estudo piloto A, puderam ser feitas as seguintes considerações:

- a) a estrutura da PE, ao comparar-se com a da AE, apresenta mais vazios, e assim, pode-se supor que seu potencial é maior para absorção e condução dos produtos de regeneração empregados. Destaca-se aqui, que a amostra submetida ao MEV da AE não foi fraturada, sendo vista apenas a superfície;

- b) a cicatrização apresentou maior eficiência nos traços no qual o agregado natural foi substituído pela PE, sendo também esse agregado leve que menos impactou na matriz, com perda máxima de resistência de 78,7% (PE30 aos 7 dias) em relação à redução de 63,2% (AE15 aos 7 dias) do traço com AE;
- c) a medição da área pode não ser o procedimento adequado, uma vez que percebe-se em alguns pontos a cicatrização não contínua, ocorrendo isoladamente no material, podendo ser vantajosa a medição pela espessura máxima cicatrizada, percebida como de comparação mais frequente entre os pesquisadores;
- d) a dispersão da PE para cobrir com o cimento deve ser feita em pequenas quantidades, uma vez que há uma tendência a formação de grumos, ou acúmulos do material.

3.2 ESTUDO PILOTO B - OBTENÇÃO DA CURVA DE CRESCIMENTO DA *BACILLUS SUBTILIS* AP91 E VERIFICAÇÃO DO IMPACTO DA CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO BACTERIANA

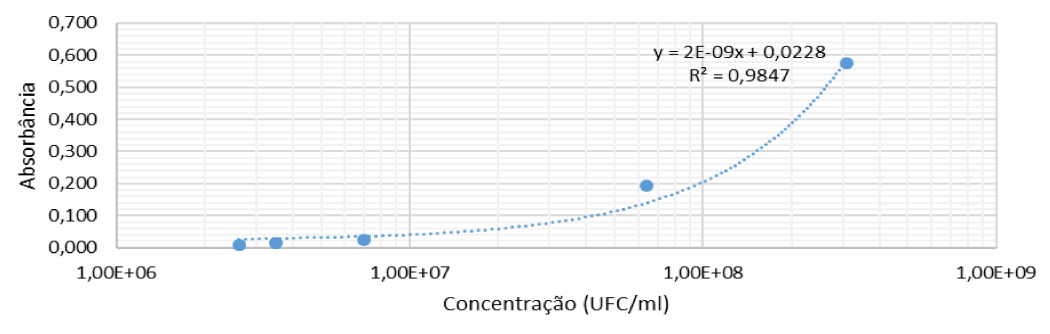
3.2.1 Procedimentos metodológicos para cultivo da solução bacteriana

Para promover a regeneração do concreto através de um método biológico, foi utilizada a bactéria *B subtilis* AP 91. A escolha levou em consideração estudos já realizados nacionalmente que provaram a capacidade de formação de calcita com essa bactéria (SCHWANTES-CEZARIO et al., 2017; SCHWANTES-CEZARIO; NOGUEIRA; TORALLES, 2017; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018a; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018b; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2019)

O material foi fornecido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), para uso exclusivo dessa pesquisa. Como o material para uso foi oriundo da base de dados nacional, não há necessidade de realizar sua caracterização. Os procedimentos envolvendo o preparo da solução bacteriana são apresentados no apêndice A.

A curva traçada é apresentada na Figura 47.

Figura 47 – Curva de crescimento *Bacillus Subtilis* AP91
Comportamento espectrofotométrico de *Bacillus subtilis* AP 91



A equação apresentada na Figura 47 tem a absorbância (A_{600}) uma grandeza adimensional e a concentração (C), apresentada em UFC/mL. O valor do coeficiente de determinação do modelo em relação aos valores de laboratório é igual a 0,9847.

Esse coeficiente indica uma grande pertinência dos pontos. Foi possível perceber que as concentrações observadas nos pontos de análise variaram entre 10^6 e 10^9 UFC/mol. Considerando tais pontos, é possível obter soluções diferentes e seu volume para uso no concreto. Cabe destacar que as concentrações de soluções bacterianas obtidas se assemelham a aquelas trazidas por Vijay, Murmu e Deo (2017) e apresentadas na Tabela 9.

A equação obtida nesse estudo difere da obtida por Schwantes et al., (2017). As autoras citam que seu procedimento foi baseado em Ramachandran, Ramakrishnan e Bang (2001) e leva em consideração a concentração da solução bacteriana e a leitura realizada em espectrofotômetro. O método dos autores citados considera a utilização de bactérias do tipo *Bacillus pausterri* ATCC 11859 e *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853. Assim, tem-se que o procedimento pode não ser adequado para a bactéria utilizada, pois, conforme Madigan et al., (2016), cada espécie apresenta uma curva de crescimento específica. Além disso, a diferença entre os estudos pode ser decorrente de variações dos equipamentos empregados. Mesmo com dissemelhança com o estudo citado, devido ao coeficiente de correlação encontrado, pode-se atribuir confiabilidade aos valores obtidos.

3.2.2 Análise comparativa da concentração da solução bacteriana

Não há um consenso nos mais diversos estudos sobre a concentração da solução bacteriana quando do uso de *B. Subtilis* visando a eficiência da autocicatrização. Avaliou-se mesma matriz de argamassa contou com três diferentes concentrações de solução bacteriana encapsulada em agregados de PE, verificada como de desempenho superior no estudo piloto A.

3.2.2.1 Seleção dos materiais

Como cimento empregou-se o CP-II- F- 40, por não conter adições pozolânicas. O cimento foi caracterizado pelo procedimento de granulometria a laser, utilizando como fluido álcool isopropílico e o equipamento Microtrac, modelo S3500. Foi realizado ensaio de área de superfície por isoterma Brunauer, Emmett e Teller (BET). Para tal, empregou-se o equipamento TriStar Plus, da marca Micromeritics. Para sua análise, contou-se com o software MicroActive for TriStar II Plus 2.02. Para o ensaio, a amostra foi preparada com temperatura de 200 °C por 24 horas e a vácuo. Foi ainda realizado ensaio de massa específica pelo método do picnômetro, com uso de gás hélio. Os equipamentos para os ensaios de BET, massa específica e de granulometria a laser pertencem ao LCVMat- Laboratório de Caracterização e valorização dos materiais - UNISINOS.

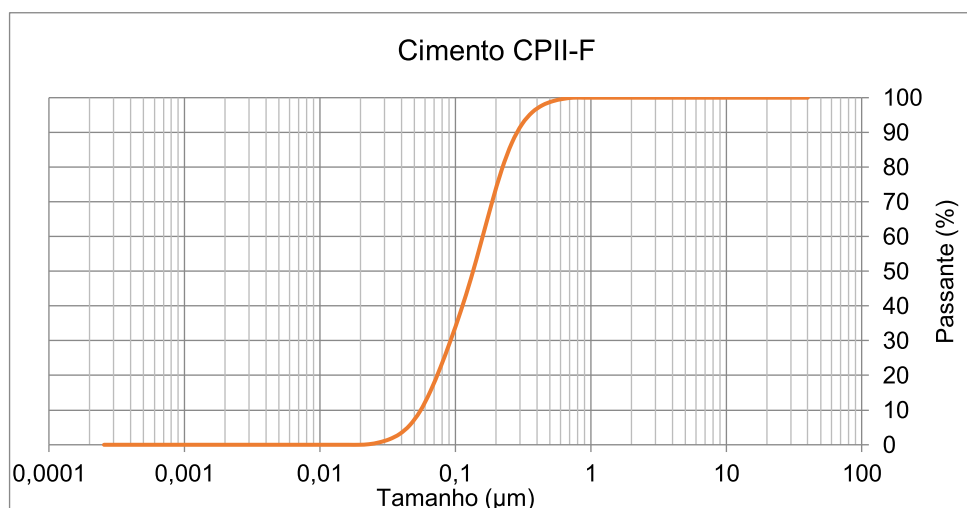
Os resultados de granulometria do cimento são apresentados na Figura 48. As características informadas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 31. Empregou-se o laudo com os resultados médios do mês de março de 2019, quando o cimento foi coletado na usina fornecedora de concreto. A massa específica obtida foi 3,0049 g/cm³. A área superficial obtida pela técnica de BET foi de 2.0474 ± 0.0085 m²/g. Os diâmetros equivalentes do cimento foram de D10 13,08µm, D50 de 46,34 µm e D90 de 87,99 µm.

Tabela 31 – Propriedades e requisitos do cimento

Parâmetro	Requisito conforme NBR 16697 (ABNT, 2018)	Valor obtido- laudo de março/2019
Tempo de início de pega (horas)	≥ 1	3,12
MgO (%)	-	2,76
Perda ao fogo (%)	$\leq 12,5$	6,13
Resíduo insolúvel (%)	$\leq 7,5$	0,94
SO ₃ (%)	$\leq 4,5$	3,13
Resistência à compressão (MPa) 1 dia		23,70
Resistência à compressão (MPa) 3 dias	≥ 15	38,90
Resistência à compressão (MPa) 7 dias	≥ 25	44,90
Resistência à compressão (MPa) 28 dias	≥ 40	52,70

Fonte: Fabricante (2019)

Figura 48 – Distribuição granulométrica do cimento- CP-II-F-40



Como agregado miúdo, foi utilizada areia quartzosa extraída de rios. Para sua caracterização foram realizados os ensaios de massa unitária, massa específica e composição granulométrica, de acordo com os procedimentos das normas ABNT NBR NM45 (ABNT, 2006), NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 248 (ABNT, 2003), respectivamente, sendo os resultados apresentados na Tabela 32. A distribuição granulométrica obtida é apresentada na

Tabela 33. A dimensão máxima característica foi de 2,36 mm e o módulo de finura de 2,04.

Tabela 32 – Características do agregado natural miúdo

Propriedade avaliada	Valor médio obtido
Massa específica do agregado seco [g/cm ³]	2,52
Massa específica do agregado saturado com superfície seca [g/cm ³]	2,57
Massa específica aparente do agregado [g/cm ³]	2,66
Absorção de água [%]	3,41

Tabela 33 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

N	Peneira	% retida média	% retida acumulada	% passada acumulada
	mm			
4	4.8	0,89	1	99
8	2.4	2,83	4	96
16	1.2	7,73	11	89
30	0.6	12,73	24	76
50	0.3	41,51	66	34
100	0.15	29,84	96	4
Fundo		4,46	100	0
Total		100,00		

Como agregado para encapsulamento, empregou-se a mesma PE apresentada no item 3.1.1.3.1, porém, limitando a utilização para grãos entre as dimensões de 2,4 e 4,8 mm. Nesse estudo, diferentemente do piloto A, mensurou-se a diferença de massa da perlita no seu estado natural, de 94,36 kg/m³, e após o encapsulamento de solução bacteriana já contando com o cimento em sua envoltória, de 475,5 kg/m³.

A solução e preparo foram descritos no item 3.3.3. Seu preparo consta no Apêndice A.

3.2.2.2 Composição das amostras

O traço foi baseado no estudo de Schwantes-Cezario et al., (2017), de 1:1 (cimento:areia), em massa. Porém, adaptado para utilizar a solução bacteriana encapsulada em agregados de PE. Para tal, substitui-se 30% do volume de areia pela PE, considerando a massa unitária dos dois materiais. A massa da PE foi considerada já com a impregnação e a envoltória com grãos de cimento, uma vez que essa era a sua condição de uso na matriz. As características da matriz e a referente nomenclatura dos traços são apresentadas na Tabela 34. As perlitas foram adicionadas no

misturador do tipo argamassadeira por último, para minimizar o impacto dessa etapa em termos de possível fratura ou rompimento desses agregados.

Tabela 34 – Composição e identificação das amostras

Nomenclatura	Traço				Concentração da solução de <i>B subtilis</i>
	Cimento	Areia	Perlita	a/c	
SOL.6					3x10 ⁶ UFC/ml
SOL.7	1	0,7	0,084	0,37	3x10 ⁷ UFC/ml
SOL 8					3x10 ⁸ UFC/ml

3.2.2.3 Ensaio

Amostras de cada composição foram avaliadas em relação a sua resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 56 dias. A dimensão das amostras para este ensaio foi de 50 x 100 mm, seguindo a norma NBR 7215 (ABNT, 2019). Em cada idade de análise foram ensaiadas 3 amostras.

Realizou-se ensaio de absorção capilar, seguindo os procedimentos da RILEM TC 116-PCD (1999), aos 42 dias, nos períodos citados no item 3.1.2.3.2. Após a realização do ensaio, foi feita uma completa lixiviação das amostras com ácido clorídrico, afim de retirar qualquer produto de cicatrização depositado nas fissuras, comparando os resultados com e sem os produtos de cicatrização.

Para verificação da eficácia de cicatrização empregaram-se amostras prismáticas com dimensões de 4x4x16cm. Assim como no estudo piloto A, tais amostras contaram com a inserção de barra de aço, sendo avaliadas sempre três amostras por idade. A cura empregada foi a úmida. Para fissurar as amostras foi utilizado ensaio de tração na flexão em 3 pontos. Para avaliação da cicatrização, empregou-se um microscópio SMZ-168, da Motic.

Foi realizado o ensaio de MEV somado a técnica de EDS, com o mesmo equipamento citado no item 3.1.1.3.1

Foi realizado o ensaio de microtomografia computadorizada das amostras no instituto tecnológico em ensaios e segurança funcional, itt Fuse, da UNISINOS, nas dependências do laboratório de caracterização eletroeletrônica. Tal ensaio visou a análise da distribuição da PE na matriz. Para tal, fez-se o uso de tomógrafo que realiza imagens de raio-x. Para que fosse possível a inserção da amostra no equipamento, ela foi reduzida para que apresentasse o formato cúbico com aresta de 4cm. Salienta-se que este ensaio foi realizado aos 28 dias de cura. Com o uso do software CTPRO

3D a imagem foi gerada. Na sequência, empregou-se o software Vg Studio Maxx 2.2, com as ferramentas “*Surface determination*”.

3.2.2.4 Resultados

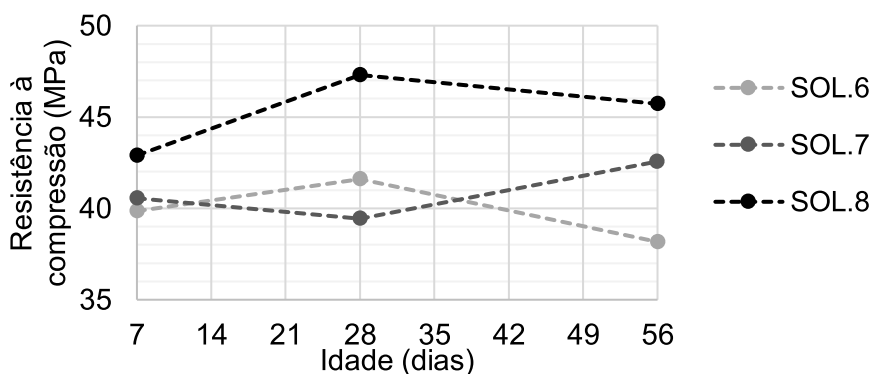
3.2.2.4.1 Resistência mecânica à compressão

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 35 em termos de seus valores potenciais e médios. A Figura 49 complementa tais resultados.

Tabela 35 – Valores obtidos de resistência à compressão – Estudo piloto B

Amostra	7 dias			28 dias			42 dias		
	Tensão (MPa)	Valor potencial (MPa)	Valor médio (MPa)	Tensão (MPa)	Valor potencial (MPa)	Valor médio (MPa)	Tensão (MPa)	Valor potencial (MPa)	Valor médio (MPa)
SOL.6.1	45,6			41,0			31,7		
SOL.6.2	31,3	45,6	39,9	43,9	43,9	41,6	43,4	43,4	38,2
SOL.6.3	42,7			39,9			39,4		
SOL.7.1	36,4			46,1			48,2		
SOL.7.2	40	45,3	40,6	39,2	46,1	39,4	47,6	48,2	42,6
SOL.7.3	45,3			33,0			31,9		
SOL8.1	46			48,1			44,0		
SOL8.2	39,8	46,0	42,9	50,6	50,6	47,3	50,1	50,1	45,7
SOL8.3	42,9			43,2			43,1		

Figura 49 – Resistência à compressão média dos traços- estudo piloto B



A resistência à compressão manteve valores semelhantes ao longo das idades de análise, dado o tipo de cimento empregado e a ausência de pozolanas. Considerando que o traço da matriz se manteve constante, não houve variações entre

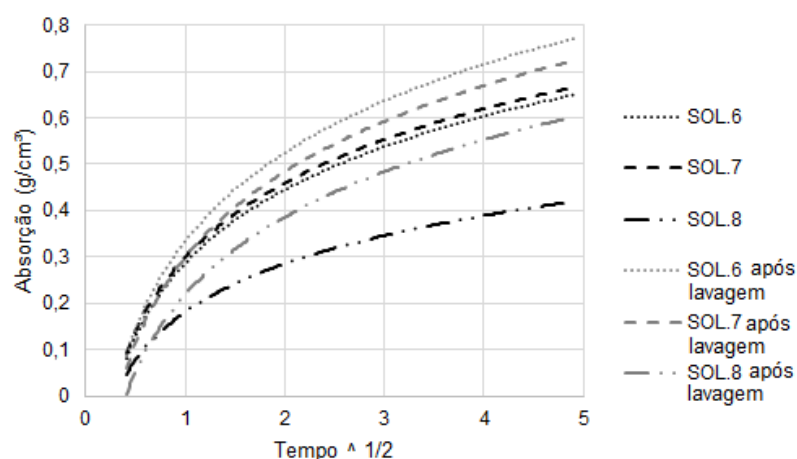
eles. O fato da matriz conter agregados leves reduz a resistência que seria obtida quando do uso de agregados convencionais (JONKERS, 2011b), e isso explica a diferença nos valores em relação ao estudo no qual o traço baseou-se de Schwantes-Cezario, Nogueira e Toralles (2017), dado que as autoras tiveram apenas acréscimo nesse parâmetro.

Também analisando diferentes concentrações de *B. subtilis*, Afifudin et al., (2011) as inseriram diretamente na água de amassamento e perceberam diferenças na resistência à compressão, o que difere desse estudo. Cabe citar, no entanto, que é provável que a inserção da PE tenha maior impacto na matriz do que alterações na solução bacteriana. Schwantes- Cezario et al., (2018), em contrapartida, verificaram através de análise estatística que tanto o traço quando as concentrações da solução apresentaram significância no parâmetro de compressão das amostras. Ainda, há indícios que os agentes apenas poderiam atuar após o rompimento das cápsulas, o que não ocorreu durante a cura do concreto. Schwantes- Cezario et al., (2017), com a mesma bactéria empregada nesse estudo, perceberam que com concentração de 10^5 esporos/ml, houve acréscimo na resistência à compressão em relação a uma matriz de referência e a formação de produtos de regeneração.

3.2.2.4.2 Absorção de água por capilaridade

A Figura 50 apresenta a absorção média obtida pelas amostras de cada uma das concentrações, após a cicatrização das microfissuras e após a remoção do produto de regeneração.

Figura 50 – Absorção média dos traços com e sem o produto de cicatrização



Através da Figura 50, analisando-se apenas os resultados obtidos de pós-cicatrização, percebeu-se que o traço cuja solução bacteriana tinha concentração de 10^8 UFC/ml apresentou a menor absorção de água após a cicatrização. Considerando que trata-se da mesma matriz, pode-se atribuir a menor absorção de água ao processo de cicatrização das amostras. Destaca-se, no entanto, que a redução entre os traços foi pequena, de aproximadamente 0,2g, o que pode ser causado até mesmo pela heterogeneidade das amostras.

Ainda pela Figura 50, é possível notar que todas as composições apresentaram alterações em relação as duas realizações do ensaio. Percebeu-se que novamente a amostra com concentração bacteriana de 10^8 UFC/ml apontou para uma maior variação. Alghamri, Kanellopoulos e Al-Tabbaa (2016b), ao encapsular silicato de sódio em agregados leves, obtiveram uma redução na absorção de suas amostras na ordem de 50%, comparado com amostras controle. Ao relacionar os resultados dos autores com os resultados deste estudo, nota-se que há similaridade na redução da absorção ao considerar o traço SOL.8. Siddique et al., (2017) utilizaram soluções imersas diretamente na matriz, e com isso, a redução da absorção capilar esteve no intervalo entre 50 e 70%.

3.2.2.4.3 Análise visual

As Figura 51 e Figura 52 apresentam verificações nas amostras SOL.6.

Figura 51 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.6- amostra 1 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (d) 42 dias

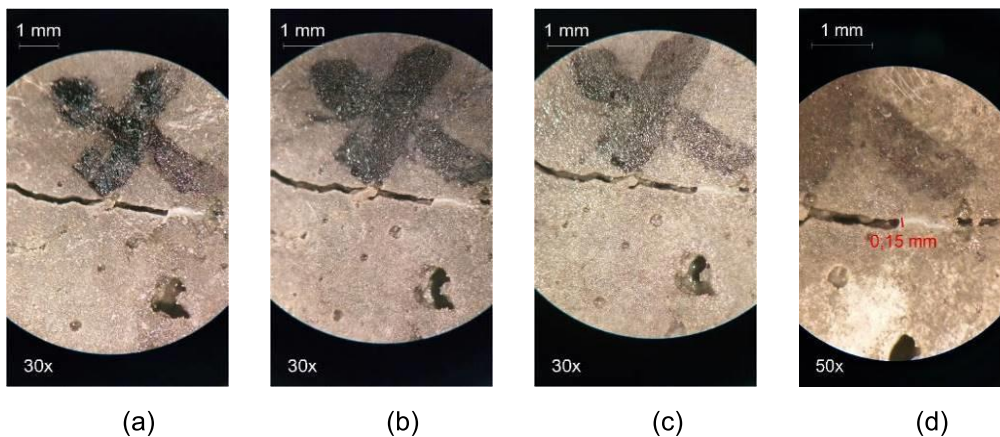
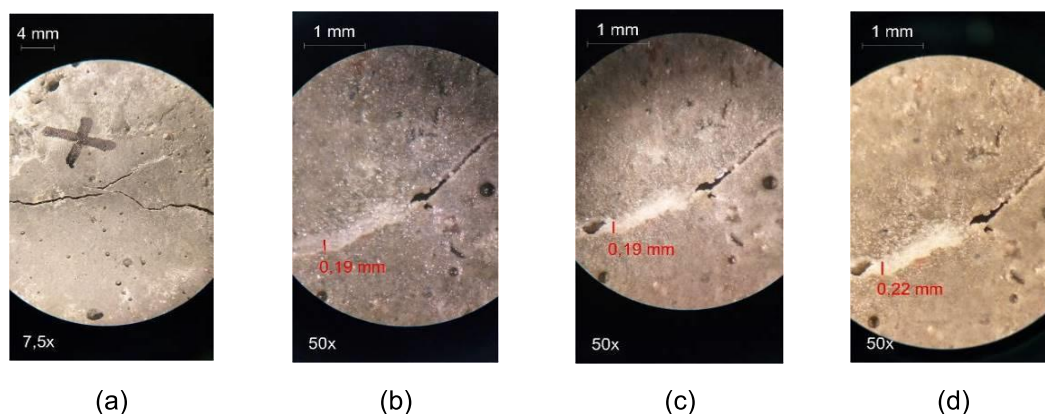
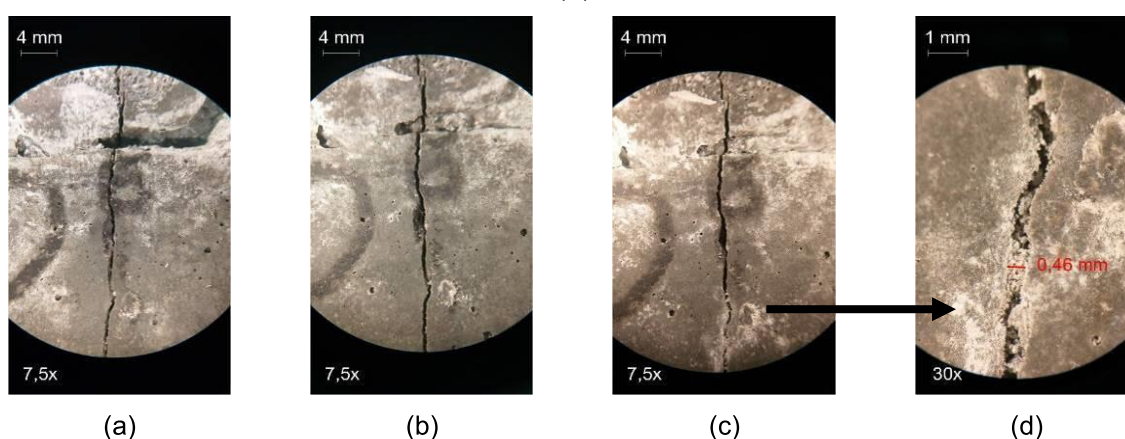


Figura 52 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.6- amostra 2 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (dias)



É possível perceber que nas amostras relatadas houve evidências de cicatrização. Já na idade de 7 dias, há pequenos registros, tendo sido tais intensificados aos 28 dias, conforme indicado nos estudos de (WANG et al., 2014a). Não se percebeu a cicatrização ao longo de toda fissura, ocorrendo apenas em um trecho. Uma ocorrência diferente foi percebida na outra amostra dessa mesma composição (Figura 53).

Figura 53 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.6- amostra 3 (a) 7 dias (b) 28 dias (c) 42 dias (d) 42 dias



Observa-se através das imagens, que a espessura máxima cicatrizada é de 0,46 mm, apontando para o valor potencial quando do emprego deste traço e concentração de solução bacteriana. Dando continuidade à apresentação dos resultados, tem-se a Figura 54 e a Figura 55.

Figura 54 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.7- amostra 1 (a) 28 dias (b) 42 dias e amostra 2 (a) 7 dias (b) 42 dias

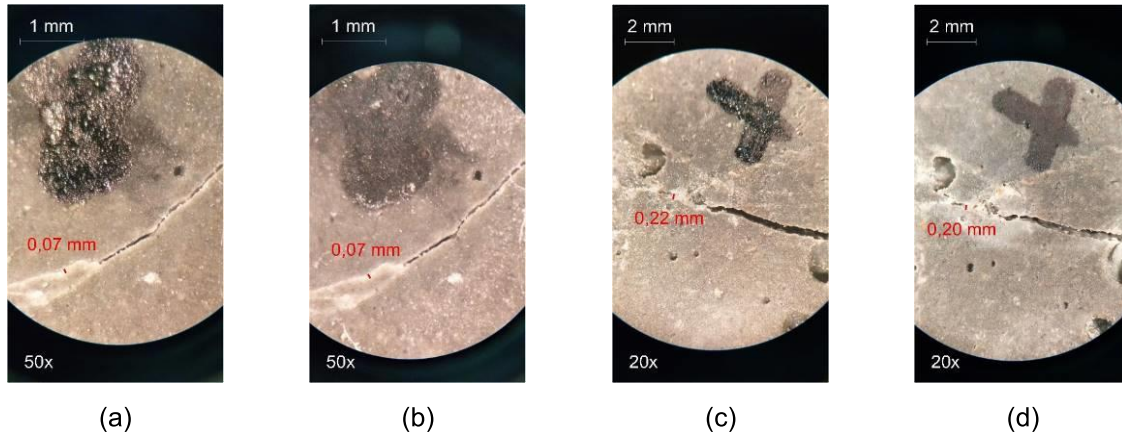
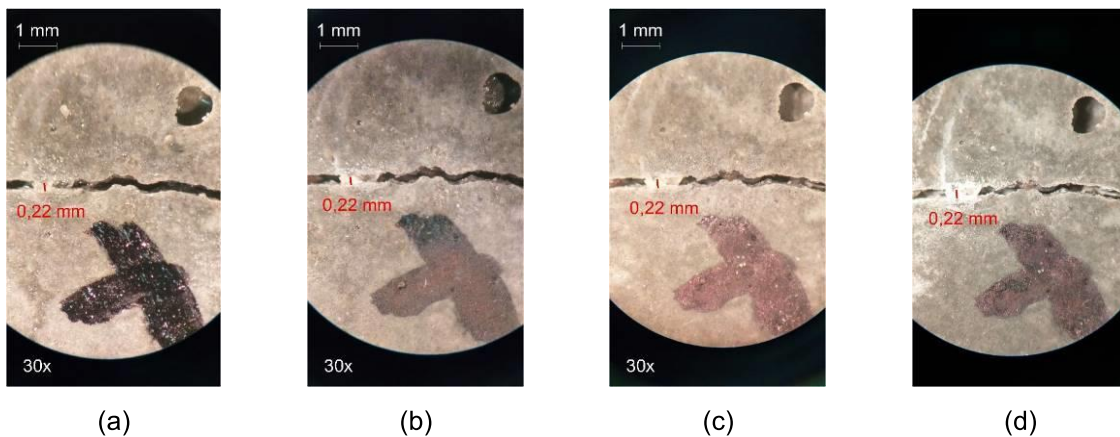
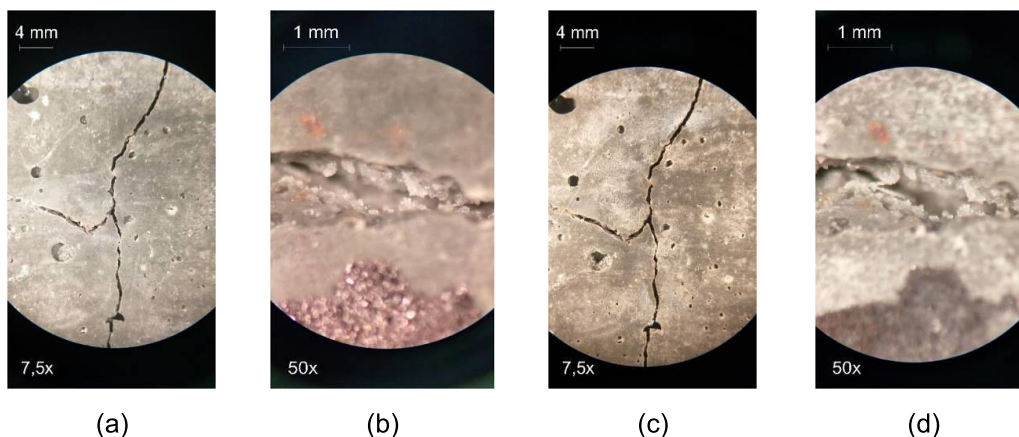


Figura 55 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.7 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias e (d) 42 dias



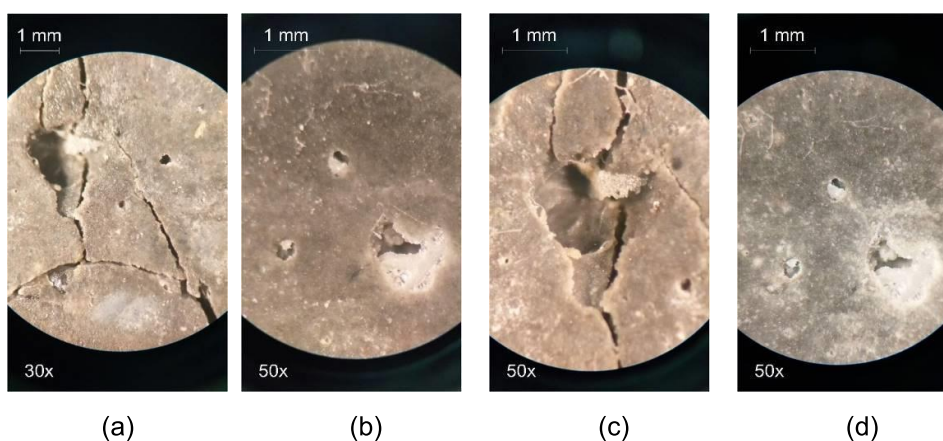
Percebeu-se novamente pequeno avanço na cicatrização na idade de 7 dias, sem avanços nas idades mais avançadas, mesmo comportamento evidenciado nas amostras do traço SOL.6. A espessura de fissura máxima cicatrizada também é inferior ao traço anterior, com um valor de 0,22 mm. A Figura 56 apresenta uma pequena cicatrização presente na fissura, e com maior aproximação (50x), se percebe o formato do produto formado nas paredes internas da fissura. Pode-se atribuir esta cristalização à provável biomineralização de carbonato de cálcio através da atuação de *Bacillus subtilis* incorporado à amostra.

Figura 56 – Precipitação cristalina em amostra do traço SOL.7 (a) 28 dias (b) 28 dias (c) 42 dias (d) 42 dias



O comportamento verificado na amostra apresentada aponta para uma formação inicial de produtos de regeneração na parede das fissuras (bordas), encaminhando-se para o centro. Tal ocorrência tem conformidade com o apontado por Khaliq e Ehsan (2016). A Figura 57 complementa a apresentação das ocorrências, indicando para uma cicatrização no formato de placas. Nesses pontos, pode ter havido influência na irregularidade da amostra permitindo acúmulo de água e com rugosidade adequada para fixação do produto de regeneração.

Figura 57 – Precipitação em “placas” em amostra do traço SOL.7 (a) 28 dias (b) 28 dias (c) 42 dias (d) 42 dias



Percebeu-se que há predominância da cicatrização pontual em relação à contínua. Esse comportamento pode ser atribuído à dispersão das PE no interior da amostra e sua disponibilidade para liberação da solução bacteriana. A cicatrização

pontual já foi relatada nos estudos de Araújo et al., (2016), Choi et al., (2017) e Roig-Flores et al., (2015), entre outros. A Figura 58 e a Figura 59 apresentadas a seguir apontam as ocorrências nas amostras do traço SOL.8.

Figura 58 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.8 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (d) 42 dias

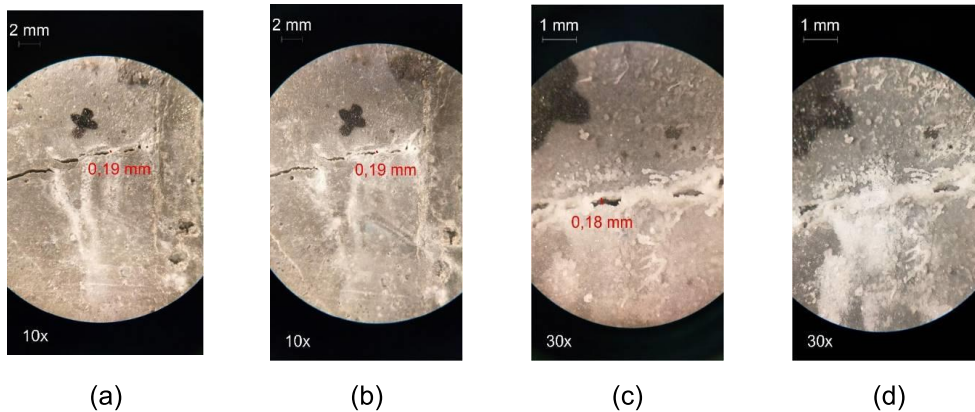
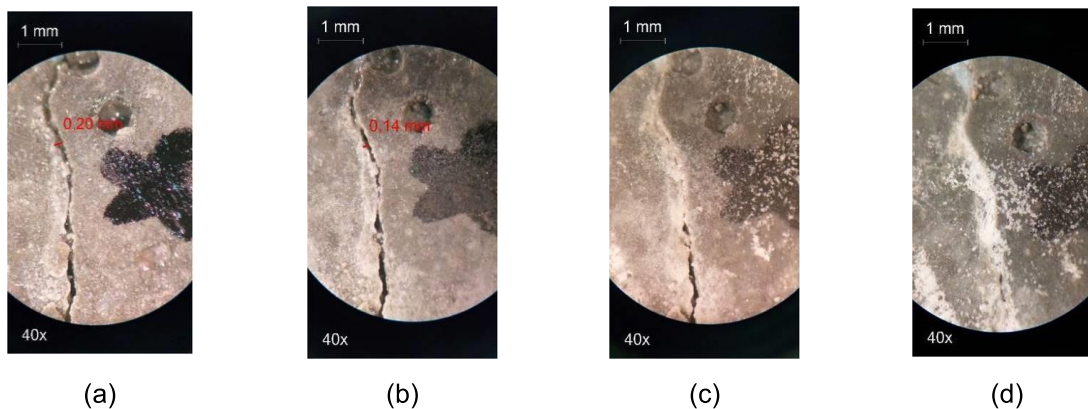
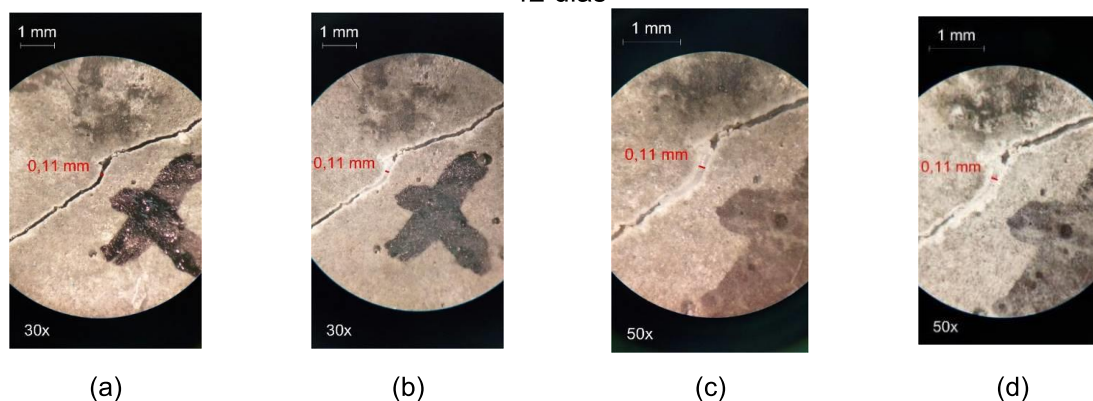


Figura 59 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.8 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (d) 42 dias



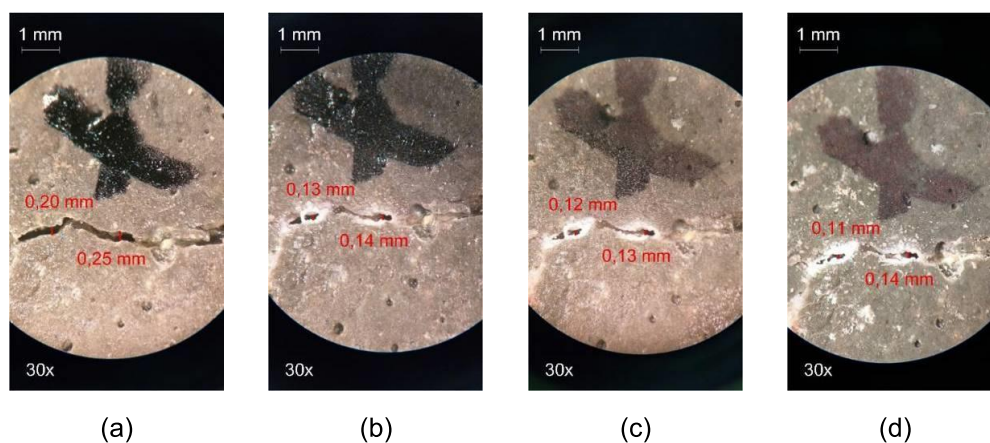
Em relação ao verificado na Figura 60, é possível perceber que há uma evolução expressiva entre as idades de 7 e 42 dias de análise. Essa contribuição ao longo do tempo foi verificada no estudo de Ahn, Kishi (2010), Alhazari et al. (2018), Alghamri; Kanellopoulos, Al-tabbaa (2016), entre outros.

Figura 60 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.8 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (d) 42 dias



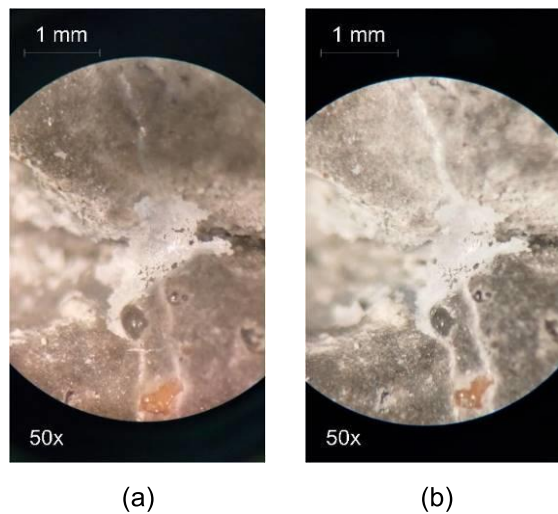
A Figura 61 apresenta outras ocorrências também de amostras com concentração de 10^8 .

Figura 61 – Autocicatrização em amostra do traço SOL.8 (a) 7 dias (b) 14 dias (c) 28 dias (d) 42 dias



De modo semelhante, ao apresentado pelas amostras do traço SOL7, nessa composição percebeu-se ao lado dos poros e irregularidades do material pequena formação de precipitado branco, em específico nas idades de 28 e 42 dias, vide Figura 69. A espessura máxima de fissura cicatrizada pelo traço foi de 0,20 mm.

Figura 62 – Precipitação em “placas” em amostra do traço SOL.8 (a) 28 dias (b) 42 dias



Em relação aos resultados obtidos, pode-se afirmar que nas diferentes composições houve semelhança no valor de espessura máxima cicatrizada, estando na faixa entre 0,20 e 0,22 mm para as amostras com concentração de 10^7 e 10^8 . Um ponto verificado com a concentração 10^6 indicou a cicatrização superior, de até 0,46 mm.

Ao analisar comparativamente com outros estudos, tem-se que Jiang et al., (2020), com uso de solução bacteriana (*Bacillus cohnii*) em PE, tiveram potencial para cicatrizar até 0,4 mm, porém, verificando que há maior eficácia em fissuras com até 0,3 mm. Já nesse estudo, conforme apontaram os resultados, as fissuras apenas apresentaram cicatrização superior quando no formato pontual.

Analisando comparativamente tais resultados com outros estudos, pode-se citar que Zhang et al., (2017) obtiveram cicatrização máxima de 0,8 mm, porém com revestimento geopolimérico. Os autores relatam que houve, no entanto, predomínio de cicatrização com fissuras de até 0,3 mm. Jiang et al., (2020) variaram a utilização de nutrientes e de materiais para proteção da envoltória de grãos de PE, chegando a cicatrização de 1,24 mm. Os autores destacam que a proteção da perlita garante sua proteção durante o lançamento e moldagem nos elementos de concreto, além disso, não permite que a água penetre em seu interior, mantendo o produto encapsulado. A Tabela 36 apresenta síntese das verificações, apontando o já citado, de que a cicatrização predominante é a pontual.

Tabela 36 – Síntese dos resultados de análise visual

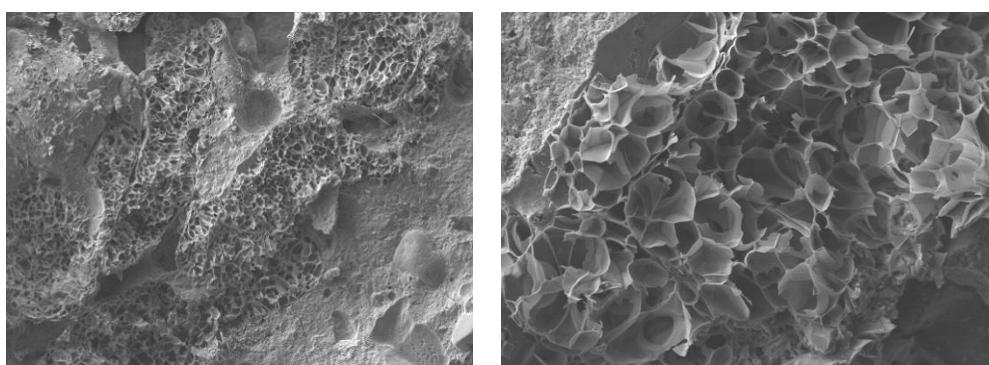
Traço	Amostra	Espessura máxima cicatrizada (mm)	Tipo
SOL.6	1	0,15	Pontual
	2	0,22	Pontual
	3	0,46 ^a	Pontual
SOL.7	1	0,07	Parcialmente contínua
	2	0,22	Pontual
	3	0,22	Pontual
	4	0,00	Início de cicatrização nas paredes
SOL.8	1	0,19	Parcialmente contínua
	2	0,20	Contínua
	3	0,11	Pontual
	4	0,11	Pontual ^b

^a Observa-se uma diferença expressiva em relação às outras amostras ^b Não houve fechamento total da espessura da fissura, o valor de espessura descrito é a diferença entre a abertura inicial e final da fissura

3.2.2.4.4 MEV associada a EDS

Foram obtidas imagens da microestrutura da matriz e da PE, apresentadas na Figura 63 e na Figura 64. Percebeu-se a disposição dos vazios no interior da PE, contrastando com a imagem gerada da matriz. Na Figura 64, pode-se atribuir as dimensões na ordem de 10 a 40 μm para os poros da PE, havendo espaço suficiente para a acomodação dos esporos de *Bacillus subtilis* AP91, considerando que os esporos desse gênero possuem diâmetro aproximado de 1 μm (JONKERS, 2011b).

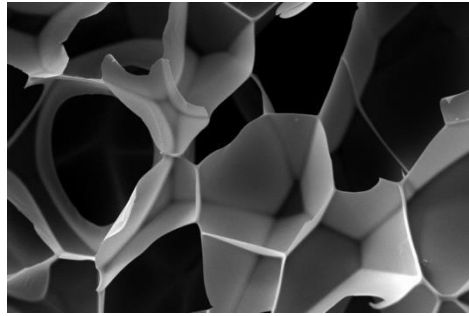
Figura 63 – MEV por elétrons secundários de um grão de PE com magnificação de (a) 100x e (b) 500x



(a)

(b)

Figura 64 – MEV de um grão rompido de PE, com magnificação de 2.000x

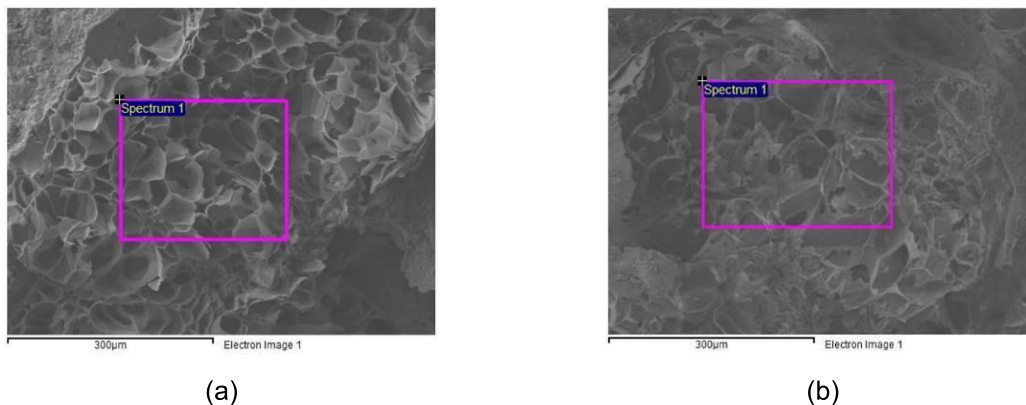


Não foram vistos esporos bacterianos na área de amostra apresentada na Figura 64. O motivo para tal pode ter sido o corte realizado na amostra para possibilitar a técnica de MEV, lixiviando a solução bacteriana. Além disso, a imagem gerada apontou para o interior da PE, podendo a solução bacteriana ter se depositado em região mais próxima à periferia.

Também, Jiang et al., (2020) realizaram microscopia eletrônica de PE impregnadas com *B. cohnii*, e, com sucesso, observaram os esporos bacterianos. Os autores relatam que a distribuição dos esporos não é homogênea dentro dos poros do agregado. Esse fato também pode corroborar para a não visualização dos esporos na MEV realizada neste estudo.

Quanto aos resultados obtidos na realização de EDS, foi possível obter o percentual, em massa, dos elementos químicos constituintes da PE. A análise foi realizada na região delimitada e apresentada pela Figura 65. Como resultado, os percentuais de cada elemento encontrado nos espectros constam na Tabela 37.

Figura 65 – Espectro analisado na EDS na PE inserida (a) na matriz e PE e (b) formato de grão



(a)

(b)

Tabela 37 – Percentuais dos elementos encontrados na amostra

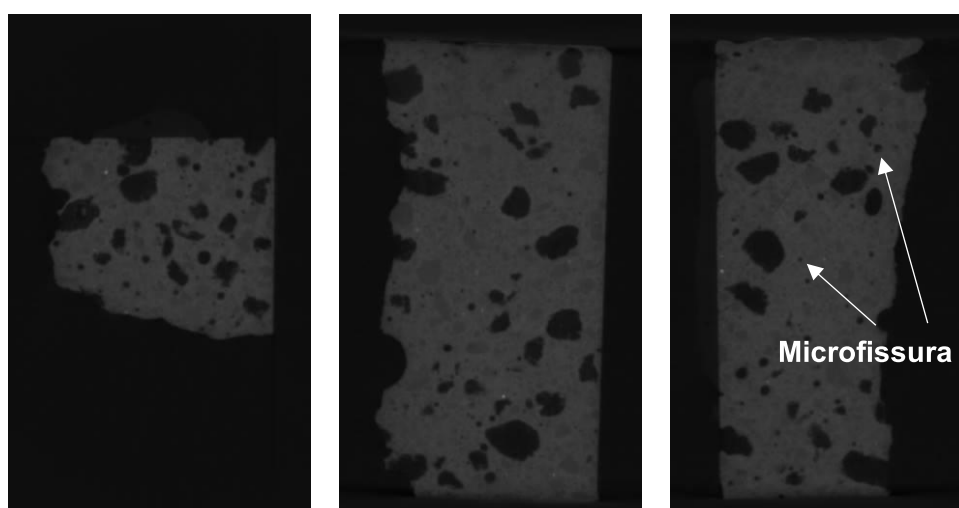
Elemento	Perlita com lactato de cálcio		Perlita grão sem solução ou revestimento	
	Peso (%)	Atômico (%)	Peso (%)	Atômico (%)
O	41,91	57,85	43,05	57,65
Na	1,96	1,88	2,27	2,12
Al	5,79	4,74	7,18	5,70
Si	33,41	26,27	40,70	31,04
K	8,57	4,84	4,76	2,61
Ca	7,09	3,91	0,62	0,33
Fe	1,26	0,50	1,41	0,54
Total	100,00		100,00	

Ao comparar a análise química entre as duas amostras, pode-se observar que a PE imersa na matriz, após encapsulamento, contém um teor até 11 vezes maior de cálcio (Ca) em sua composição. Esta observação pode destacar o lactato de cálcio absorvido no processo de encapsulamento no agregado leve.

3.2.2.4.5 Microtomografia 3D

Através de realização de microtomografia computadorizada, foi possível observar uma distribuição homogênea da perlita no interior da matriz cimentícia, conforme a Figura 66.

Figura 66 – Imagens da microtomografia nos três sentidos da amostra (a) visualização parcial da amostra (b) identificação do volume e dos poros (c) microfissura conectando grãos de PE



É possível perceber que as PE (em preto na imagem) foram dispersas aleatoriamente na matriz da amostra (identificada na cor cinza), o que é importante para que, nos eventos de fissuração, exista uma maior probabilidade de liberação do

agente regenerante. Também notou-se uma microfissura interligando diferentes grãos da PE, o que leva à maior liberação do agente cicatrizante, e melhor eficiência do processo de cicatrização.

3.2.2.5 Considerações sobre o estudo piloto B

Percebeu-se que não houve impactos na resistência à compressão quando do uso de diferentes concentrações de soluções bacterianas. Em relação à absorção de água por capilaridade, percebeu-se que ao variar a presença de cicatrização das fissuras, houve redução, de modo geral na absorção após 42 dias. Devido a não haver uma garantia no padrão da fissuração e do número de fissuras, pode-se atribuir a maior formação de produtos de regeneração ou a maior formação de cicatrização;

Em termos de cicatrização máxima, percebeu-se o potencial de 0,46 mm, atribuído à composição identificada como SOL 6. Através da análise visual, percebeu-se a formação de cicatrização não apenas na abertura de fissuras, ocorrendo ainda em superfície. Em termos do formato da cicatrização, percebeu-se predominância da cicatrização pontual em relação à ocorrência contínua.

Verificando através da MEV a microestrutura da PE na matriz, percebeu-se que há capacidade de envolver os esporos bacterianos. Pela EDS, notou maior presença de cálcio na perlita na matriz, podendo ser um indício da absorção do lactato de cálcio. Na microtomografia percebeu-se a dispersão da PE, de forma aleatória. Tal verificação propicia considerar que, durante a fissuração da matriz, faz-se provável que a fissura atinja a cápsula, rompendo-a e liberando o agente cicatrizante, permitindo sua atuação.

Definiu-se, por meio desse estudo piloto, a utilização de concentração de solução bacteriana de 3×10^6 UFC/ml pelo maior potencial obtido em termos de espessura cicatrizada.

4 MATERIAIS E MÉTODOS- PROGRAMA EXPERIMENTAL PRINCIPAL

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados no programa experimental principal dessa pesquisa. Inicialmente, de modo a sintetizar a campanha desenvolvida, a Figura 67 apresenta as variáveis contidas nesse estudo. Nessa figura, tem-se as variações em termos de mecanismo de autocicatrização, o por consumo de cimento, pozolonas, e pelo encapsulamento de soluções químicas e soluções bacterianas em perlita expandida. Para cada um destes, houve variação na forma de produção das fissuras, no tipo de cura e mecanismos de degradação. Após, foram realizados os ensaios de caracterização química, física e obtenção de imagens.

Para alcance do objetivo específico a, as matrizes foram analisadas por microscópio de alta precisão para identificar o potencial máximo de cicatrização.

As fissuras foram promovidas nas amostras através de corte mecânico e pelo ensaio mecânico de tração na flexão. Com a consideração destas variáveis atingiu-se o objetivo específico b deste trabalho.

Diversos estudos citados no capítulo 2 avaliaram a condição de cura das amostras como um ponto chave na eficiência da cicatrização, por isso foram avaliados dois ambientes de cura: a úmida e a submersa. A cura em atmosfera seca não foi avaliada, uma vez que diversos estudos já demonstraram que essa é uma barreira para o desenvolvimento dos produtos de autocicatrização. Foi garantido o alcance do objetivo específico c com a adoção desta variável.

Considerando a importância de avaliar os mecanismos de exposição do concreto em diferentes classes de agressividade, as amostras foram expostas em câmara de agressão acelerada considerando a ação do CO₂ e de íons cloreto, com concentrações de 3 e 5%, respectivamente. A análise comparativa entre as exposições foi o meio de conquista do objetivo específico d.

Para que fosse analisada a viabilidade dos métodos de autocura, foram eleitos ensaios físicos, mecânicos e de imagem, já utilizados na bibliografia no cenário nacional e internacional. A análise química dos produtos formados na região das fissuras foi feita visando analisar o mecanismo de autocicatrização e suas características de composição, conforme objetivo específico e.

Como síntese de todas as misturas propostas, apresenta-se a Tabela 38, incluindo a nomenclatura das misturas, variáveis analisadas e níveis de variação.

Figura 67 – Variáveis do programa experimental

	VARIÁVEIS DE COMPOSIÇÃO (a)	TIPOS DE FISSURAS (b)	EXPOSIÇÃO DOS TRAÇOS (c)	MECANISMOS DE AGRESSÃO (d)	ENSAIOS (e)
Uso do traço base com consumo de cimento de 300kg/m ³	Uso de diferentes mecanismos de autocicatrização	Utilização de diferentes métodos de produção de fissuras	Exposição em distintas condições de cura das amostras	Exposição a ambientes acelerados	Análise da eficácia dos métodos
	Consumo de cimento (Variável em três níveis 260, 300 e 360kg/m ³)	Corte por disco	Cura submersa	Câmara CO ₂ (exposição em câmara com concentração de 3%)	Ensaios de caracterização química
	Utilização de pozolanas (misturas contendo dois teores de cinza volante dois teores de sílica ativa em substituição ao cimento)	Ensaio mecânico de tração na flexão	Cura úmida	Câmara Cl ⁻ (exposição em câmara com concentração de 5%)	Ensaios de diagnóstico por imagem
	Uso de soluções bacterianas (agregados encapsulados à vácuo e por imersão com percentuais de 10,20 e 30% em substituição à areia)			Atmosfera neutra	
	Uso de soluções químicas (agregados encapsulados à vácuo e por imersão com percentuais de 10,20 e 30% em substituição à areia)				

Tabela 38 – Síntese das misturas - Mecanismos de autocicatrização, nomenclatura, variáveis e níveis de variação

Mecanismo de autocicatrização	Nomenclatura da mistura	Variável	Nível de variação
Consumo de cimento (CC)	CC-260	Consumo de cimento	260kg/m ³
	CC-300		300kg/m ³
	CC-360		360kg/m ³
Utilização de pozolanas (P)	PC-15	Uso de cinza volante	15%
	PC-30		30%
	PS-7,5	Uso de cinza sílica ativa	7,5%
	PS-15		15%
Encapsulamento de soluções químicas (SQ)	SQI- 10	Agregados encapsulados por imersão	10%
	SQI- 20		20%
	SQI- 30		30%
	SQV-10	Agregados encapsulados à vácuo	10%
	SQV-20		20%
	SQV-30		30%
Encapsulamento de soluções bacterianas (SB)	SBI-10	<i>Bacillus subtilis</i> (2 x 10 ⁶ UFC/ml)	10%
	SBI-20		20%
	SBI-30		30%
	SBV-10		10%
	SBV-20		20%
	SBV-30		30%

Fonte: elaborado pela autora

Conforme apresenta a Tabela 38, ao todo, foram confeccionadas 19 misturas, sendo que, em cada uma delas, foram avaliados os dois diferentes mecanismos de formação de fissura e as duas condições de cura, considerando-se ainda ambientes contendo ou não a presença de CO₂ e Cl⁻. Para que pudessem ser escolhidas as composições apresentadas na Tabela 38, foram desenvolvidos estudos piloto, descritos anteriormente e identificados como A, B e C. A Tabela 39 apresenta os traços utilizados nessa pesquisa.

Tabela 39 – Traços utilizados no programa experimental principal

Traços	Materiais e características								
	cc	a/c	α	m	a	b	cimento	pozolana	Perlita expandida
CC260	260	0,65	0,57	7,57	3,88	3,68	1,00		
CC300	300	0,60	0,57	6,36	3,20	3,17	1,00		
CC360	360	0,45	0,57	5,06	2,45	2,6	1,00		
PC15	300	0,60	0,57	6,36	3,20	3,17	0,85	0,15	
PC30	300	0,60	0,57	6,36	3,20	3,17	0,7	0,30	
PS7,5	300	0,60	0,57	6,36	3,20	3,17	0,93	0,075	
PS15	300	0,60	0,57	6,36	3,20	3,17	0,85	0,15	
SQI10	300	0,60	0,57	6,36	2,88	3,17	1,00		1,52
SQI20	300	0,60	0,57	6,36	2,56	3,17	1,00		3,05
SQI30	300	0,60	0,57	6,36	2,24	3,17	1,00		4,57
SQV10	300	0,60	0,57	6,36	2,88	3,17	1,00		1,52
SQV20	300	0,60	0,57	6,36	2,56	3,17	1,00		3,05
SQV30	300	0,60	0,57	6,36	2,24	3,17	1,00		4,57
SBI10	300	0,60	0,57	6,36	2,88	3,17	1,00		1,52
SBI20	300	0,60	0,57	6,36	2,56	3,17	1,00		3,05
SBI30	300	0,60	0,57	6,36	2,24	3,17	1,00		4,57
SBV10	300	0,60	0,57	6,36	2,88	3,17	1,00		1,52
SBV20	300	0,60	0,57	6,36	2,56	3,17	1,00		3,05
SBV30	300	0,60	0,57	6,36	2,24	3,17	1,00		4,57

4.1 VARIÁVEIS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

As variáveis são descritas nos tópicos a seguir.

4.1.1 Estudo de viabilidade de produção dos SHC

Nos próximos itens são apresentadas as variáveis analisadas em cada tipo de concreto proposto nesse estudo.

4.1.1.1 SHC com mecanismo autogênico pelo consumo de cimento

Para avaliar o potencial de cura autogênica do concreto, através das próprias partículas de cimento, foram propostos três valores de consumo de cimento, entre 260 e 360kg/m³, abrangendo a faixa de valores proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Utilizou-se os consumos previstos para as classes de agressividade ambiental I e IV,

e uma média entre as classes II e III. Para cada consumo de cimento, utilizou-se a respectiva relação água/cimento. A trabalhabilidade das misturas foi mantida em uma mesma classe, através do uso de aditivos químicos superplastificantes. O traço contou com teor de argamassa fixo, de 57%. Os materiais contidos nessas misturas foram descritos no item 4.4. Como citado, para cada traço propôs-se variação em relação ao mecanismo de fissura e tipo de cura das amostras, além dos ambientes de exposição.

Adotou-se nomenclatura abreviada referente à cada mistura para facilitar a análise e interpretação dos dados. Para as amostras analisadas pelo consumo de cimento, a sigla é CC. Os consumos foram chamados 260, 300 e 360. Por fim, as curas adotadas no programa experimental receberam a identificação como CS para cura submersa e CU para cura úmida. Para exemplificar, uma amostra chamada CC-260-CU, refere-se a uma amostra com a regeneração pelo consumo de cimento, com consumo de 260kg/m³ e cura úmida. A abreviação utilizada envolveu ainda o ambiente de exposição, sendo estes R (referência) C (para a presença de dióxido de carbono) e N (exposição à névoa salina). Os procedimentos de moldagem das amostras e cura constam no item 4.2.

4.1.1.2 SHC com mecanismo autogênico pela utilização de adições pozolânicas

Foram analisadas misturas contendo cinza volante (CV) e sílica ativa (SA), individualmente. O traço base para verificação das amostras com pozolanas foi o intermediário em termos de consumo de cimento, ou seja, com consumo de 300kg/m³. Variou-se o percentual de uso de cada uma das pozolanas em dois níveis, sendo esse percentual referente a sua substituição pelo cimento em massa combinada com volume. Os percentuais foram de 15 e 30% para CV e 7,5 e 15% para SA. Em termos de mistura, trabalhou-se com 6 composições, como apresentou a Tabela 38. Foram adotadas as abreviações: P para uso de pozolana, S para uso de SA e C para uso de CV.

4.1.1.3 SHC mecanismo autônomo - soluções químicas

Para análise do encapsulamento com soluções químicas, foram substituídos nos percentuais de 10, 20 e 30% dos agregados naturais miúdos por agregados de perlita expandida (PE), substituição em massa combinada com volume. A solução

empregada foi de silicato de sódio, com concentração de 5% e diluição de 50%. A PE contou com dois procedimentos para inserção da solução de silicato de sódio: por imersão e por imersão somada à aplicação de vácuo. Os tratamentos realizados nos agregados foram abreviados com as letras SQ referentes às soluções químicas, complementadas com a letra I para os agregados tratados por imersão e V para aqueles que contaram com a aplicação de bomba de vácuo. Após, contou-se com o procedimento de envoltória dos grãos com cimento, conforme descrito por Sisomphon; Coporoglu, Fraaij (2011). De modo a analisar as variáveis descritas foram confeccionadas 6 misturas, como apresentou a Tabela 38.

4.1.1.4 SHC mecanismo autônomo - soluções bacterianas

O emprego de soluções bacterianas ocorreu através do encapsulamento de agregados leves de perlita expandida (PE). Para tal, utilizou-se a bactéria da espécie *B subtilis* AP 91, complementadas com a letra I para os agregados tratados por imersão e V para aqueles com aplicação de vácuo. Os percentuais de substituição dos agregados pela PE foram os mesmos das composições que avaliaram as soluções químicas, de 10, 20 e 30%. Para validação da concentração da solução bacteriana foi desenvolvido o estudo piloto B já descrito.

Considerando as variáveis, houve a necessidade de 6 misturas para análise do potencial autorregenerante. Os procedimentos realizados na solução bacteriana foram descritos no estudo piloto B.

4.1.2 Fluxograma - Análises

De modo a sintetizar o procedimento realizado nas 27 amostras, cita-se que:

- Todas as amostras foram submetidas às formas de fissuração na idade de 28 dias. Nessa idade, as amostras do grupo referência foram divididas entre as curas úmida e submersa;
- As amostras restantes foram divididas entre as que foram para câmara de névoa salina e as que foram encaminhadas para o sazonalamento (28 dias) e posterior ao sazonalamento para a câmara de carbonatação;

- Após finalizar o ciclo de névoa salina e carbonatação iniciou-se o dia 1 de verificação da análise de cicatrização, também mantendo as amostras em cura úmida e submersa.

4.2 PROCEDIMENTOS PADRÃO

Os próximos itens detalham as exposições e a cura das amostras, assim como os métodos de ensaio.

4.2.1 Confeção de amostras

Foram confeccionadas amostras cilíndricas, de diâmetro 100 mm e altura de 200 mm, cujo procedimento de moldagem ocorreu conforme a ABNT NBR 5738:2015. Estes testemunhos foram empregados para o ensaio de resistência mecânica à compressão, além dos ensaios físicos (massa específica, índice de vazios e absorção total de água). Para as amostras nas quais as fissuras foram provocadas, para consequente análise da cicatrização, foram utilizadas amostras prismáticas, com dimensões de 60 mm x 60 mm e comprimento de 180 mm. As fôrmas para as amostras são metálicas e foi utilizado óleo mineral como desmoldante. A desforma de todas as amostras ocorreu 24h após a moldagem. Para que as amostras apresentassem a formação de fissuras sem que ocorresse o rompimento frágil do concreto, foram inseridas barras de aço nas amostras, como já citado, a 2cm da base da amostra. Para as amostras utilizadas para ensaios de índices físicos usou-se desmoldante à base d'água.

4.2.2 Cura

Após a desforma, 24h após a moldagem dos corpos de prova, as amostras foram encaminhadas para câmara com umidade e temperatura controlada, com os valores de $95 \pm 5\%$ e $23 \pm 2^\circ\text{C}$, respectivamente. Depois de transcorridos 28 dias, as amostras foram submetidas aos procedimentos de formação de fissuras. Após, as amostras foram conduzidas a duas condições de cura. Para a cura úmida, usou-se a mesma câmara de umidade, e para cura submersa, também nessa câmara, no

entanto, com completa imersão em água em recipientes plásticos, garantindo a saturação.

4.2.3 Caracterização dos concretos

Para caracterização mecânica dos traços, foi avaliada sua resistência à compressão através de amostras cilíndricas, sendo as idades de análise de 7, 28 e 84 dias, com três amostras. Aos 28 dias, os concretos foram caracterizados em relação a sua massa específica, absorção de água e índice de vazios, conforme a norma NBR 9778 (ABNT, 2009), também em triplicata.

4.2.4 Produção de fissuras

As fissuras foram produzidas de duas maneiras. As fissuras por ensaios mecânicos foram feitas pelo ensaio de flexão em 4 pontos, conforme a NBR 12142 (ABNT, 2015), como identificado nos programas piloto. O procedimento adotado é análogo ao utilizado por Cappellesso et al., (2016), como relatado no capítulo 2. Contou-se com equipamento prensa universal hidráulica, EMIC, com capacidade 1000kN. As amostras foram submetidas a aplicação de carga com taxa de 2mm/min e mantidas em ensaio até o surgimento da primeira fissura.

Além disso, o outro grupo de amostras teve sua fissura formada através de corte com serra e disco de corte diamantado. As amostras foram cortadas com idade de 28 dias e por via úmida. O diâmetro do disco era de 1mm.

4.2.5 Aceleração da deterioração

Os detalhes dos ensaios acelerados são apresentados nos tópicos a seguir.

4.2.5.1 Câmara de carbonatação acelerada

Para a carbonatação acelerada, adotou-se o teor de concentração de CO₂ de 3% e teor de umidade de 70%, conforme realizado por Pacheco (2016), embasando-se no estudo de Werle (2010). Também se manteve o sazonalidade e a câmara de ensaio dos referidos autores. Ainda de acordo com os ensaios realizados por Pacheco (2016), a frente de carbonatação foi de aproximadamente 3 a 6 mm, com concretos

com faixa de resistência mecânica à compressão de 20 a 30 MPa e relação a/c de 0,6. As amostras foram para a câmara com 56 dias de cura (28 dias até a fissuração e 28 dias para o sazonalamento).

4.2.5.2 Câmara de névoa salina

O ataque por íons cloreto ocorreu através de exposição das amostras em ambiente de ensaio preconizado na ASTM B117:2011. A câmara de ensaio empregou uma concentração de cloreto de sódio (NaCl) de 5%, com o ambiente saturado, temperatura interna de 35°C e pH da solução salina entre 6,5 e 7,2. Conforme Pacheco (2016), com tais características de ensaio, tem-se frente de névoa salina de, aproximadamente, 10 mm com 28 dias de exposição, considerando concretos com resistência à compressão de 20 a 30 MPa e relação a/c de 0,6. A câmara empregada é da marca Equilam, pertencente ao itt Fuse.

4.3 ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA EFICÁCIA DA CICATRIZAÇÃO

Os próximos itens apontam para os ensaios de verificação da cicatrização

4.3.1 Registro de imagens

Após a provocação de fissuras, foi utilizado o microscópio SMZ-168, da Motic, também empregado no estudo Piloto C. Na sequência da obtenção de imagens no microscópio, trabalhou-se com a sua aproximação (zoom aplicado no microscópio) e com o escalonamento em software de medição gráfica, a saber-se o Autocad™, com as ferramentas “*scale*” e “*dimension*”. Nesse estudo, optou-se por classificar as ocorrências de acordo com o que a bibliografia aponta como evidências de cicatrização, definido-se portanto as variáveis expostas na Tabela 40. Essa tabela será também aplicada na pesquisa de Ehrenbring (?)^{*1}, em andamento.

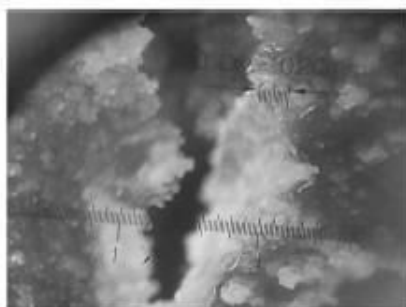
¹ Desenvolvimento de Enginered Cementitious Composites (ECC) autocicatrizantes com diferentes fibras poliméricas e agentes de cicatrização. Tese em andamento, Hinoel Zamis Ehrenbring, orientação Prof Bernardo Fonseca Tutikian- PPGE, UNISINOS.

Tabela 40 – Classificação das ocorrências na cicatrização

Abreviação	Ocorrência	Observação
PBE	precipitado na borda externa	Percebe-se produto formado na camada superior e borda externa da fissura
CP	cicatrização pontual	Definiu-se cicatrização pontual como a que ocorre com comprimento (L_f) entre 0 e $2x$ a espessura da fissura ($0 < L_f/e < 2$)
PBI	precipitado interno	Há presença de produto apenas nas paredes internas da fissura
CC	cicatrização contínua	É aquela na qual a relação entre comprimento e espessura é superior a 2 ($L_f/e \geq 2$)
CT	cicatrização total	Ocorre ao longo de toda abertura da fissura

Khaliq e Ehsan (2016) expõem a ocorrência de formação de precipitado na borda externa da fissura (PBE), através da Figura 68. Em alguns casos, há formação progressiva das bordas para o centro. Em outros casos, essa formação ocorre com apenas depósito de produto na parede da fissura.

Figura 68 – Regeneração ocorrendo das paredes para ponto central - PBE



Fonte: Khaliq; Ehsan (2016), p.102

Não há na bibliografia a definição do que é considerado como cicatrização pontual ou cicatrização contínua. Adotou-se nesse estudo uma relação entre a espessura da fissura e o comprimento da cicatrização, sendo que a cicatrização é considerada contínua quando a relação entre seu comprimento e a espessura é superior a $2x$. Nos demais casos, a cicatrização é considerada pontual, ocorrendo em pequeno trecho da amostra.

A formação pontual de produtos de cicatrização é apresentada no estudo de Hilloulin et al., (2016b) (Figura 69), tendo sido o mecanismo empregado o uso de cimento. Nessa amostra, a abertura avaliada possuía abertura de 0,30 mm.

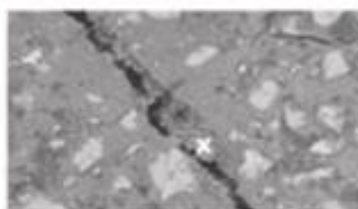
Figura 69 – Formação de produto de cicatrização no formato pontual (CP)



Fonte: Hilloulin et al., (2016)

A formação de precipitado interno também apresenta-se como uma possibilidade de ocorrência, quando o produto de regeneração é percebido apenas na parede interna da fissura, vide Figura 70, chamada de PBI nesse estudo.

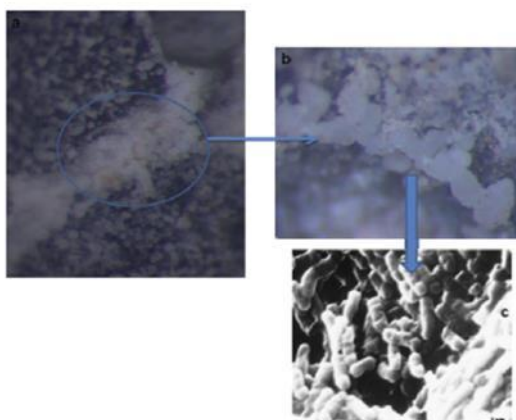
Figura 70 – Formação de produto na parede interna da fissura (PI)



Fonte: Reddy e Ravitheja (2019), p.30

Há ainda casos em que, além de ocorrer CP ou CC, pode haver formação de produto excedente à fissuração. Essa ocorrência é apresentada por Achal, Mukerjee e Reedy (2013), considerando que o mecanismo de regeneração trazido pelos autores é o evidenciado na Figura 71. Nesse estudo, tal ocorrência é tratada como CC² com depósito de produto superficial.

Figura 71 – Formação de produto de regeneração excedente à abertura da fissura

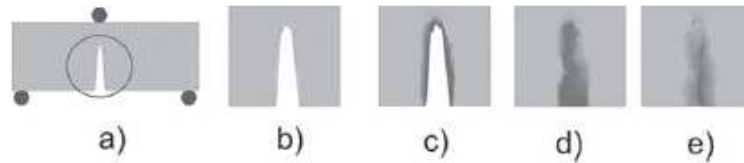


Fonte: Achal e Mujerke (2013), p.3

² Cicatrização contínua está sendo abreviada como CC, assim como o consumo de cimento, porém, apresentados em diferentes pontos, permitindo a diferenciação.

Hager et al. (2010) apresentam um croqui alusivo as etapas de formação de regeneração, conforme aponta a Figura 72.

Figura 72 – Etapas percebidas na formação de produtos de cicatrização (a) formação da fissura (b) propagação da fissura (c) formação interna de produto de cicatrização (d) maior densificação no produto (e) cicatrização completa

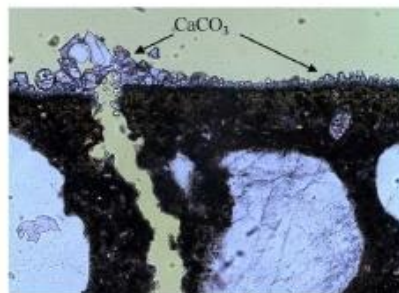


Fonte: Hager et al. (2010)

Conforme os autores, o princípio básico se dá ao longo de 5 etapas: (a) ocorre a formação da fissura (b) tem-se uma representação da fissura em volumetria (c) uma fase de formação do produto é induzida (d) ocorre o fechamento da fissura e (e) após a formação do produto ao longo da fissura há seu acúmulo em superfície.

Ainda, em relação à disposição dos produtos de regeneração na superfície, Parks et al., (2010) relatam que a formação específica de CaCO_3 pode ocorrer apenas na superfície e não na profundidade da amostra, indicando como ocorre o seu depósito.

Figura 73 – Formação de CaCO_3 na superfície da amostra



Fonte: Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2012), p.573

A abreviação de CT- cicatrização total, refere-se às fissuras em que se percebeu a continuidade da cicatrização ao longo de toda a sua abertura (percebida através de verificação macroscópica ou com ampliação de 7,5x).

Para apresentar as ocorrências em cada traço, foi elaborada tabela síntese. Optou-se por segregar cada um dos traços entre as amostras submetidas ao corte e a formação de fissuras por tração na flexão, como apresenta-se na sequência. Para

todas as amostras seguiu-se o mesmo padrão de exibição em câmara e tipo de cura, com os numerais apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Identificação das amostras e respectivas condições de exposição e cura

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Névoa salina						Cura referência						Carbonatação acelerada					
Cura submersa			Cura úmida			Cura submersa			Cura úmida			Cura submersa			Cura úmida		

Além de considerar padrão a identificação das amostras, optou-se por aplicar sempre a mesma Tabela para descrever as ocorrências. A identificação das colunas é exposta na Tabela 42. As tabelas aplicadas contam nos apêndices B,C,D e E.

Tabela 42 – Estrutura das tabelas para apresentação das ocorrências em cada traço

A	B	C				D		E	F
CP	e	% nas idades (dias)				Ponto de verificação		Classe	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		

Na coluna A, foi adotada nomenclatura padrão das amostras, o formato foi: CC260.N.CS.1, onde:

1ª identificação “CC260”: indica o traço, conforme identificação já abordada;

2ª Identificação: refere-se ao ambiente de exposição dos traços, sendo N para amostras expostas à névoa salina, R para referência e C para amostras submetidas à câmara de carbonatação;

3ª identificação: é alusiva ao tipo de cura, sendo CS cura submersa e CU cura úmida.

4ª identificação, aponta para o número da amostra, podendo, nos casos de amostras ensaiadas na tração, tal numeral ser acompanhado por letra que indica a face analisada.

A coluna B apresenta a abertura média da fissura principal (mm), sendo representada pela letra e. A coluna C é alusiva ao percentual de cicatrização nas idades (dias) e é considerada a abreviação com o símbolo % para tal. A coluna D é utilizada referente às fissuras formadas pelo ensaio de tração na flexão e conta com as abreviaturas de FP para fissura principal e FS para fissura secundária. A coluna E apresenta as classes, conforme citado nesse capítulo. A coluna F é utilizada para observações sobre o que foi verificado em cada traço.

Em termos da formação de produtos de cicatrização, cabe pontuar alguns apontamentos realizados pela bibliografia que nortearam as observações desse estudo:

- Alyousif (2016) pontua que a calcita formada pela utilização de pozolanas tem coloração branca facilmente verificada em relação à matriz de concreto. Segundo os autores, o aspecto incolor é atribuído à formação de C-S-H, que, por sua vez, tem resistência superior à calcita. Em relação ao formato dos produtos de regeneração, Hilloulin et al., (2016a) afirmam que a portlandita apresenta formato de cristal, enquanto que o C-S-H apresenta-se como *cloudy gel*;
- Escoffres, Desmettre e Charron (2018) citam que o formato de agulha é atribuído à presença de etringita, relacionando ainda o formato retangular à presença de calcita e o formato pontiagudo à aragonita;
- Conforme Mehta e Monteiro (2014), a hidratação rápida do cimento forma cristais laminares;
- A formação de CaCO_3 foi apresentada por Parks et al., (2010), com acúmulo de produtos com a geometria lamelar e de cristais.

4.3.2 Ensaio de DRX

Para análise dos produtos formados nas fissuras das amostras, foi coletado o material com auxílio de agulha esterilizada e conduzida a técnica de DRX. A análise foi realizada com intervalo de ângulo de 5 a 75°, com tempo de 1 segundo e passo de 0,05. O equipamento empregado é da marca Siemens, modelo D5000. Para interpretação do difratograma, foi utilizado o programa Expert High Score, da Phillips. O ensaio foi realizado no Itt Fossil- Instituto Tecnológico em micropaleontologia, com idade de 100 dias. As amostras analisadas constam na Tabela 43.

Tabela 43 – Amostras analisadas de cada mecanismo- DRX

Variável/Composição	Traços referentes as amostras avaliadas
Consumo de cimento	CC300 e CC360
Uso de pozolana (CV)	PC15
Uso de pozolana (SA)	PS7,5 e PS15
Solução química (I)	SQI10
Solução química (V)	SQV10 e SQV20

Solução bacteriana (I)	SBI30
Solução bacteriana (V)	SBV30

Conforme percebe-se, dos 19 traços que compõem o presente estudo, 10 foram analisadas pela DRX, visando a caracterização dos produtos.

4.3.3 Ensaio de MEV e Energia dispersiva de raios-X

O ensaio de MEV foi realizado no IIT FUSE - Instituto Tecnológico em Ensaio e Segurança Funcional, da UNISINOS. As amostras foram fraturadas de amostras prismáticas, previamente secas e metalizadas com ouro. Usou-se o microscópio eletrônico de varredura, da marca Zeiss com acoplamento do equipamento de energia dispersiva de raios-X.

4.4 MATERIAIS

Os materiais seguem descritos nos próximos itens.

4.4.1 Cimento

O cimento utilizado nesse programa experimental foi o CP-IIIF-40, tendo sua caracterização apresentada no item 3.3.1.1.

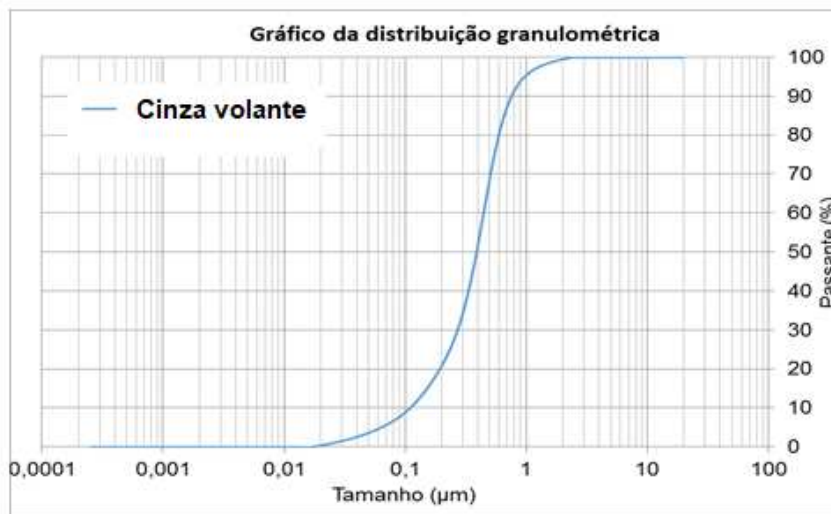
4.4.2 Adições pozolânicas

A caracterização das pozolanas envolveu a verificação da sua distribuição granulométrica, massa específica e área superficial. A distribuição granulométrica foi obtida por difração por raios laser, e foi empregado como fluido álcool isopropílico e o equipamento Microtrac, modelo S3500, até a obscuração de 10%. Foi realizado ainda ensaio de área de superfície por isoterma Brunauer, Emmett e Teller (BET). As amostras foram secas e moídas a fim de que toda a amostra correspondesse a uma fração passante na peneira de 325 Mesh.

4.4.2.1 Cinza volante

Utilizou-se CV gerada em usinas termoeletricas no Rio Grande do Sul, através da queima de carvão, cedida por empresa fornecedora de concreto. A distribuição dos grãos é apresentada na Figura 74. A massa específica obtida foi de $2,0018 \text{ g/cm}^3$. A área superficial obtida foi de $0,4737 \text{ m}^2/\text{g}$. Os diâmetros característicos desse material foram D10 de $5,5\mu\text{m}$, D50 de $13,8\mu\text{m}$ e D90 de $31,11\mu\text{m}$.

Figura 74 – Distribuição granulométrica da CV



Para análise dos valores obtidos, pode-se citar outros valores já apontados em bibliografia, como massa específica de $2,3\text{g/cm}^3$ e área superficial de $0,580\text{m}^2/\text{g}$ (LENG; FENG; LU, 2000), massa específica de $2,6 \text{ g/cm}^3$ (SANKARANARAYANNAN; JAGADESAN, 2016), massa específica de $2,4\text{g/cm}^3$ e área superficial de $0,35\text{m}^2/\text{g}$ (KUMAR; TIKE; NANDA, 2007) e área superficial de $0,565\text{m}^2/\text{g}$ (LI; ZHAO, 2003).

É possível perceber que em relação à CV apresentada pelos autores, a usada nesse estudo tem reduzida massa específica e há menor área superficial.

4.4.2.2 Sílica ativa

A SA empregada nesse estudo foi fornecida em sacos, não densificada, da empresa Silmix. A massa específica obtida foi de $2,2118 \text{ g/cm}^3$. A área superficial obtida pelo ensaio de BET foi de $17,5950 \pm 0,0401 \text{ m}^2/\text{g}$. Para esse material não foi possível realizar a análise por granulometria a laser, devido a suas reduzidas dimensões.

A SA apresentada por Sankaranarayanan e Jagadesan (2016) tem disparidade em relação à empregada nesse estudo por apresentar área superficial de $40\text{m}^2/\text{g}$. Gopi e Chamberlin (2019) utilizaram uma sílica ativa semelhante a desse estudo, apresentando massa específica de $2,2\text{g}/\text{cm}^3$ e área superficial de $20000\text{ m}^2/\text{g}$. Indica-se assim que há variação nos materiais disponíveis no mercado e que isso pode impactar na capacidade de cicatrização.

4.4.3 Agregados

Os agregados miúdos utilizados nessa pesquisa, areia e perlita, foram os mesmos descritos no estudo piloto C, e, portanto, já caracterizados no item 3.3.1.2. Como agregado graúdo, foi utilizada brita basáltica, com dimensões de agregado entre 4,8 e 12,5 mm. Do mesmo modo como para o agregado miúdo, foram realizadas as análises de caracterização preconizadas pelas normas NBR NM 45 (ABNT 2006), NBR NM 53 (ABNT, 2009) e NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados são ilustrados na Tabela 44. Tem-se a distribuição granulométrica desse agregado na

Tabela 45. A dimensão máxima característica foi de 12,5 mm.

Tabela 44 – Características dos agregados graúdos

Propriedade avaliada	Valor médio obtido
Massa específica do agregado seco [g/cm^3]	3,08
Massa específica do agregado saturado com superfície seca [g/cm^3]	2,88
Massa específica aparente do agregado [g/cm^3]	2,79
Absorção de água [%]	3,41

Tabela 45 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo

N	Peneira mm	% retida média	% retida acumulada
1/2"	12,5	0,42	0
3/8"	9,5	24,88	26
1/4"	6,3	46,88	72
4	4,8	15,94	88
	Fundo	11,88	100
	Total	100,00	

4.4.4 Soluções

A solução química utilizada nesse estudo foi abordada no estudo Piloto A e consta no item 3.1.1.4. A solução bacteriana empregada foi apresentada no estudo Piloto C, e consta no item 3.3.3.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados nesse capítulo são divididos em relação ao mecanismo avaliado de cicatrização e ao tipo de verificação.

5.1 AUTOCICATRIZAÇÃO PELO CONSUMO DE CIMENTO

Nesse item são apresentados os valores obtidos nas amostras cujo mecanismo de autocicatrização foi o autógeno pelo consumo de cimento. Os traços foram apresentados conforme a identificação apresentada na Tabela 38.

5.1.1 Resistência à compressão

A Tabela 46 apresenta os valores obtidos de resistência mecânica (f_c) à compressão, envolvendo os valores individuais, médios e indicando o valor potencial em cada composição e idade de análise. Além disso, apresentam-se na sequência, os dados de forma gráfica (vide Figura 75).

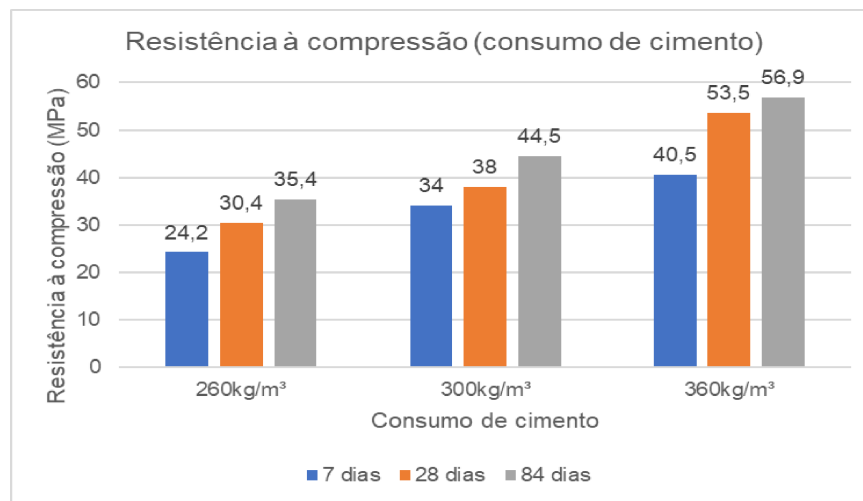
Tabela 46 – Resistência à compressão (MPa) - amostras com variável de CC

Amostra	7 dias				28 dias				84 dias			
	Tensão (MPa)	Valor pot	Valor méd	dp ³	Tensão (MPa)	Valor pot	Valor méd	dp	Tensão (MPa)	Valor pot	Valor méd	dp
CC-260.1	21,7				30,4				35,3			
CC-260.2	23,8	24,2	23,2	1,3	23,6	30,4	27,9	3,7	33,5	35,4	34,7	1,1
CC-260.3	24,2				29,6				35,4			
CC-300.1	32,4				27,6				44,0			
CC-300.2	34,0	34,0	31,0	3,9	36,9	38,0	34,2	5,7	42,4	44,5	43,6	1,1
CC-300.3	26,6				38,0				44,5			
CC-360.1	36,4				53,0				55,6			
CC-360.2	30,1	40,5	35,7	5,2	53,5	53,5	53,1	0,4	56,9	56,9	55,3	1,8
CC-360.3	40,5				52,7				53,4			

Legenda: CC260 refere-se ao traço com 260kg/m³ de consumo de cimento, e assim aplica-se para os traços CC300 e o CC360.

³ dp está sendo empregado como abreviação para desvio padrão

Figura 75 – Resistência à compressão - amostras com variável de CC - valores potenciais em MPa



Conforme percebe-se na Tabela 46, os valores obtidos de f_c indicam comportamento já relatado em bibliografia e validado nesse estudo. O maior consumo de cimento proporcionou o incremento na resistência à compressão dos concretos (ABD ELATY, 2014; VILLENA; TRICHÊS; PRUDÊNCIO, 2011). Chu (2019) obteve em seu estudo relação direta entre a resistência à compressão e o teor de pasta de concretos que continham apenas cimento como aglomerante. Em concretos com essa característica, de não conter adições pozolânicas, entende-se que o papel do consumo de cimento é também de prover melhor empacotamento das partículas, reduzindo seus vazios e proporcionando, assim, maior resistência (WASSERMANN, KATZ, BENTUR, 2008; YOUSUF, SANCHEZ E SHAMMEH, 2019).

Ainda, percebe-se que, nos traços de menor consumo de cimento (CC260 e CC300), o crescimento entre as idades de 28 e 84 dias ocorreu de modo superior ao traço contendo o consumo de 360kg/m³.

5.1.2 Índices físicos: absorção total, massa específica e índice de vazios

Os resultados obtidos de índices físicos nas amostras com variação no consumo de cimento são apresentados na Tabela 47, considerando os valores individuais e médios obtidos aos 28 dias.

Tabela 47 – Resultados dos ensaios físicos - amostras com variável de CC

Amostras	Absorção de água (%)		Índice de vazios (%)		Massa específica seca (g/cm ³)		Massa específica saturada (g/cm ³)		Massa específica real (g/cm ³)	
	indiv	média	indiv	média	indiv	média	indiv	média	Indiv.	média
CC-260.1	2,98		6,84		2,29		2,36		2,46	
CC-260.2	3,20	3,13	7,63	7,38	2,39	2,36	2,46	2,43	2,58	2,54
CC-260.3	3,21		7,67		2,39		2,46		2,59	
CC-300.1	3,63		8,38		2,31		2,39		2,52	
CC-300.2	3,39	3,35	7,76	7,74	2,29	2,31	2,36	2,39	2,48	2,50
CC-300.3	3,03		7,06		2,33		2,40		2,51	
CC-360.1	4,36		9,99		2,29		2,39		2,55	
CC-360.2	3,97	4,22	9,09	9,67	2,29	2,29	2,38	2,39	2,52	2,54
CC-360.3	4,32		9,92		2,29		2,39		2,55	

Os resultados apresentados na Tabela 47 não seguem a mesma linha de comportamento apresentada em relação à resistência mecânica à compressão. Os traços de maior consumo de cimento apresentaram maiores absorção de água e de índice de vazios, contrariando a expectativa presente em diversos estudos (IMBABI; CARRIGAN; MCKENNA, 2012; MEHTA; MONTEIRO, 2014, PACHECO, 2016; REBMANN, 2011; SHINDE; VALUNKJAR, 2015). Cabe lembrar que em tais traços não foi constante a relação a/c, seguindo as prescrições da norma NBR 6118 (ABNT, 2014). Ou seja, os traços com CC de 260, 300 e 360kg/m³ tiveram as relações a/c de 0,65, 0,6 e 0,45, respectivamente. Os consumos de água foram 169 l/m³, 180 l/m³ e 162 l/m³, o que pode justificar a menor massa específica do traço CC300.

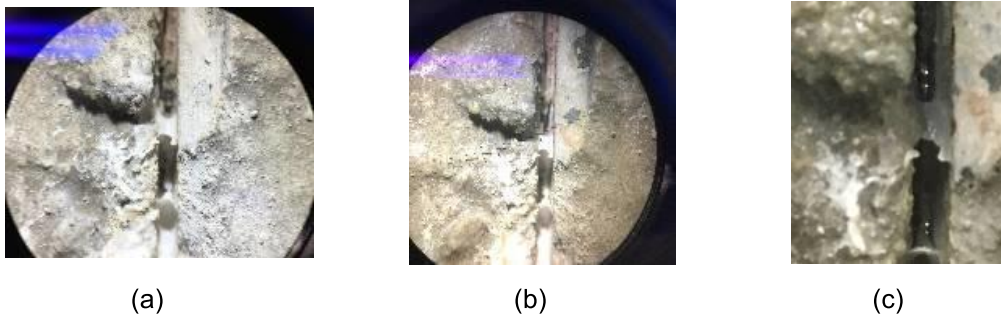
Em relação à absorção de água, cabe ser citado que não apenas a existência de vazios é suficiente para que haja a absorção de água, mas ainda, que exista conectividade entre tais vazios. Alsayed e Amjad (1996) avaliaram diferentes concretos obtendo misturas em que houve maior resistência à compressão e menor porosidade, mesmo com maior absorção de água total. No seu estudo, os autores avaliaram o uso de finos na mistura, o que causa maior densificação e assim, há menor existência de poros capilares. Os resultados apresentam semelhança com o do presente estudo, sem relação inversa entre absorção de água e consumo de cimento. Em termos de massa específica houve pequena variação em relação aos traços do presente estudo.

5.1.3 Análise visual - microscópio óptico

Os traços referentes ao consumo de cimento tem o registro de suas ocorrências apresentado no apêndice B, contendo as tabelas indicativas do percentual de cicatrização ao longo das idades de análise nas amostras. Apresentam-se os registros visuais em cada traço, e após, síntese dos resultados obtidos.

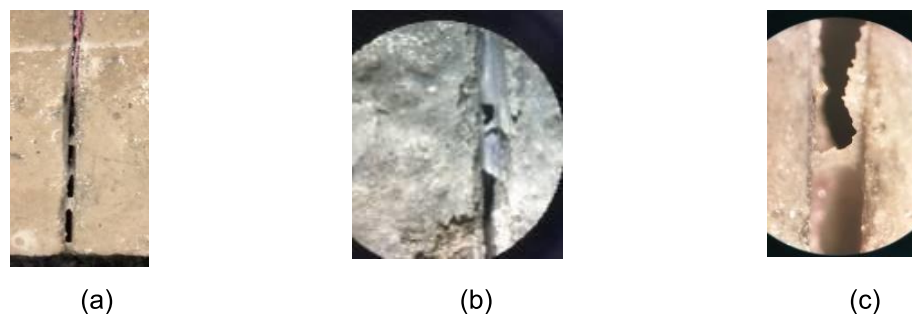
No traço CC260, referente ao consumo de cimento de 260kg/m^3 , percebeu-se nas amostras submetidas ao corte 6 ocorrências, envolvendo formação de produto na borda e cicatrização pontual, em trecho de 1,8mm. A Figura 76 apresenta a cicatrização verificada na amostra CC260.N.CU.4.

Figura 76 – Amostra CC260.N.CU.4, com corte mecânico (a) 28 dias, aprox. 10x (b) 56 dias, aprox. 7,5x e (c) 84 dias, aprox. 30x



Como percebe-se na Figura 76, houve a formação de uma lâmina de cicatrização, já aos 28 dias, e mantendo-se até os 84 dias. Entre as diferentes idades não foram percebidos avanços na cicatrização. Araújo et al., (2016) relataram ocorrências semelhantes quando do uso de polímeros, indicando que, em alguns pontos, a cicatrização se deu de modo pontual e sem avanços para cicatrização ao longo da fissura. A Figura 77 apresenta a amostra CC260.R.CS.8, que apresentou uma lâmina na fissura, de modo progressivo até os 84 dias.

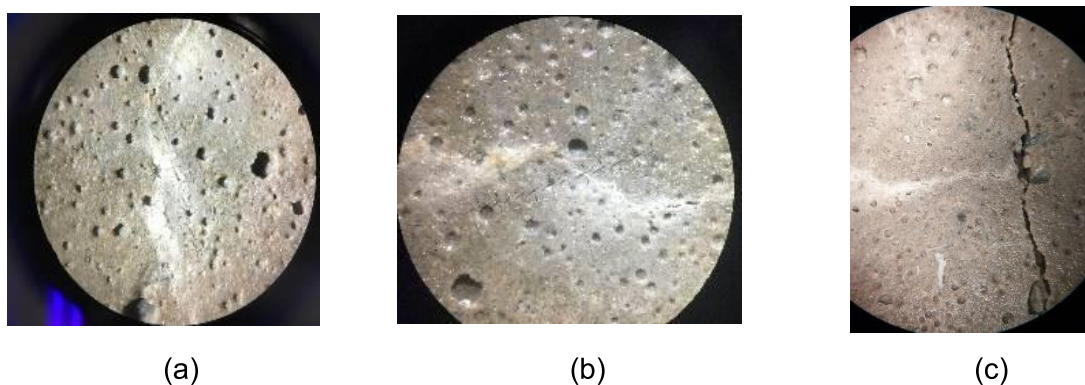
Figura 77 – Amostra CC260.R.CS.8, com corte mecânico (a) 7 dias, sem aumento (b) 28 dias, aprox. 10x e (c) 84 dias, aprox. 40x



Pode-se perceber na Figura 77 que, no trecho superior da fissura, houve a formação de produto de apenas na borda, não alcançando a espessura total, de valor médio de 1,275 mm. No entanto, essa abertura destoa das dimensões reportadas em bibliografia, e assim seria pouco provável a sua cicatrização. Autores como Al-Tabba et al., (2020), indicam o caráter progressivo da cicatrização, o que não foi percebido na amostra relatada. Outro ponto a ser destacado é que não se percebeu a formação de produtos de cicatrização na fissura em termos de profundidade. As lâminas se limitam à superfície da fissura.

Os próximos registros são referentes ao traço CC260 com a formação de fissura formada pelo ensaio mecânico de tração na flexão.

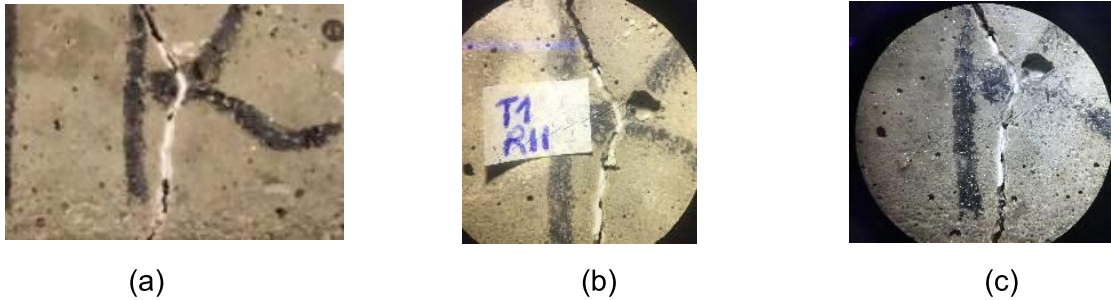
Figura 78 – Amostra CC260.N.CS.4, com fissura pelo ensaio de tração na flexão (a) 28 dias, aprox. 10x (b) 56 dias, aprox. 10x (c) 84 dias, aprox. 7,5x



Percebe-se que a referida amostra, aos 28 dias, apresentava acúmulo de produtos brancos na superfície. Verificou-se, aos 56 dias, que ainda havia tal acúmulo, porém, verificando-se o fechamento total da fissura em alguns pontos. Aos 84 dias ocorreu sua observação final, com trechos cicatrizados. Comparando a abertura da FS cicatrizada no valor de 0,193 mm com a abertura da FP de 0,679 mm, percebeu-

se a eficiência nessa amostra para fissuras de até 0,2 mm, conforme já relatado por Van Tittelboom e De Belie (2013). A Figura 79 complementa a visualização também em caráter evolutivo, sendo alusiva à amostra CC260.R.CU.11.

Figura 79 – Amostra CC260.R.CU.11, com fissura pelo ensaio de tração na flexão (a) 7 dias, aprox. 10x (b) 28 dias, aprox. 7,5x (c) 56 dias, aprox. 7,5x



A Figura 79 mostra que houve uma tendência de estagnação da cicatrização, uma vez que houve lacunas que se mantiveram ao longo do tempo. Já aos 7 dias havia a formação dos produtos, em destaque para sua coloração esbranquiçada. Tal coloração é atribuída à formação de calcita, como pontuado por Alyousif (2016). Porém, há indícios que para essa composição e idade de análise o mecanismo preponderante seja a formação de C-S-H pelas partículas anidras de cimento (HEARN, 1998).

Analisando comparativamente as duas amostras apresentadas com numeração 4 (Figura 76 e Figura 79, formadas pelo corte e ensaio de tração, respectivamente), ou seja, de igual composição e mantidas sob a mesma condição de cura e exposição, pode-se perceber que a eficácia da cicatrização foi maior nas amostras cuja fissura foi causada pelo ensaio de tração na flexão, uma vez que ocorreu de modo contínuo, em oposição à fissura causada por corte, que a formação dos produtos foi pontual. Pode-se atribuir essa superioridade a menor dimensão da fissura causada pelo ensaio de tração na flexão (máxima de 0,67 mm na face d) em relação à fissuração de corte de 1,20 mm, sendo esse ponto crucial para a eficácia do fenômeno (SCHLAGEN; HEIDE; BREUGEL, 2006). Além disso, tem-se a irregularidade das paredes das fissuras, que pode ter permitido uma melhor adesão dos produtos de cicatrização e regeneração (AL-TABBAA et al., 2019). Percebeu-se cicatrizações de até 100%.

Roig-Flores et al., (2015) e Wang et al., (2019) citam que, para SHC pelo mecanismo do consumo de cimento, a exigência é que exista presença da água, o

que pode justificar o percebido. Neville (2015) complementa, apontando que essa ocorrência se restringe com a presença de cimento anidro, a disponibilidade de água na fissura e um tempo para que a reação ocorra.

Em relação ao traço CC300, a Figura 80, ilustra uma cicatrização do tipo contínua (CC) alusiva à amostra CC300.R.CU.12.

Figura 80 – Verificação de CP- amostra CC300.R.CU.12, idade de 28 dias, aprox. de 10x



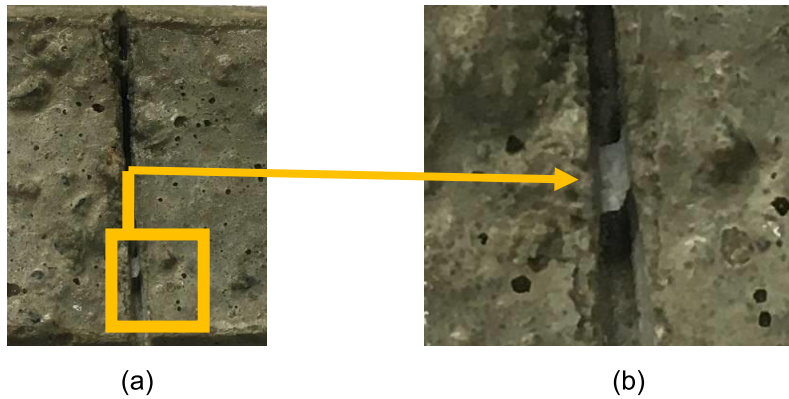
Em relação a esse tipo de formação de produtos, cabe destacar que, nessa amostra parece ter havido o desprendimento do produto formado, uma vez que ele foi verificado aos 28 dias, porém, não se manteve nas análises aos 56 e 84 dias. Sobre a ruptura, em relação a esse traço e tipo de formação de fissura, pode-se destacar:

- a) tendo sido a fissura ter sido provocada pelo corte, as paredes podem ser lisas, prejudicando não apenas a formação, mas também a permanência do produto de cicatrização, que pode ter sofrido queda ou ruptura (AL-TABBAA et al., 2019; TSANGOURI, 2018; WANG et al., 2019);
- b) não se pode atribuir tal fenômeno de desprendimento do produto ao processo de retirada da água e submersão da amostra, pois esta foi curada em CU. Nas amostras em CS, a submersão após análise no microscópio, pode ter gerado pressão da água, causando a quebra e queda do produto;
- c) como citado por Li e Herbert (2012), não há indícios da qualidade do produto formado, podendo esse, inclusive, ter sofrido quebra. A aderência do produto com a matriz depende de sua composição química, da rugosidade da matriz, entre outros;

Autores já relataram a lacuna que existe em termos da adesão dos produtos de regeneração na matriz. Feiteira et al., (2017) relatam que um dos problemas em termos de adesão é a aplicação de cargas, sendo que o deslocamento do produto que se forma tende a ocorrer quando menos de 50% da carga é aplicada nas amostras. Nas amostras do presente estudo não foram aplicadas cargas, apenas houve movimentação das amostras.

A Figura 81 apresenta amostra submetida à carbonatação (CC300.C.CU.18) na qual houve cicatrização do tipo pontual.

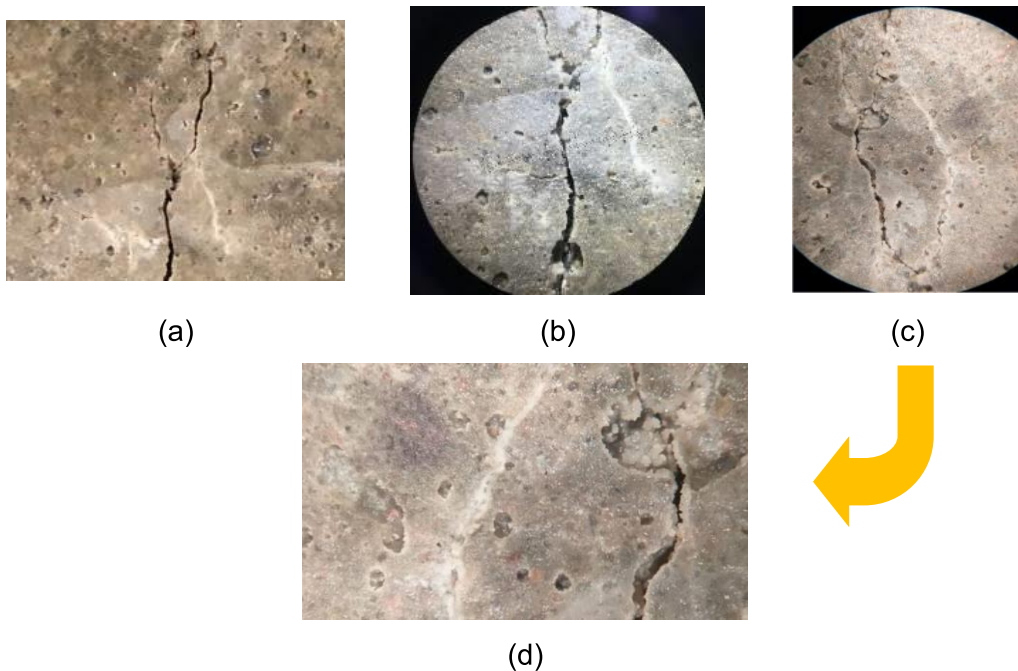
Figura 81 – Amostra exposta à carbonatação, em CU com CP, (a) dimensão real e (b) aprox. de 10x



Destaca-se que o formato alusivo da formação de CaCO_3 não tem semelhança em relação ao apresentado na Figura 81, ocorrendo normalmente com acúmulo superficial, e por isso adotou-se a teoria do mecanismo de hidratação contínua.

Em relação a esse mesmo traço, porém nas amostras submetidas ao ensaio de tração na flexão, a Figura 82 apresenta a amostra CC300.R.CS.7a, analisada em relação a sua fissura secundária.

Figura 82 – Evolução da cicatrização na amostra CC300.R.CS.7a – FS (a) 7 dias, dimensão real (b) 28 dias, aprox 7,5x (c) 84 dias, aprox 7,5x (d) 84 dias, aprox 20x



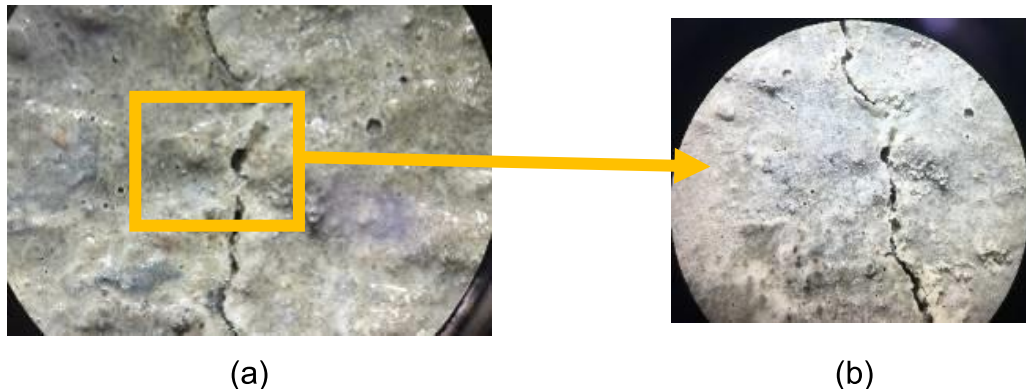
Na amostra representada pela Figura 82, tem-se a cicatrização progressiva da FS, e a espessura verificada foi superior à inicial, fenômeno descrito anteriormente (TALAIEKHOZAN et al., 2014). Na ampliação da imagem, percebe-se a formação de cristais nas irregularidades da parede da fissura, porém sem espessura suficiente para seu fechamento. Além disso, é possível perceber na imagem que produtos se formaram nessa irregularidade, o que pode decorrer da disposição de água nesses pontos da superfície. Hearn (1998) destaca a relevância da presença constante de água para que o processo seja viabilizado. Ainda, a Figura 83 apresenta evento em que também houve acúmulo de um produto esbranquiçado em irregularidade, com dimensão máxima de 1,2 mm.

Figura 83 – Evolução da cicatrização CC300.R.CU.12a - Esbranquiçado na irregularidade- dimensão de 1,2 mm, aprox de 7,5x



Na Figura 83 pode-se atribuir a formação do produto de cicatrização ao acúmulo de água na irregularidade da amostra. O aspecto verificado pode ser atribuído a formação de C-S-H, decorrente da hidratação secundária do cimento (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019). Por mais que a irregularidade possa ter proporcionado o acúmulo de água e a formação dos produtos, na sua periferia, percebe-se que não houve efetivamente o fechamento das fissuras, provavelmente devido à espessura da fissura nesse local. Esse fenômeno ocorreu no estudo de Shivam et al., (2017). A Figura 84 aponta para a formação de CP.

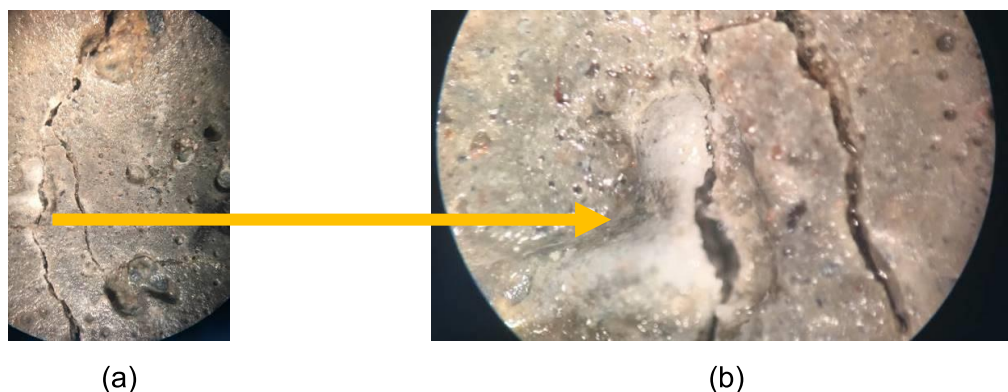
Figura 84 – Cicatrização na amostra CC300.R.CS.9b - Lâmina de CP (a) aprox. de 10x e (b) aprox de 7,5x



Na Figura 84 tem-se o formato de lâmina na cicatrização, tendo esse processo se mantido entre as verificações ocorridas aos 7 dias, 28 dias e 56 dias. O formato de lâmina foi abordado por Kalhori e Bagherpour (2017), tendo tais autores atribuído essa formação aos cristais de CaCO_3 . Destaca-se, no entanto, que para essa composição de concreto e exposição da amostra é mais provável que a ocorrência seja a formação de C-S-H.

Em relação ao traço CC360, nas amostras submetidas ao corte, foram percebidas duas amostras com ocorrência, sendo essa a formação de produtos na borda interna. Dentre os corpos de prova com fissura formada pelo ensaio mecânico, cabe ser destacado o acúmulo de produto esbranquiçado na irregularidade de amostras, destacando-se, por exemplo, a formação de produto de até 1,52 mm, na amostra CC360.N.CU.4d, Figura 85.

Figura 85 – Amostra CC360.N.CU.4d - (a) Formação de produto branco na irregularidade da fissura e (b) aprox. 20x - dimensão de 1,52 mm

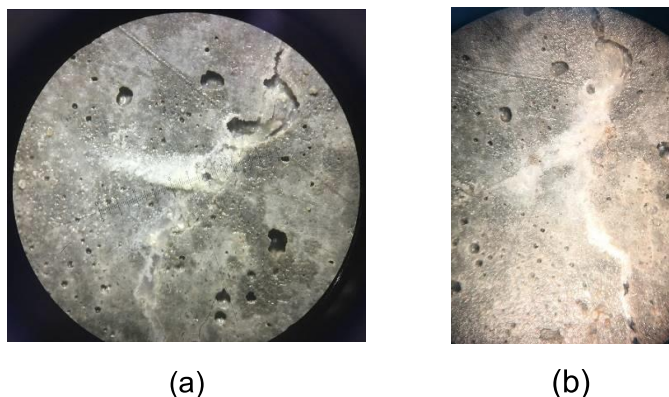


Notou-se, novamente, que a formação de produto de cicatrização ocorreu na irregularidade da amostra, em direção a existência da fissura. Em relação a esse traço

houve equilíbrio entre os dois tipos empregados de cura. Ainda em relação a Figura 85, Hilloulin et al., (2016) apontam que o produto majoritário formado em decorrência do consumo de cimento é a formação de C-S-H e de portlandita. Os autores complementam afirmando que o formato no C-S-H formado no interior das fissuras é de um “*cloudy gel*”, tendo a referida figura apresentado tal aspecto. Em termos de percentual, Huang, Ye e Damidot (2014) apontam um percentual de 78% de CH, 17% de C-S-H e cerca de 5% de CaCO_3 . O percentual apontado pelos autores se refere a idades iniciais, pois ao longo do tempo há maior participação de CaCO_3 .

A Figura 86 tem o objetivo de apresentar a evolução na cicatrização da amostra CC360.R.CU.12b.

Figura 86 – Cicatrização verificada na amostra CC360.R.CU.12b (a) sobreposição de produto na superfície da amostra (b) cicatrização ao longo de um trecho



Conforme a Figura 86, na referida amostra, inicialmente, aos 7 dias, houve a formação de um produto saliente à superfície da amostra, não somente na região onde havia fissura. Na sequência, a CC ocorreu, aos 56 dias, porém, permanecendo pontos de falhas em meio a cicatrização. Ainda em relação a essa amostra e essa figura, percebeu-se que novamente o produto gerado foi sobressalente, superando a sua espessura máxima (HOMMA; MIHASHI; NISHIWAKI, 2009).

De acordo com o citado anteriormente, dentre os traços até então avaliados, percebeu-se no traço CC360 uma maior absorção de água e índice de vazios, e assim a CU poderia ter sido prejudicada, uma vez que se considera o fluxo de água indo da fissura para os poros da matriz, o que não impediu que fossem percebidas evidências de cicatrização. O contraponto para essa afirmação seria a consideração de que em CU, com o passar do tempo, os poros poderiam ser progressivamente saturados pela elevada presença de umidade. Há de ser considerada a retirada das amostras da

câmara apenas para o registro das imagens. Como uma síntese do que foi percebido nas amostras citadas, tem-se a Tabela 48.

Tabela 48 – Síntese dos resultados obtidos nas amostras -CC

Traço	Tipo de fissura	e Máx cicatrizada (mm)		e Média dentre as cicatrizações (mm)		Nº de amostras com ocorrência de cicatrização					
		CC	CP	CC	CP	N		C		R	
						CS	CU	CS	CU	CS	CU
CC260	Corte mecânico	0	1,800	0	1,600	1	1	0	0	2	2
	Ensaio de tração na flexão	0,780	0,800	0,530	0,491	5	1	2	0	6	4
CC300	Corte mecânico	0	1,590	0	1,340	1	2	0	1	1	2
	Ensaio de tração na flexão	0,830	1,200	0,684	0,583	5	1	1	0	5	4
CC360	Corte mecânico	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
	Ensaio de tração na flexão	0,870	1,520	0,590	0,830	5	4	1	1	7	9
Número total de ocorrências						18	9	4	2	22	21

Legenda: CC: amostras com consumo de cimento; e: espessura da fissura; N: névoa salina; C: carbonatação; CS: cura submersa; CU: cura úmida; CC: cicatrização contínua; CP: cicatrização pontual;

Em relação ao traço CC260 percebeu-se que as maiores fissuras tiveram produtos gerados parcialmente, manifestando PBE. Ao analisar-se também as amostras submetidas ao ensaio de tração na flexão, percebe-se que não há linearidade entre as amostras avaliadas em termos da idade em que ocorreu o sinal da cicatrização. Nesse traço percebeu-se que uma das amostras fissuradas por corte só apresentou cicatrização aos 84 dias, não apresentando evidências antes dessa idade.

No traço CC300, cabe destacar que houve formação de acúmulo de produto de cicatrização com dimensão de 1,2 mm. Nesse traço, assim como os demais com a variável de consumo de cimento, foi notado que as amostras submetidas à carbonatação foram as que menos apresentaram ocorrências, tanto no que tange à cicatrização completa como à formação de produtos pontuais.

Já no traço CC360, algumas amostras apresentaram formação de produto esbranquiçado em irregularidades superficiais, ocorrendo com uma dimensão de até 1,52 mm em amostras submetidas ao ensaio de tração na flexão. Nas amostras expostas por um período à câmara de carbonatação, há atuação quase que insignificante no que tange a formação de produtos de cicatrização. Nas amostras com fissuração por corte houve apenas PBE.

Em relação à cicatrização, Zemann, Herrmann e Dehn (2019) citam que há aspectos favoráveis à formação de calcita, como a pequena dimensão das fissuras e o tamanho dos grãos de cimento, assim como, seu consumo. É de se esperar, no entanto, que a formação preponderante nessa composição seja de C-S-H, invertendo-se ao longo do tempo essa predominância para formação de CaCO_3 (HUNG; SU; SU, 2018)

Em relação aos grupos de exposição, deve-se considerar que as amostras carbonatadas permaneceram 28 dias em condição de cura antes de serem submetidas ao corte e aos procedimentos para o ensaio de carbonatação (28 dias de sazonalidade e 28 dias de exposição em câmara) e, assim, pode ter ocorrido a plena hidratação das partículas de cimento, sem que houvesse cimento anidro para permitir a cicatrização. Joseph, Skibsted e Cizer (2019) afirmam que, em concretos contendo apenas cimento Portland como aglomerante, se percebe uma pequena contribuição no incremento de resistência mecânica entre as idades de 14 e 90 dias. Dado que o procedimento citado levou ao todo 84 dias, o processo de hidratação pode ter cessado até essa data (DEMBOVSKA et al., 2017a). Neville (2015) pontua que, em idades mais avançadas, o fenômeno cabível é a formação de CaCO_3 pela ação do CO_2 , anulando o efeito da hidratação de partículas anidras.

Ainda no que tange o ambiente, Talaiekhazan et al., (2014), afirmam que, para hidratação das partículas de cimento, deve haver ambiente com pH superior a 7,5. No presente estudo, porém, a câmara de névoa salina na qual as amostras do grupo N foram mantidas continha solução aspergida com pH na faixa entre 6,5 e 7,2, mesmo assim tendo proporcionado condições para a formação dos produtos. Khan, Ahmad e Al-gahtani (2017) pontuaram que, muito embora soluções salinas impactem negativamente a durabilidade do concreto, em termos de cura não nota-se dano no desenvolvimento da resistência, o que pode indicar um não-impacto também em termos de cicatrização.

Avaliando-se o tipo de cura, tem-se que foram 32 ocorrências de CU e 44 de CS. Percebe-se assim, superioridade na CS, com 37,5% a mais de ocorrências. Sobre esse aspecto, Nardi et al., (2017) e Wang et al., (2019) destacam que o mecanismo analisado de consumo de cimento tem relação direta com as condições de exposição, indicando como favorável o contato direto com a água, em concordância com o que foi verificado no presente estudo. Huang e Ye (2012) utilizaram inclusive, partículas para fornecimento da água no interior da fissura. Em relação à disponibilidade de

água, Roig-Flores et al., (2015) avaliaram amostras contendo apenas cimento como agente cicatrizante e perceberam que amostras em CS tiveram 90% de potencial de cicatrização, em oposição a 15% de potencial em amostras dispostas em CU, concordando com os resultados.

Também referente ao processo de cura, aponta-se a hipótese de que o processo de submersão possa ter colaborado com a formação dos cristais e produtos de regeneração, confirmando o apontado por Roig-Flores et al., (2015). Porém, para imersão na água, pode ter havido pressão sob os produtos de cicatrização, lixiviando e provocando sua queda e não possibilitando a cicatrização contínua ao longo da fissura. Além disso, na ausência da água no interior da fissura, pode ter havido a fixação do produto na parede das amostras.

Ainda, conforme Roig-Flores et al., (2015), as amostras que não são curadas em CS não tem seus poros totalmente preenchidos de água, e assim, ao terem a presença de água na mistura, essa água pode fluir para os poros da matriz, não permanecendo na fissura e conseqüentemente, não há formação de produtos de cicatrização.

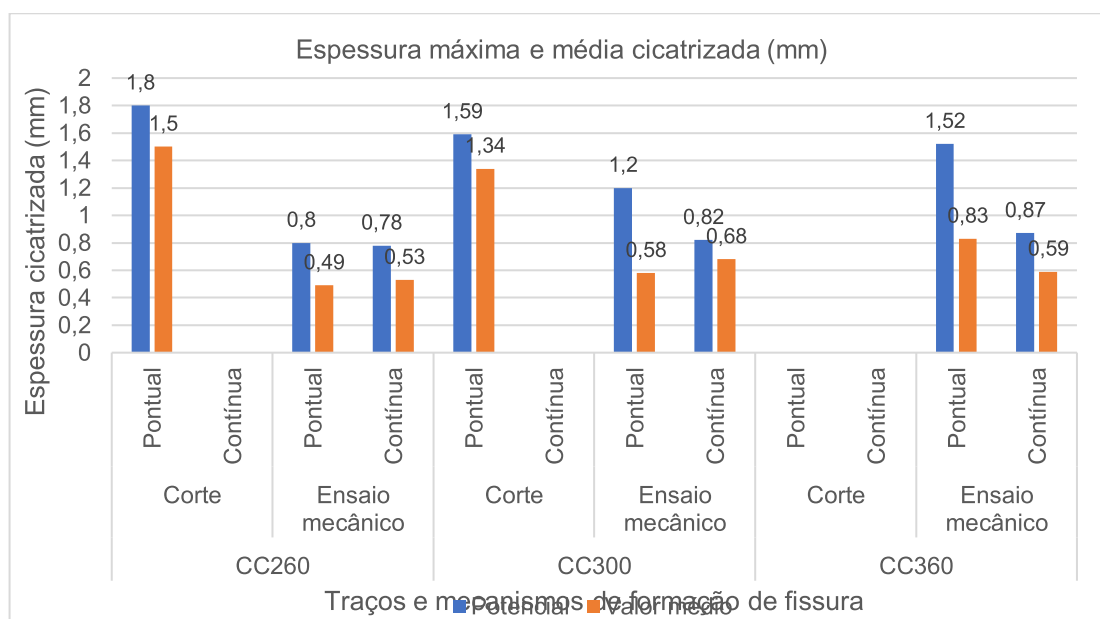
Foi notado em alguns pontos a formação de produto apenas pontualmente e por vezes sem que se mantessem entre as diferentes idades de análise. Em relação a esse comportamento, podem ser atribuídas as seguintes hipóteses:

- a) Houve movimentação de água no interior das fissuras, devido a sua elevada espessura, permitindo que possíveis produtos cicatrizantes fossem lixiviados (nas amostras submetidas a CS);
- b) A superfície lisa da parede interna da fissura causada pelo atrito lateral do disco de corte não permitiu a aderência dos produtos formados. Já, em termos superficiais, havia irregularidades características dos corpos de prova, o que pode ter facilitado essa ocorrência na borda superior das fissuras. Wang et al., (2019) sustentam essa hipótese, citando a rugosidade da parede interna das fissuras como um ponto crucial para a adesão dos produtos formados;
- c) A abertura causada pelo disco de corte apresentou dimensão elevada, em discrepância com os valores apontados pela bibliografia como potencial para esse método. Considerando todas as amostras, não apenas as que apontaram para cicatrização, obteve-se abertura média de 1,51 mm, maior

ao relatado pela bibliografia de 0,2 a 0,3 mm, como citado, conforme Azarsa, Gupta e Biparva (2019) e Ferrara et al., (2018).

Ao analisar a espessura máxima e o alusivo consumo de cimento, optou-se pelo traçado do gráfico apresentado na Figura 87.

Figura 87 – Espessura máxima e média cicatrizada (mm) nos diferentes traços, mecanismos de fissura e tipo de cicatrização- CC



Conforme a Figura 87, é possível perceber que nos dois primeiros traços (CC260 e CC300) as fissuras causadas por corte apresentaram valor próximo de cicatrização máxima, uma vez que por tal método tende a haver uma constância na abertura da fissura. A cicatrização de ambos se deu como CP. No traço CC360, não houve cicatrização alguma nas fissuras formadas por esse mecanismo.

Em termos de limitação de cicatrização pelo cimento, a espessura máxima cicatrizada indicada pela bibliografia foi de por exemplo 0,2 mm (SANGADJI, 2017), o que difere dos resultados obtidos e supra-apresentados. Li e Yang (2007), ao compilar dados de diversos estudos, citam o limite de 0,3 mm. Wiktor e Jonkers (2011) citam 0,18 mm. Semelhantemente, Azarsa, Gupta e Biparva (2019) citam a faixa entre 0,2 e 0,3 mm.

Cabe destacar que Hilloulin et al., (2016a) apresentaram que, em alguns casos, a ocorrência da cicatrização se limitou apenas ao produto formado nas paredes, sem avanços para fechamento da fissura, o que de fato foi percebido na presente pesquisa.

Analisando-se as fissuras em amostras causadas pelo ensaio de tração na flexão, pode-se inicialmente afirmar que a espessura da fissura variou, e por consequência, também houve variação no valor máximo cicatrizado, sendo a CC máxima de 0,87 mm, porém, alcançando CP de até 1,52 mm.

Salas et al., (2016) apontam que para promover SHC pode ser necessário o acréscimo do consumo de cimento, porém, nessa pesquisa, mesmo elevando-se tal variável, foram percebidas sutis alterações em termos de cicatrização máxima. Relembra-se que, nessa pesquisa, atendendo ao especificado na NBR 6118 (ABNT, 2014) e em normas semelhantes internacionais, alterou-se concomitantemente a relação a/c, o que pode ter influenciado os resultados obtidos. É pertinente citar, no entanto, que se analisado o número de ocorrências de cicatrização, há superioridade do traço CC360, como pontuam Huang e Ye (2012).

Roig- Flores et al., (2015), relacionam a ocorrência de cicatrização com a disponibilidade de pasta nas amostras, indicando que a presença de agregados dificulta a formação desses produtos. Tal ponto apresentado pode ser reforçado nessa pesquisa, pois com maior consumo de cimento percebeu-se em termos de cicatrização contínua maior potencial. Huang, Ye e Damidot (2013) afirmam que tem de ser analisada não apenas a disponibilidade total de cimento anidro, mas ainda, onde ocorre essa disponibilidade. Os autores reportaram, por exemplo, que em amostras em que havia 18% de partículas de cimento anidro, no perímetro da fissura esse potencial percebido era de apenas 3%.

Ainda em relação à espessura, cabe destacar que houve cicatrizações superiores a 100%, e em alguns pontos inclusive superando a espessura da fissura, como trazido por Du et al., (2019). Tem-se como fator determinante a abertura média da fissura, já trazido por Ferrara et al., (2018) e Şahmaran et al., (2014) como característica chave para a cicatrização de fissuras. Os referidos autores abordam ainda o formato da fissura, não avaliado nesse estudo, ao afirmar que fissuras de formato cônico tendem a não apresentar produtos em superfície, podendo a formação de cicatrização ocorrer apenas na base, e conseqüentemente, podendo não ter sido detectada nesse estudo.

5.1.4 Análise química e microestrutural

Em relação a esse mecanismo de cicatrização e regeneração, as amostras analisadas pertencem as composições CC300 e CC360. Os difratogramas contendo os principais minerais identificados são apresentados na Figura 88 e Figura 89, respectivamente.

Figura 88 – Difratograma de raios-X- Variável de consumo de cimento- CC300

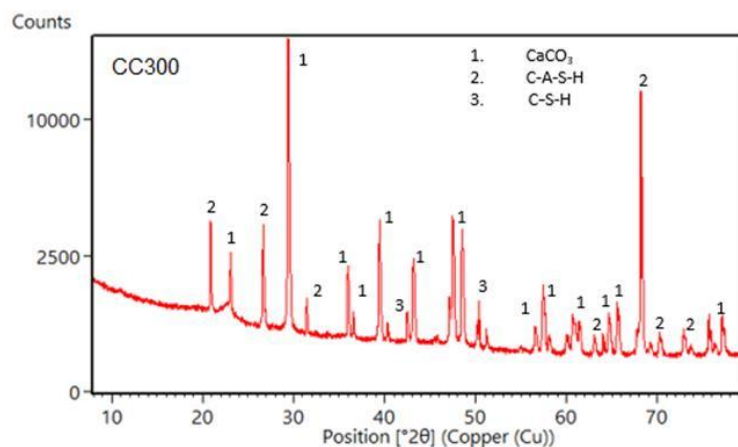
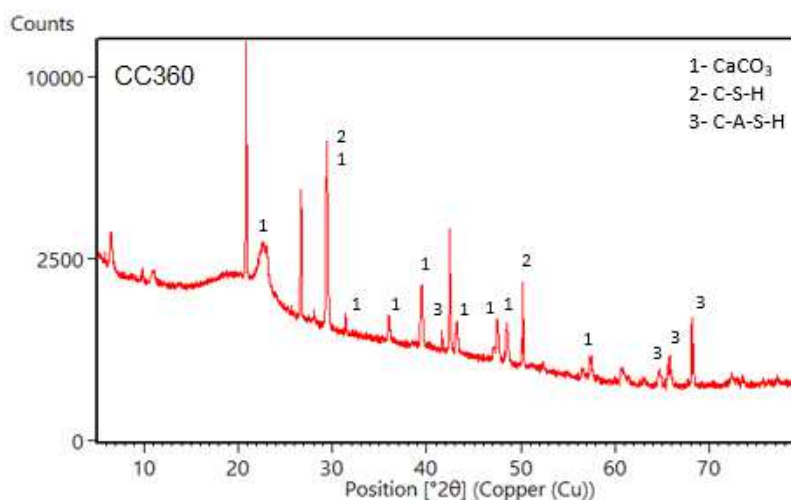


Figura 89 – Difratograma de raios-X- Variável de consumo de cimento- CC360



Conforme pode-se perceber, em ambos difratogramas foi percebida a presença dos mesmos compostos. De acordo com a estimativa presente em bibliografia, espera-se a formação de C-S-H (IN et al., 2013b; VAN TITTELBOOM et al., 2016) oriundo da hidratação de partículas de cimento anidro, sendo o material principal

decorrente da hidratação do cimento sem adições pozolânicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014; PUERTAS et al., 2011). A identificação do C-S-H concorda com apontamentos realizados em amostras nas quais percebeu-se formato de nuvem atribuído à presença de tal composto.

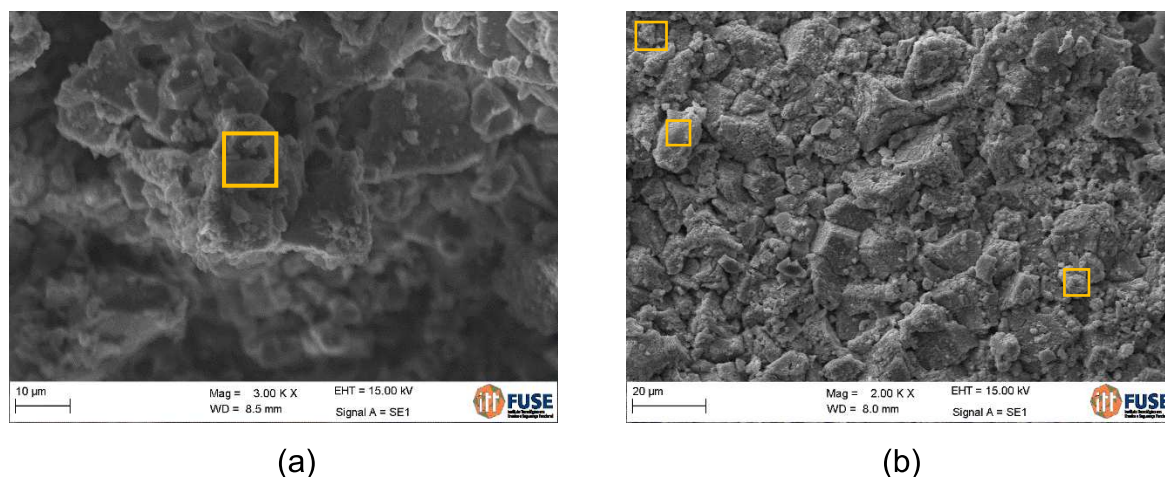
Observou-se, no entanto, a presença de CaCO_3 , o que deveria ocorrer de modo mais intenso em maiores idades de análise, após a reação do CH com o CO_2 . A presença de calcita havia sido suposta pelo formato com que o produto se deu nas fissuras, com coloração esbranquiçada e aparente densidade (KRELANI, 2015; SNOECK et al., 2016; TZIVIOGLOU et al., 2016). Al-Tabbaa et al., (2019) informaram a identificação também concomitante de CaCO_3 e C-S-H, indicando que o primeiro ocorre na superfície das amostras e o segundo em seu interior. No presente estudo, a coleta ocorreu no produto formado na espessura, em termos superficiais. Huang et al., (2016) e Huang, Ye e Damidot (2013) citam até 80% da massa do produto de cicatrização atribuída a presença de CaCO_3 em amostras cimentícias, concordando com esse estudo.

Além disso, deve ser citada a ocorrência de C-A-S-H, forma abreviada de silicato de cálcio e alumínio hidratado. A formação do gel de C-A-S-H é decorrente, normalmente, da utilização de pozolanas, porém, como destacam Mehta e Monteiro (2014) na formação de produtos decorrentes da hidratação do cimento, tem-se Al em 15 a 20% dos compostos formados, o que pode justificar esse aparecimento.

Ainda em relação aos produtos de hidratação identificados, Viecili, Hastenpflug e Girardi (2018) analisaram comparativamente o tempo de início e fim de pega dos cimentos nacionais CP-II-F-40 e do CPV-ARI, indicando valores muito semelhantes e cura rápida. Sabe-se que a presença de C_3A (forma abreviada de $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$) nos cimentos promove o ganho rápido de resistência (MACIEL, 2017) e assim pode-se justificar a presença de C-A-S-H. Barbosa e Portella (2019) relatam que a identificação de C_3A não apresenta polimorfismo, tendo identificação assim mais precisa.

Para analisar em termos de imagem os produtos formados, apresenta-se na Figura 90 registros obtidos na microscopia eletrônica de varredura em amostras alusivas ao consumo de cimento.

Figura 90 – MEV- Variável de CC- (a) CC260, aprox de 3000x e (b) CC360, aprox 2000x



Como evidencia-se na Figura 90a, a aparência percebida na amostra é de sobreposição de camadas de elemento com formato de lâminas, atribuída na bibliografia à ocorrência de calcita, e assim, percebe-se relação com os resultados do DRX. Sidiq, Gravina e Giustozzi (2019) concordam com o apresentado. A vantagem em ter-se a formação de calcita é que tal produto apresenta maior densidade e assim oferece maior barreira para ingresso de agentes que possam deteriorar o concreto (ALYOUSIF, 2016). O formato apresentado pela imagem não se assemelha ao apresentado pela bibliografia como C-S-H. Na Figura 90b, tem-se novamente uma geometria com formato de lâminas sobrepostas, indicando presença em relevo entre elas, sendo semelhante ao já citado.

O ensaio de energia dispersiva de raios-X foi realizado nas áreas em destaque da Figura 90a e Figura 90b, sendo identificados os elementos apresentados na Tabela 49.

Tabela 49 – Verificações através de energia dispersiva de raios-X- CC260 e 360

Identificação na amostra CC260		Identificação na amostra CC360	
Elemento	Percentual em massa(%)	Elemento	Percentual em massa(%)
C	10,40	C	4,03
O	47,05	O	38,44
Al	1,34	Al	-
Si	4,31	Si	1,06
Cl	1,84	Cl	-
Ca	35,06	Ca	55,79
Mg	-	Mg	0,67

Como nota-se através da Tabela 49, pode-se indicar pertinência da identificação em relação ao percebido através do DRX. Na amostra CC260 houve presença de Alumínio, condizente com a técnica de DRX que indicou C-A-S-H. Nessa técnica, não pode-se atribuir confiabilidade à identificação de oxigênio e carbono, como apresentado no capítulo 2, porém, tais materiais podem ser oriundos da existência de CaCO_3 , que ocorreu nos dois difratogramas desse conjunto de traços. A indicação de cálcio e silício decorre da presença dos produtos de hidratação, C-S-H e C-A-S-H. A presença de cloro na amostra CC260 decorre da exposição do material à névoa salina.

5.2 AUTOCICATRIZAÇÃO PELA UTILIZAÇÃO DE POZOLANAS

5.2.1 Resistência à compressão

A Tabela 50 apresenta os valores obtidos de resistência mecânica à compressão, envolvendo os valores individuais, médios e indicando o valor potencial em cada composição e idade de análise.

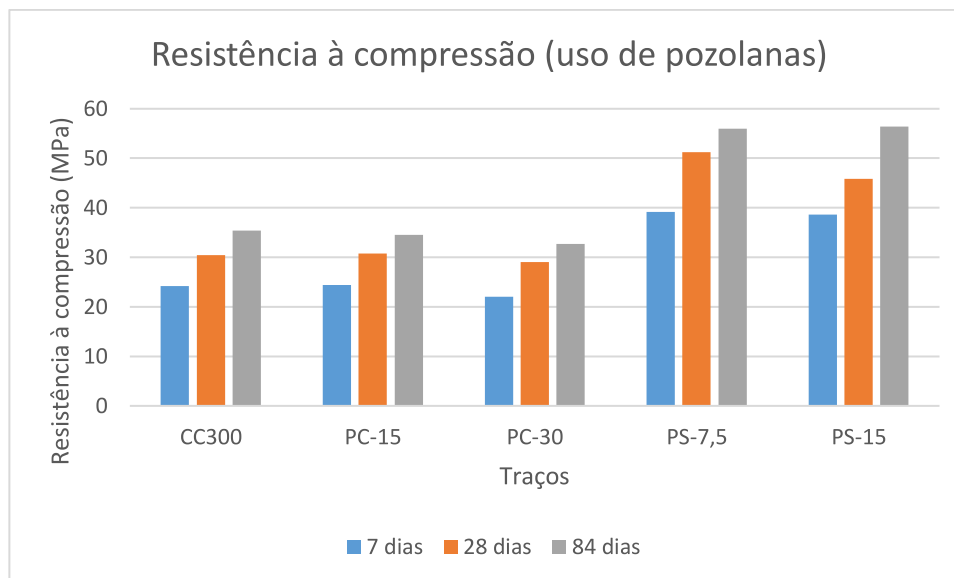
Tabela 50 – Resistência à compressão (MPa)- amostras com variável P

Amostra	7 dias				28 dias				84 dias			
	Tensão (MPa)	Valor pot (MPa)	Valor médio (MPa)	dp	Tensão (MPa)	Valor pot (MPa)	Valor médio (MPa)	dp	Tensão (MPa)	Valor pot (MPa)	Valor médio (MPa)	dp
CC-300.1	32,4				27,6				44			
CC-300.2	34,0	34,0	31,0	3,9	36,9	38,0	34,2	5,7	42,4	44,5	43,6	1,1
CC-300.3	26,6				38,0				44,5			
PC-15.1	22,5				25,9				34,2			
PC-15.2	24,4	24,4	22,9	1,4	30,8	30,8	29,0	2,7	34,5	34,5	34,4	0,2
PC-15.3	21,7				30,4				34,5			
PC-30.1	17,8				29,0				32,0			
PC-30.2	22,0	22,0	20,3	2,2	25,7	29,0	27,6	1,7	32,7	32,7	32,4	0,4
PC-30.3	21,0				28,2				32,4			
PS-7,5.1	39,2				49,0				55,8			
PS-7,5.2	32,7	39,2	34,6	4	50,8	51,2	50,3	1,2	56,0	56,0	55,0	1,6
PS-7,5.3	32,0				51,2				53,1			
PS -15.1	38,6				43,4				55,3			
PS -15.2	37,7	38,6	37,9	0,6	46,3	45,8	45,2	1,6	56,0	56,4	55,9	0,6
PS-15.3	37,5				45,8				56,4			

Legenda: CC300 refere-se ao traço com consumo de cimento de 300kg/m^3 (referência). PC: uso de cinza volante e percentual. PS: uso de sílica ativa e percentual.

A Figura 91 apresenta graficamente esses valores, apresentando em paralelo o traço CC300, traço referência que norteou a dosagem dos demais.

Figura 91 – Resistência à compressão- amostras com variável de uso de P - valores potenciais



Conforme percebe-se na Figura 91, houve um maior ganho de resistência nas amostras que utilizaram a SA em relação as amostras com uso de CV e também ao comparar-se com as amostras de referência (CC300). Em termos de evolução entre as idades, destaca-se o traço PS-15, com a maior evolução entre os 28 e 84 dias, com crescimento de 23%. Poon, Lam e Wong (1999) citam que o teor ótimo de substituição de cimento por SA está entre 15 e 25%, e Koul et al., (2018) citam a faixa de 10 e 15%, ambos concordando com o verificado nessa pesquisa. Koul et al., (2018) afirmam que o benefício do uso da SA não se restringe somente às propriedades pozolânicas do material, contando ainda com sua reduzida granulometria para promover benefícios no empacotamento da mistura, e por consequência, melhorando características como resistência mecânica à compressão, abrasão, entre outros. Por tais benefícios, o uso de SA tende a igualar ou superar a resistência à compressão em relação às amostras de referência (LANGAN; WENG; WARD, 2002), o que foi de fato percebido. Nesse estudo, não foi possível verificar a distribuição granulométrica da SA, porém, tem-se seu valor de área superficial muito superior ao da CV (17,59 g/cm² em relação a 0,473 g/cm², respectivamente). Ainda, Moropoulou, Bakolas e Aggelakopoulou (2004) afirmam que há relação direta entre a área superficial e a atividade pozolânica do material, concordando com o obtido nesse estudo.

Mohamed (2011), ao comparar a utilização de CV e de SA em matrizes de concreto autoadensável, percebeu que o uso de 15% de SA apresentou resultados superiores ao uso de 30% de CV, resultado em concordância com o obtido nesse estudo, com os mesmos percentuais de utilização. O autor citado comparou ainda o desenvolvimento da resistência em amostras curadas em CU e ao ar, indicando que o desenvolvimento da hidratação de amostras pozolânicas ocorreu de modo mais efetivo na CU, o que pode impactar ainda na formação de produtos de regeneração.

Turk, Karatas e Gonen (2013), também avaliando diferentes percentuais de uso de SA e CV, em matrizes de concreto autoadensável, concluíram que o percentual de 15% de SA apresentou melhor desempenho mecânico, sendo superior aos demais percentuais avaliados (5, 10 e 20%). Já no estudo de Nochaiya, Wongkeo e Chaipanich (2010), os autores atribuíram o melhor desempenho mecânico ao traço com 10% de SA, com incremento de 15% de resistência aos 28 dias ao comparar com o concreto referência, que já continha CV em sua composição. Considerando os percentuais utilizados nesse estudo e os resultados apresentados na Tabela 50, o percentual de SA com melhor desempenho foi de 7,5%, com acréscimo de resistência de 47%, porém, comparando-se com um traço sem nenhuma utilização de pozolanas aos 28 dias. Tal resultado destoa do apresentado por Depaa, Felix Kala (2015) que obtiveram relação linear entre percentual de uso de SA e a resistência mecânica à compressão, sendo avaliados teores de 0%, 2,5%, 7,5%, 10% e 12,5%. Já, aos 84 dias, houve, no valor potencial, 0,4MPa de superioridade entre o traço PS15 e o traço PS7.5.

Complementando a análise comparativa das duas pozolanas, Çelik, Özturan (2017), afirmam que as composições contendo SA tem desempenho superiores às com CV ou ainda em misturas híbridas, quando analisadas propriedades mecânicas.

Em relação às amostras contendo apenas o uso de CV, Aggarwal (2010) informam que com maiores percentuais de uso de CV em substituição ao cimento deveria haver maior contribuição da resistência em idades elevadas, para teores de até 40%, porém, nesse estudo, os diferentes percentuais demonstraram comportamento muito semelhante, com ganho na ordem de 12% de resistência comparando a análise aos 28 e 84 dias. Anjos et al., (2012) contrapõem o apresentado e concordam com os valores obtidos nesse estudo, indicando que maiores teores de pozolanas tendem a reduzir a resistência à compressão em relação à amostra de

referência. Os autores avaliaram, no entanto, percentuais de pelo 50% ou mais de substituição.

5.2.2 Índices físicos: absorção total, massa específica e índice de vazios

A Tabela 51 apresenta os valores obtidos de índices físicos nas amostras contendo pozolanas. Conjuntamente, são apresentados os resultados da amostra CC300 na qual foi realizada a substituição parcial do cimento, sendo, portanto, o traço referência para esta análise.

Tabela 51 – Resultados - ensaios físicos nas amostras com variável P

Amostras	Absorção de água (%)		índice de vazios (%)		Massa específica seca (g/cm ³)		Massa específica saturada (g/cm ³)		Massa específica real (g/cm ³)	
	indiv	média	indiv	média	indiv	média	indiv	média	indiv	média
CC-300.1	3,63		8,38		2,31		2,39		2,52	
CC-300.2	3,39	3,35	7,76	7,74	2,29	2,31	2,36	2,39	2,48	2,50
CC-300.3	3,03		7,06		2,33		2,40		2,51	
PC – 15.1	5,80		12,65		2,18		2,31		2,50	
PC – 15.2	5,78	5,82	12,62	12,70	2,18	2,18	2,31	2,31	2,50	2,50
PC – 15.3	5,87		12,84		2,19		2,32		2,51	
PC – 30.1	2,09		4,68		2,24		2,29		2,35	
PC – 30.2	2,33	2,19	5,19	4,90	2,22	2,24	2,28	2,29	2,35	2,35
PC – 30.3	2,14		4,82		2,25		2,30		2,37	
PS - 7,5.1	1,07		2,49		2,32		2,35		2,38	
PS - 7,5.2	1,08	1,26	2,51	2,90	2,32	2,40	2,34	2,38	2,38	2,45
PS - 7,5.3	1,62		3,71		2,29		2,33		2,38	
PS – 15.1	2,77		6,51		2,35		2,42		2,52	
PS – 15.2	2,83	2,83	6,66	6,68	2,36	2,42	2,42	2,42	2,53	2,53
PS – 15.3	2,90		6,85		2,36		2,43		2,54	

Em relação ao índice de vazios, apenas a amostra contendo PC15 apresentou acréscimo (na ordem de 65%), sendo que as três demais composições com pozolanas reduziram os vazios da mistura em relação ao traço CC300, com destaque para a composição PS7,5, que reduziu 62,5% essa variável. O emprego da CV no teor de 30% apresentou melhorias na matriz, em relação aos seus índices físicos, sendo seus resultados superiores ao CV15. Mohamed (2011) citou esse percentual como ideal para substituição do cimento Portland.

Ainda em relação ao uso da CV, Çelik, Özturan (2017), obtiveram em seu estudo uma redução de apenas 0,76% na massa específica ao substituir 15% do cimento por CV, o que se assemelha aos resultados obtidos nessa pesquisa, na qual não foram percebidas alterações ao analisar a massa específica real.

A reduzida dimensão da SA parece ter contribuído com o aumento da densidade da matriz em termos de empacotamento, culminando na redução do índice de vazios. Sankaranarayanan e Jagadesan (2016) afirmam que essa é uma das razões do emprego de materiais como a SA em misturas que já contenham outros substituintes ao cimento, como a CV ou a EAF.

5.2.3 Análise visual - Microscópio óptico

As Tabelas contendo todas as observações referentes aos traços com pozolanas constam no Apêndice C deste trabalho.

Nas amostras do traço PC15 com fissura formada por corte, apenas percebeu-se em duas amostras a formação de esbranquiçado na fissura. Entre as 18 amostras desse grupo a espessura média causada pelo corte foi de 1,8 mm, chegando à máxima de 2,7 mm, o que de fato é superior aos valores máximos cicatrizados apresentados em bibliografia. Sahmaran, Yildirim e Erdem, (2013), por exemplo, citam valores limite de 0,05 mm e 0,1 mm para CV classes C e F, respectivamente. Ainda em relação às limitações, Hung, Su e Su (2018) perceberam em fissuras de abertura de 0,04 mm apenas a formação de PBE. Qureshi, Kanellopoulos e Al-tabbaa (2019) informam o valor de 0,5 mm como possível.

No conjunto de amostras submetidas ao ensaio de tração na flexão, o mecanismo preponderante foi a formação de produtos nas bordas da fissura, conforme ilustra a Figura 92.

Figura 92 – Indícios da cicatrização da amostra PC15.N.CU.6 lados a (a), b (b) e d (c), com aproximações de 7,5x, 7,5x e 20x, respectivamente, verificação aos 56 dias



A deposição do produto de cicatrização se iniciou na borda das fissuras direcionando até o ponto central. Na Figura 92c, pode-se inclusive perceber que se a espessura da fissura fosse inferior, seria possível ampliar o potencial de cicatrização. Depaa e Kala (2018) relataram, por exemplo, em amostras com CV, redução de abertura de fissura de 0,048 mm para 0,03 mm, indicando que houve formação de produto, porém, sem cicatrização efetiva. Tem-se na Figura 93a presença de precipitado branco na borda da fissura e nas irregularidades de sua superfície. Na Figura 93b, percebe-se que há maior continuidade na formação da cicatrização.

Figura 93 – Indícios da cicatrização de amostra PC15.R.CS.7d, análise aos 84 dias
(a) acúmulo na superfície (b) produto na borda interna da fissura



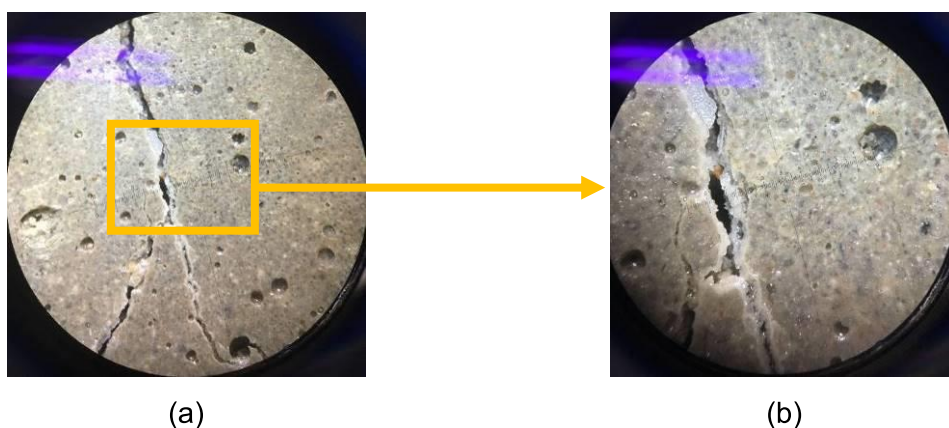
Sobre o aspecto apresentado na Figura 93, como já dito, a coloração branca é atribuída à formação de calcita. Gruyaert et al., (2015) concordam, citando que em amostras contendo 30% de CV, o mecanismo preponderante de cicatrização é a formação de CaCO_3 , através da carbonatação do CH. Soma-se a isso a verificação do depósito de cristais, de modo semelhante ao apontado no estudo de Parks et al.,

(2010), também avaliando como calcita pelos autores, por apresentar o depósito de produtos em camadas sobrepostas e salientes em relação à superfície. Destaca-se, no entanto, que essa amostra não pertence ao grupo de amostras exposto à câmara de carbonatação acelerada. Ainda, é pertinente destacar que Depaa e Kala (2018) indicaram que em amostras contendo CV o principal produto formado foi o C-S-H, verificado através de EDS realizado aos 56 dias, com relação Ca/Si de 1,93. Além das evidências percebidas na Figura 93 ocorrendo na fissura, percebe-se que diversas irregularidades na superfície da amostra apresentaram preenchimento com possíveis produtos de regeneração, reforçando a hipótese já apresentada que as irregularidades podem ser pontos de acúmulo de água favoráveis à cicatrização.

Houve predominância de cicatrização pontual (CP), também verificada por Hilloulin et al., (2016). Hung, Su e Su (2018) reportaram sua ocorrência em fissuras de até 0,07 mm.

A Figura 94, aponta para a formação de produtos na borda da fissura, direcionando-se para o centro, porém, sem alcançar o fechamento completo da abertura, a saber-se que nessa amostra específica, essa abertura teve espessura média de 1,105 mm.

Figura 94 – Indícios da cicatrização de amostra PC15.R.CU.10d, análise aos 84 dias
(a) aprox.. 7,5x e (b) aprox. 20x



Essa formação de produtos na borda foi apresentada por Khaliq e Ehsan (2016). As imagens microscópicas apresentadas pelos referidos autores, assim como as desse estudo, apresentam um formato irregular de formação de produtos de cicatrização, direcionando-se das bordas para a extremidade. Há algo que pode ser percebido na Figura 94 que é a diferente coloração dos produtos da borda e sua alteração quando se aproxima do ponto central. Pode haver variação no que tange à

formação do produto, sua presença de umidade e idade de formação. Em termos da disposição dos produtos, Barry e Sellier (2004) indicam que como há maior disponibilidade de CO_2 ao redor das fissuras e não em seu interior, os produtos decorrentes da carbonatação do CH tendem a se depositar na superfície externa da fissura. Também analisando a Figura 94, registrada na última idade de análise, pode-se perceber que o produto formado na fissura não sofreu lixiviação, uma vez que sua presença já havia sido observada aos 56 dias, se mantendo até a próxima idade de análise. A permanência do produto pode ser atribuída à qualidade do produto formado e o aspecto de adesão na superfície interna da fissuração, podendo ter contado com o acúmulo e a deposição de cristais.

Prosseguindo com a apresentação dos resultados nas amostras com CV, tem-se a seguir as ocorrências verificadas no traço PC30. Iniciando pelas amostras submetidas ao pelo corte mecânico, registrou-se nas 18 amostras, apenas uma ocorrência, referente à amostra PC30.N.CS.1, que foi de PBE, devido às espessuras elevadas da fissura (QURESHI; KANELLOUPOULOS; AL-TABBAA, 2019).

Em relação aos traços com mecanismo de consumo de cimento, nos traços com CV percebe-se a ocorrência diferenciada, pois há maior acúmulo de produtos e com maior saliência em relação à superfície da fissura. Krelani (2015) também verificou produtos em relevo e na superfície de compósitos cimentícios pozolânicos. A bibliografia atribui esse tipo de formação à CaCO_3 , que Gruyaert et al., (2015) perceberam como preponderante na cicatrização em amostras pozolânicas. A Figura 95 apresenta a formação de PBE em duas amostras do grupo referência e CS.

Figura 95 – Formação de produtos de cicatrização na amostra PC30.R.CS.7a, sem escala (a) e PC30.R.CS.9a (b), aprox de 7,5x, idade de 84 dias



(a)

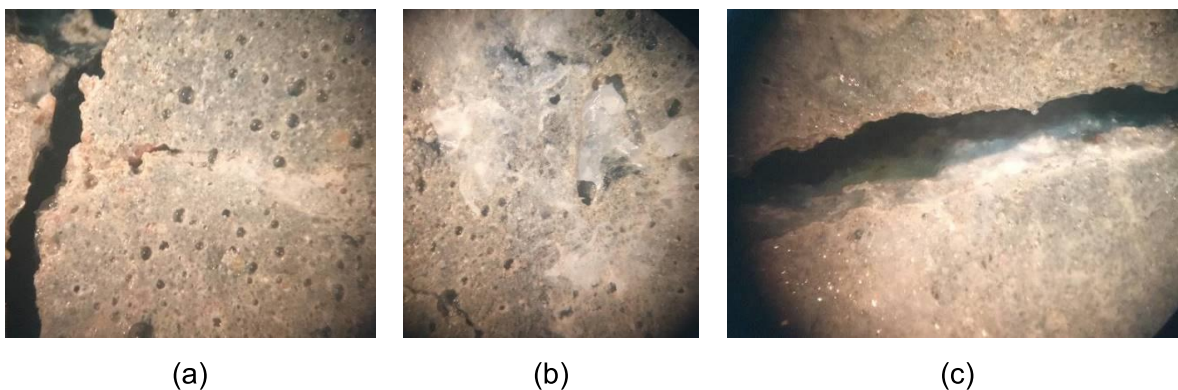


(b)

Ao analisar a área em destaque na Figura 95b, pode-se afirmar que as irregularidades da fissura favoreceram a formação de produtos. Novamente, o formato de produto é da borda até o ponto central das fissuras, com volume saliente e depósito superficial, o que aponta para a semelhança com o que citam Shivam et al., (2017).

Em relação a esse tipo de cicatrização, tem-se em destaque nesse grupo a amostra PC30.R.CU.12b, apresentada através da Figura 96. Na referida imagem, tem-se em (a) a formação de produtos na fissura secundária, em (b) a formação de placas em irregularidade na superfície da amostra e em (c) a presença de esbranquiçado na face interna da fissura.

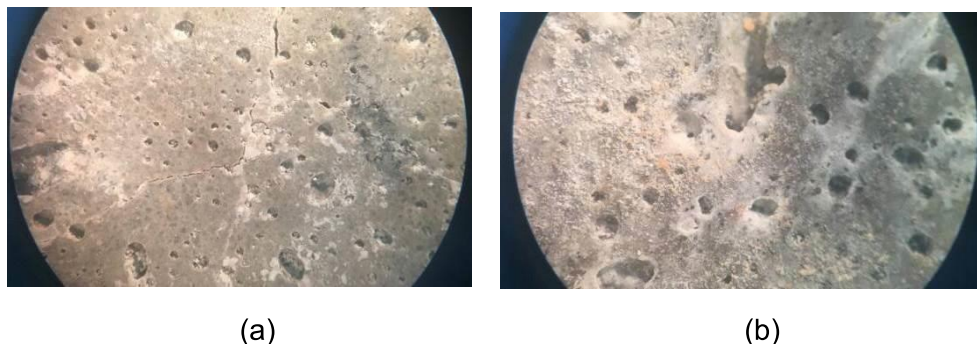
Figura 96 – Registros de cicatrização da amostra PC30.R.CU.12b, idade de 84 dias, (a) fissura secundária, aprox 7,5x (b) superfície, aprox 20x (c) interior da fissura principal, aprox 30x



Conforme percebe-se na Figura 96, na FS, de menor dimensão, houve maior formação e acúmulos de produto de cicatrização, assim como na superfície. Denota-se que a maior abertura na FP talvez tenha sido o ponto que impediu ou dificultou sua cicatrização, sendo esse ponto crucial para a ocorrência de CP e CC (TANG; KARDANI; CUI, 2015). Destaca-se que em tais amostras a abertura da fissura foi superior a 1 mm.

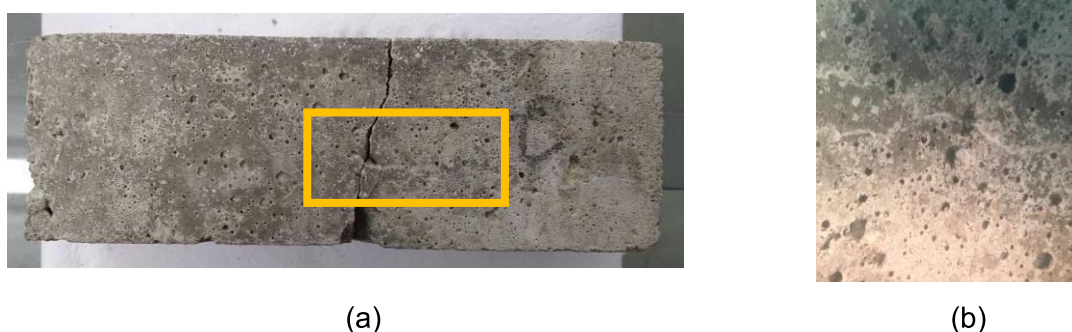
No traço PS7.5, as amostras com a formação de fissura por meio do corte mecânico não apresentaram nenhuma ocorrência. Algumas das amostras nas quais houve ocorrências fissuradas pelo ensaio mecânico são apresentadas a seguir. A Figura 97 apresenta a amostra PS7.5.N.CS.3c. Nessa amostra, percebeu-se a presença de esbranquiçado na FS e nas irregularidades ou falhas superficiais presentes na amostra.

Figura 97 – Evidências de formação de produtos - amostra PS7.5.N.CS.3c, idade de 84 dias (a) aprox. de 10x (b) aprox. de 20x



Como evidencia a Figura 97, houve depósito de produto esbranquiçado na superfície das amostras sem escorrimento ou formação de produto em relevo. Essa formação menos expressiva e sem depósito superficial é vinculada à presença de C-S-H (KRELANI, 2015). Dando continuidade, na amostra PS7.5.N.CU.6c, percebeu-se PBE na FS, percebida inclusive a olho nu, conforme evidencia a Figura 98.

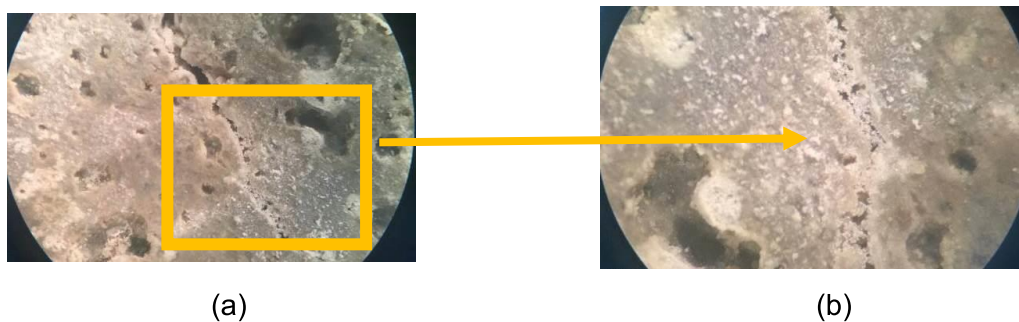
Figura 98 – Verificação de cicatrização da fissura secundária na PS7.5.N.CU.6c, espessura máxima recuperada de 0,34 mm, idade de 84 dias (a) dimensão real (b) aprox. 7,5x



O valor de abertura da FS apresentada concorda com os dados da bibliografia, uma vez que tem 0,34 mm, para uma faixa citada de 0,2 a 0,3 mm, por exemplo, por Tang, Kardani e Cui (2015).

A Figura 98 apresentou fenômeno de cicatrização ocorrendo ao longo de toda a FS, de cor esbranquiçada. Destaca-se, nesse caso, a evidência de viabilidade de cicatrização na FS (0,7 mm) de espessura muito interior a FP (1,19 mm). Dando continuidade, a Figura 99 apresenta as ocorrências verificadas na amostra PS7.5.R.CS.7d.

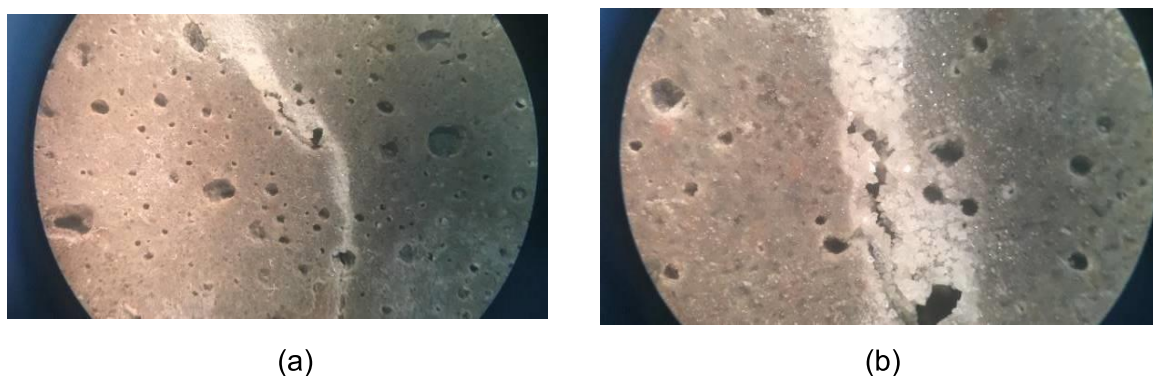
Figura 99 – Ocorrências verificadas na PS7.5.R.CS.7d (a) aprox. 20x (b) aprox. de 40x



Nessa amostra, os produtos formados apresentam-se em relevo, sendo superiores à superfície das amostras, ocorrência atribuída à calcita, como já citado. Qasrawi, Shalabi e Asi (2009) afirmam que a utilização de SA para a cicatrização é eficaz dado seu efeito pozolânico e produção de C-S-H secundário, no entanto, indicando que esse deveria ser o mecanismo preponderante.

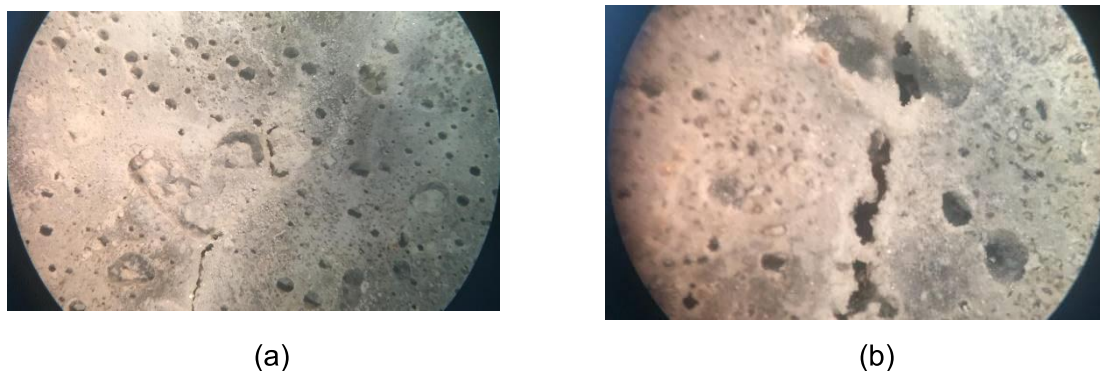
A Figura 100 apresenta evidências da amostra PS7.5.R.CS.8d. Nessa amostra, também percebeu-se ocorrência de produtos em saliência em relação à superfície da amostra.

Figura 100 – Verificação das ocorrências da amostra PS7.5.R.CS.8d, aos 84 dias (a) aprox. 7,5x e (b) aprox. 30x



O formato da verificação percebida na amostra apresenta semelhança com o já apontado na bibliografia e nos estudos de Hung, Su e Su (2018), Krelani (2015) e Parks et al., (2010). Percebeu-se novamente o formato irregular dos cristais nesse ponto, a cicatrização completa em alguns trechos e o maior acúmulo de cristais. Finalizando as evidências apresentadas pelas amostras PS7.5, tem-se a Figura 101, incluindo as aproximações de 7,5 e 20x.

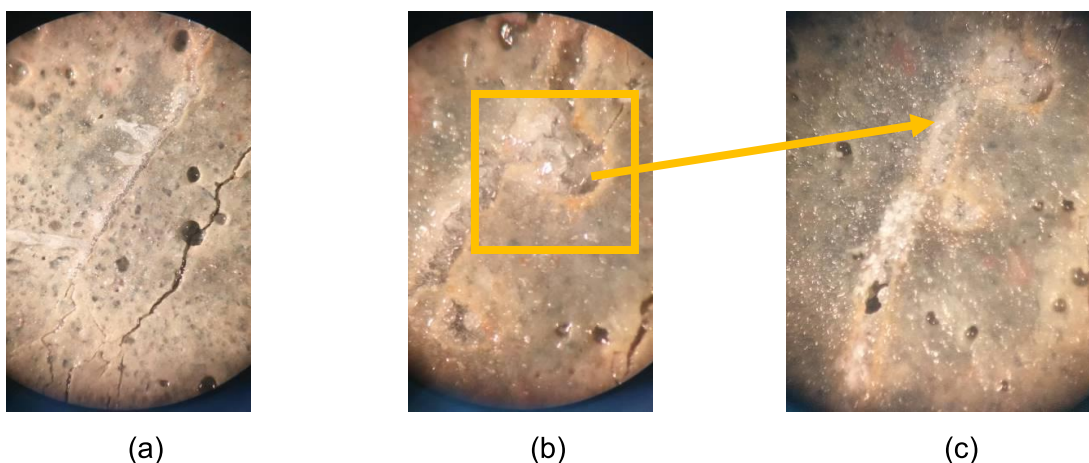
Figura 101 – Verificação das ocorrências na amostra PS7.5.R.CS.9b (a) aprox de 7,5x e (b) aprox de 20x



Pela Figura 101, tem-se a formação de cristais e o depósito de produtos cicatrizantes na parede da fissura. Na Figura 101b, tem-se a evidência de que no trecho há um ponto em que a cicatrização chegou a ser completa. No ponto em que foi verificada CP pode ter havido CH disponível na superfície para a formação de produtos de cicatrização. O tipo de ocorrência é citado por Krelani (2015) como formação de calcita. Dentre as ocorrências, percebeu-se que a CP foi predominante, sendo seguida por PBE.

Em relação ao traço PS 15, novamente não foram percebidas ocorrências de cicatrização. Uma das justificativas para tal pode ser a o aspecto das paredes e sua influência para a fixação dos produtos (SAHMARAN et al., 2013). Os eventos percebidos são relatados a seguir, iniciando pela Figura 102 que apresenta a PS30.N.CU.4c, com destaque para a formação excedente de produtos de cicatrização.

Figura 102 – Evidências de cicatrização na amostra PS15.N.CU.4c, aos 84 dias (a) aprox. de 10x (b) aprox. de 40x (c) aprox. 30x

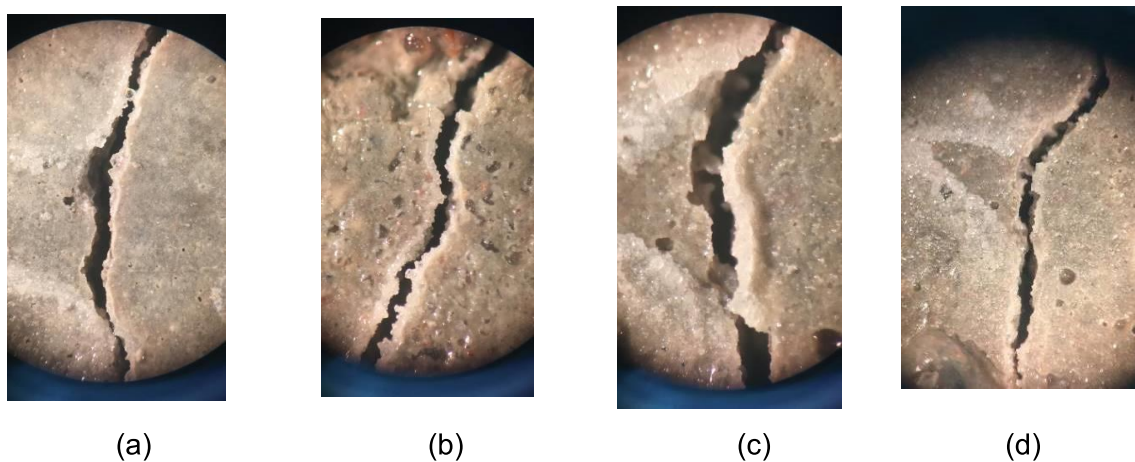


Como percebe-se na Figura 102, além de haver formação de produto ao longo da fissura, nota-se o formato de escoamento de produto excedente, o que acarretou um percentual de cicatrização de 122%. Mais uma vez, tem-se a existência de irregularidade na amostra próxima à região onde foi apontada essa cicatrização. Há outros pontos que devem ser destacados em relação a referida figura:

- Na Figura 102a, percebe-se na amostra uma fissura cicatrizada e com escoamento, enquanto que, a fissura ao lado não apresentou a formação de produto de cicatrização. A fissura cicatrizada apresentou menor abertura, o que pode ter favorecido a formação desse produto. Além disso, tem-se a hipótese de que a água tenha permanecido na menor fissura, e na fissura superior possa ter escoado, não possibilitando a formação dos produtos. Não apenas a rugosidade superficial mas também a permanência de água estariam influenciando na formação de produtos.
- na Figura 102b, no interior da fissura, percebe-se o formato de cristais sobrepostos e em alguns casos com aspecto pontiagudo. Esse formato de sobreposição de cristais é atribuído por Alghamri et al., (2016) à formação de calcita. O referido autor informa que o formato pontiagudo é característico da etringita, concordando nesses dois pontos ao informado por Escoffres et al., (2018). Krelani (2015) aponta para um formato dentado para a formação de CaCO_3 ;
- na Figura 102c, percebeu-se que a irregularidade presente no perímetro da amostra pode ter favorecido a formação de produtos que se depositam ao redor da irregularidade e ao longo da amostra, concordando com o já apresentado.

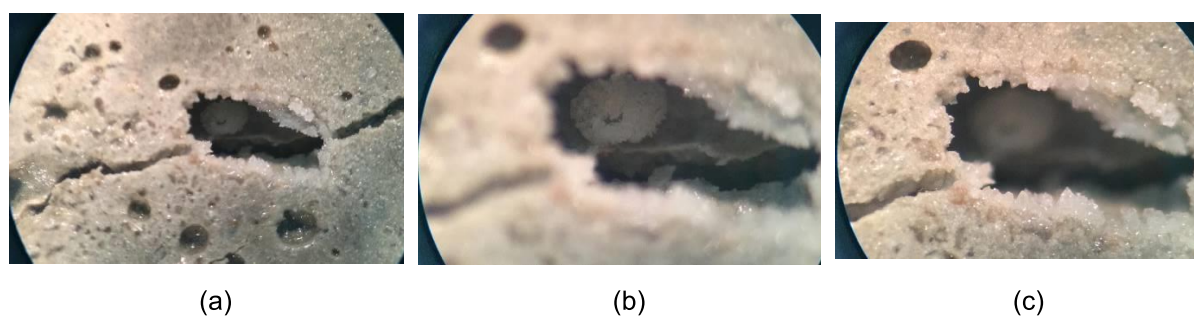
A Figura 103 dá continuidade à exposição dos resultados, indicando para o formato dos produtos e classificados como PBE.

Figura 103 – Verificações na amostra PS15.R.CS.8a, classificação da ocorrência como PBE, (a) aprox. de 7,5x, 56 dias, (b) aprox. 20x, 56 dias (c) aprox. 30x, 56 dias e (d) aprox. de 7,5x, 84 dias



Na Figura 103c, é possível perceber pela diferença de coloração que há espessura relevante da lâmina formada em direção ao centro da fissura, ocorrendo essa manifestação aos 56 dias. Além disso, deve ser citado o formato que foi verificado de irregularidade na formação de produto. Em específico, na Figura 103b, percebe-se que há saliências, e se a fissura fosse menor, poderia ter ocorrido a cicatrização. Hung, Su e Su (2018) indicam que o produto formado em decorrência das reações pozolânicas é irregular, branco e ocorre no perímetro da fissura, concordando com o verificado. Em termos de composição química, os referidos autores informaram que há presença de CaCO_3 e C-S-H. Deppa e Kala (2018) citaram apenas o C-S-H como produto verificado em seu estudo. A Figura 104 expõe perímetro de uma grande irregularidade da amostra, com a formação de cristais no formato irregular e pontiagudo.

Figura 104 – Verificações realizadas na amostra PS15.C.CS.15d (a) aprox 20x (b) aprox 40x, interno (c) aprox de 40x, externo



Essa irregularidade percebida na Figura 104 pode ter sido obtida no ensaio mecânico empregado para formação da fissura, podendo se intensificar pela presença de um agregado graúdo. O agregado pode se desprender diante da fissuração e causar danos em decorrência da sua volumetria, superior à espessura da fissura. Roig-Flores et al., (2015) concordam com essa hipótese, informando que a presença do agregado pode afetar a cicatrização. Ainda em relação a Figura 104, percebe-se em b que internamente na base da fissura há presença de produtos de cicatrização.

Sobre essa ocorrência interna e externa são delineadas duas hipóteses:

- (a) A formação do produto ocorreu ao longo de toda a fissura, porém, não houve qualidade, densidade e adesão desse produto, tendo esse se rompido e desprendido da superfície da fissura.
- (b) A formação ocorreu na base pela disponibilidade de água no interior da fissura, além das características de formato da fissura e disponibilidade de água, ocorrendo ainda, de modo menos expressivo até a parede da fissura. Sahmaran et al., (2013) confirmam essa hipótese ao afirmar que em concretos pozolânicos o produto tende a se formar na base das fissuras.

A Figura 105 apresenta a amostra PS15.C.CU.16c, na qual percebe-se a formação de CC em alguns trechos.

Figura 105 – Evidências da cicatrização na amostra PS15.C.CU.16c, aprox. (a) 20x e (b) 30x



(a)



(b)

Como ilustrou a Figura 105, há ocorrência de CC em alguns pontos e em outros não. Em relação a essa verificação, pode-se supor que:

- (a) nos trechos em que a fissura foi cicatrizada havia maior disponibilidade de pasta, tendo a pozolana atuado na cicatrização de modo efetivo e sem sofrer o impacto negativo da presença do agregado graúdo;
- (b) nos pontos em que houve a cicatrização completa a espessura da fissura tinha menor dimensão e por isso o fechamento foi efetivo;

(c) Huang, Ye e Damidot (2013) apresentam a diferença em termos de cimento anidro no perímetro da fissura e na amostra como um todo, indicando que nem sempre há partículas no interior da fissura, o que pode ter ocorrido também com a disposição das pozolanas.

A Tabela 52 sintetiza as ocorrências nas amostras com utilização de pozolanas.

Tabela 52 – Síntese dos resultados obtidos nas amostras com análise do uso de P

Traço	Tipo de fissura	e. Máx cicatrizada para cada tipo (mm)		e média dentre as cicatrizações (mm)		Nº de amostras com ocorrência de cicatrização					
		CC	CP	CC	CP	N		C		R	
						CS	CU	CS	CU	CS	CU
PC15	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,640	0,490	0,376	0,454	4	6	0	0	7	3
PC30	Corte mecânico	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,600	0	0,525	0	3	0	1	0	3	3
PS7.5	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,440	0,590	0,400	0,370	3	2	0	0	5	4
PS15	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,500	0,700	0,312	0,365	7	8	5	2	11	4
Número total de ocorrências						18	16	6	2	26	14

Legenda: PC: amostras contendo cinza volante e PS: amostras contendo sílica ativa; e: espessura; N: névoa salina; C: carbonatação; CS: cura submersa; CU: cura úmida; CC: cicatrização contínua; CP: cicatrização pontual;

Em relação ao apresentado na Tabela 52, alguns pontos podem ser destacados. Quanto ao tratamento das amostras, enquanto 40 das ocorrências se deram nas amostras do grupo referência e 34 no grupo submetido à névoa salina, esse número foi de apenas 10 para as amostras submetidas à carbonatação acelerada. Isso reforça o que foi apresentado por Zemskov, Copuroglu e Vermolen (2013), que afirmam que a substituição pozolânica acarreta em dois efeitos: menor quantidade de CH e maior propensão à carbonatação. Assim, o CH existente pode ter sido consumido na formação da calcita ao longo da matriz, não restando em quantidade suficiente para a ocorrência da cicatrização das fissuras. Em relação ao apontado pelos autores, todavia, não houve relação na presente pesquisa com o acréscimo no teor de uso, uma vez que tanto no uso de CV quando no uso de SA, as ocorrências foram superiores nos traços de maior teor de pozolanas.

No que tange à presença de água, 50 amostras dentre as que houve registro de cicatrização foram submetidas a CS, contra 32 corpos de prova em CU.

Ramezaniapour e Malhotra (1995) indicam que as reações pozolânicas são impactadas consideravelmente quando há redução da umidade na cura dos concretos, indicando superioridade da CS, concordando com esse estudo. Reedy e Ravitheja (2019), Gupta e Kua (2016) e Sahmaran et al., (2013) também pontuam essa necessidade da presença constante de água para a formação dos cristais.

Em relação aos traços com a utilização de CV, tem-se 20 ocorrências no traço PC15 e 11 no grupo PC30. Em relação ao número de ocorrências não se apresenta vantagem em aumentar o percentual de utilização de CV, porém, através do traço PC30, alcançou-se maior espessura de CC média entre as ocorrências verificadas.

Nos traços com a utilização de SA a diferença entre os percentuais de uso foi mais impactante. No traço PS7.5 foram apontadas 14 ocorrências, contra 37 apontadas no traço PS15, assim, não apenas em termos de resistência mecânica há vantagens na utilização de maior uso de SA. No entanto, em termos de cicatrização potencial e média, os valores apresentaram semelhança nos diferentes teores.

Entre esses dois traços, no entanto, notou-se a relevância da espessura da fissura. O traço PS 15 foi referente a um grupo amostral com menor espessura de fissura, e parece ter sido um ponto fundamental para proporcionar mais registros de CC e de CP (MUHAMMAD et al., 2016; ROIG-FLORES et al., 2015;)

Lakshimi e Anupriya (2019) avaliaram diferentes teores de utilização de SA (0,5,10 e 15%), indicando que o mais eficiente para a cicatrização foi o teor de 15%, concordando com a análise do presente estudo. O fato de ter-se aumentado o número de ocorrências com o acréscimo no teor das adições pozolânicas contraria o que foi apresentado por Zemskov, Copuroglu e Vermolen (2013) em relação a disponibilidade de CH. Ainda em relação ao uso de SA, Poon, Lam e Wong (1999) pontuam que há refinamento da matriz reduzindo os seus vazios. Isso foi percebido no traço PS15, que apresentou a menor absorção de água dentre os traços desse estudo. Essa menor absorção pode ter proporcionado maior permanência da água na região da fissuração (não sendo conduzida para a matriz) e favorecendo, assim, a ocorrência da cicatrização.

Nas composições contendo adições pozolânicas nenhuma fissura provocada pelo corte apresentou ocorrência da cicatrização, apenas produtos na face interna e esbranquiçada na fissura, possivelmente indicando a limitação do método em fissuras de menor dimensão e/ou ainda, a condição de fixação do produto, com rugosidade adequada na superfície e relacionando-se ao formato da fissura.

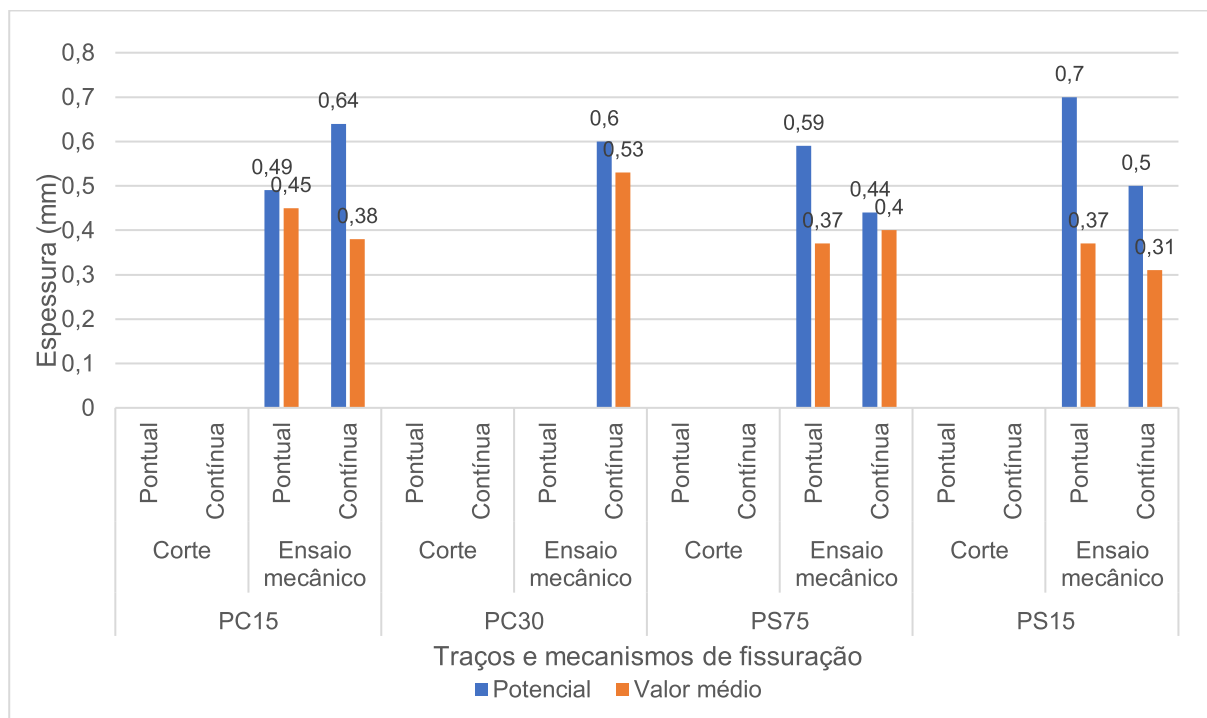
Cabe fazer uma consideração em relação à idade em que foram percebidos os fenômenos de cicatrização. Por conter CV e SA em sua composição, espera-se que a formação de produtos de cicatrização pela atuação das pozolanas ocorra em idades mais avançadas (AGGARVAL; GUPTA, SACHDEVA, 2010; DEMBOVSKA et al., 2017b) nesse estudo, de 56 ou 84 dias, uma vez que se faz necessária a presença de CH gerado nas reações de hidratação do cimento. No entanto, em algumas amostras a formação de produtos na verificação aos 28 dias após a fissuração, ou seja, 56 dias de cura. Assim, pode-se assumir que essa idade foi suficiente para hidratação do cimento e geração do C-S-H pela reação secundária de hidratação com as pozolanas. A hipótese de não disponibilidade de CH suficiente para a reação pozolânica é descartada, uma vez que Anjos et al., (2012) afirmam que com substituição de até 50% de cimento por pozolanas ainda há disponibilidade suficiente para sua ativação.

Ainda em relação a esse grupo amostral, pode-se perceber que na maior parte das amostras as ocorrências foram verificadas apenas aos 56 dias, concordando com Ferrara et al., (2018) que pontuam que amostras com o uso de pozolanas tem um tempo superior para a formação de produtos. Soma-se a isso a constatação de Alyousif (2016) de que as amostras pozolânicas foram avaliadas em seu estudo até a idade de 150 dias, considerando que até essa idade ainda estavam ocorrendo as reações de formação de C-S-H secundário. No presente estudo, até os 84 dias percebeu-se acréscimo na resistência mecânica à compressão.

Ratnayake e Nanayakkara (2018) indicaram a cicatrização de fissuras de 0,125 mm em 51 dias, informando que esse tempo foi inferior nas amostras contendo apenas cimento. Hung, Su e Su (2018) concordam com tais períodos e indicam ainda que há variação dos mecanismos de cicatrização preponderantes ao longo do tempo, indicando que a formação preponderante se altera para CaCO_3 em relação à formação de C-S-H. Nesse estudo a aparência pode ser vinculada à presença de calcita.

A Figura 106 apresenta em termos gráficos a espessura máxima e potencial dentre os valores cicatrizados.

Figura 106 – Espessura máxima e média cicatrizada (mm) em cada um dos traços, tipos de fissura e tipo de cicatrização- utilização de pozolanas



Através da Figura 106 tem-se análise gráfica da cicatrização verificada nos traços com a utilização de pozolana, complementando o já apresentado na Tabela 52.

Em relação às cicatrizações potenciais, em termos de ocorrência pontual (CP), percebeu-se o valor máximo de 0,70 mm, atribuído ao traço PS15. A CC máxima verificada foi de 0,64 mm, atribuída ao traço PC15. Ao analisar os valores médios, a cicatrização pontual máxima foi de 0,45 mm no traço PC15. A cicatrização contínua média foi superior no traço PC30, com valor de 0,53 mm. Percebe-se que todos os valores apresentados permaneceram na faixa entre 0,31 e 0,7mm.

Qureshi, Kanellopoulos e Al-Tabbaa (2019) citam valor semelhante ao estudado, indicando 0,5 mm de cicatrização quando usando pozolanas em oposição a 0,1 mm quando usado apenas cimento. Sahmaran, Yildirim e Erdim (2016) também se referem à 0,3mm e 0,5mm com o uso de CV. No presente estudo, o valor máximo chegou a ser de 0,7mm, superior aos autores citados. Seifan et al., (2016) falam que para ambos os métodos a limitação está entre 0,1 e 0,3 mm, sendo inferior a todos os valores apontados.

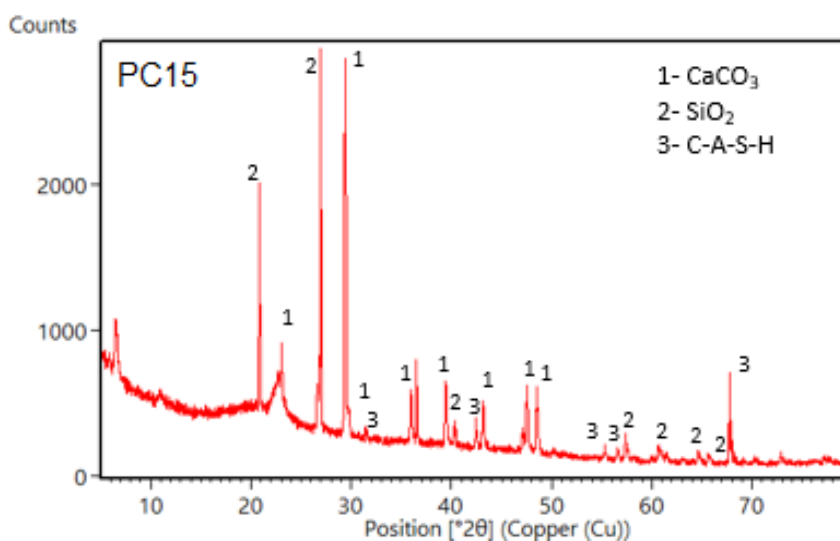
Termkhajornkit et al., (2009) testando a utilização de CV em concreto citaram a capacidade de selagem de apenas microfissuras (formadas por retração), inferiores a 0,1mm, indicando a limitação do método em fissuras de maior dimensão. Percebeu-

se, no entanto, uma CC máxima de 0,64 mm. Para contrapor esse resultado, Deepa e Kala (2018) afirmam que com uso de CV tiveram redução na abertura de fissura de 0,094 mm para 0,085 mm, indicando para limitação muito inferior ao obtido na presente pesquisa. Em algumas amostras, a formação de produtos se deu na parede interna e parcialmente. Ao utilizar valores de emprego de CV de 20 e 30%, Ratnayake e Nanayakkara (2018) perceberam formação de produtos de cicatrização entre 0,1 e 0,15 mm, por exemplo.

5.2.4 Análise química e microestrutural

Para identificação dos produtos gerados em decorrência do uso de pozolanas, foi coletada uma amostra no traço PC15, em relação ao uso de CV e duas amostras contendo SA, sendo uma do traço PS7,5 e PS15. Os difratogramas são apresentados na sequência. A Figura 107 apresenta o difratograma alusivo ao uso de CV.

Figura 107 – Difratograma de raios-X- Variável de uso de pozolanas- CV



Como percebe-se na Figura 107, foram identificados os compostos CaCO_3 , SiO_2 e C-A-S-H. Em termos do aparecimento do C-A-S-H, trata-se do produto esperado pelo uso de pozolanas (PUERTAS et al., 2011). Yildirim et al., (2018) também identificaram C-A-S-H em amostras contendo CV, concordando com o presente estudo. Além disso, houve a detecção de SiO_2 . Sobre essa, cabe destacar que Bhatt et al., (2019) realizaram um estudo compilado com a CV originária da queima de carvão em diversos países, concluindo que o teor de SiO_2 na sua composição variou entre 20 e 80%. Gruyaert et al., (2015) indicaram um percentual de 50,83% de SiO_2 na

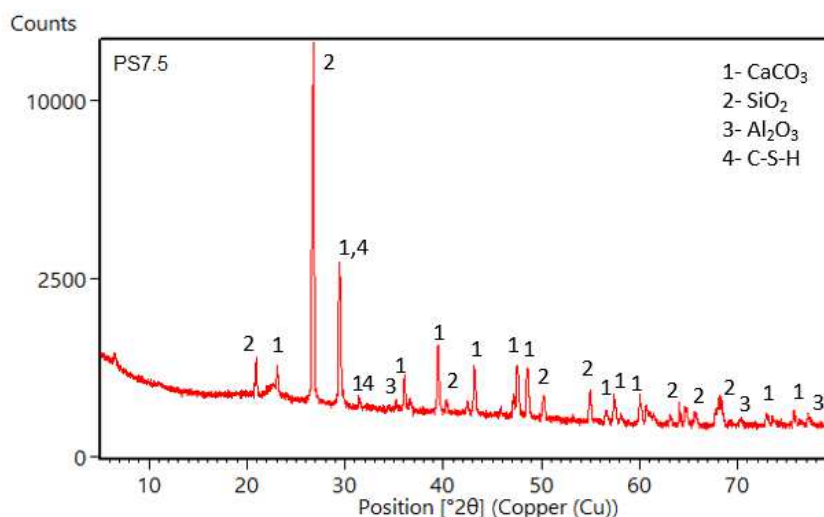
composição de CV. O teor de 15% de uso de CV parece ter causado efeito nos produtos verificados.

Ainda, foi detectada novamente a presença de Calcita, indicando para a carbonatação do CH. O formato apresentado pelo produto de cicatrização concorda com ambas as verificações, de C-A-S-H e de CaCO_3 , por variar em termos de apresentação e aspecto visual dos produtos vistos.

Especificamente em relação ao apresentado na Figura 107 o pico apresentado no diagrama mais a esquerda apresentou-se na análise como um produto decorrente da corrosão, podendo ter sido eventualmente uma contaminação na exposição da névoa salina, tendo sido a amostra pertencente a esse grupo de análise.

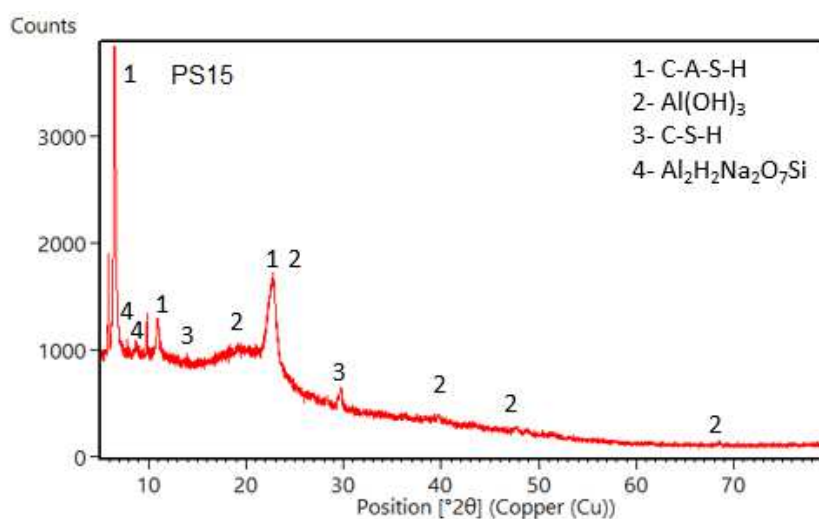
A Figura 108 e a Figura 109 apresentam o difratograma referente as duas amostra com uso de SA, com os teores de 7,5 e 15%, respectivamente.

Figura 108 – Difratograma de raios-X- Variável de uso de pozolanas- SA 7,5

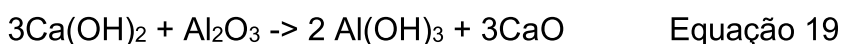


Como ilustra a Figura 108 foram notadas variações em relação ao traço contendo CV. Novamente percebeu-se a presença de SiO_2 e de CaCO_3 , sendo verificados também os compostos Al_2O_3 e C-S-H. A formação de C-S-H em oposição ao C-A-S-H pode decorrer do pequeno percentual de uso de SA. Os compostos SiO_2 e Al_2O_3 são presentes na composição da SA (PANJEHPOUR et al., 2011) e por isso podem ter sido identificados no difratograma. A amostra com maior teor de SA tem seu difratograma de raios-X apresentado na Figura 109.

Figura 109 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de pozolanas- SA 15



Como apresenta a Figura 109, nessa amostra detectou-se tanto a presença de C-S-H quanto a presença de C-A-S-H, sendo essa a primeira amostra que não apresentou a calcita em sua composição. Em relação a amostra anterior, a presença de C-A-S-H sendo verificado juntamente ao C-S-H pode ter ocorrido pelo acréscimo no teor de uso de SA. A presença de $\text{Al}(\text{OH})_3$ pode decorrer da reação de uma base com um óxido, oriundas da hidratação do cimento e da composição da pozolana, conforme apresenta-se na equação 19.

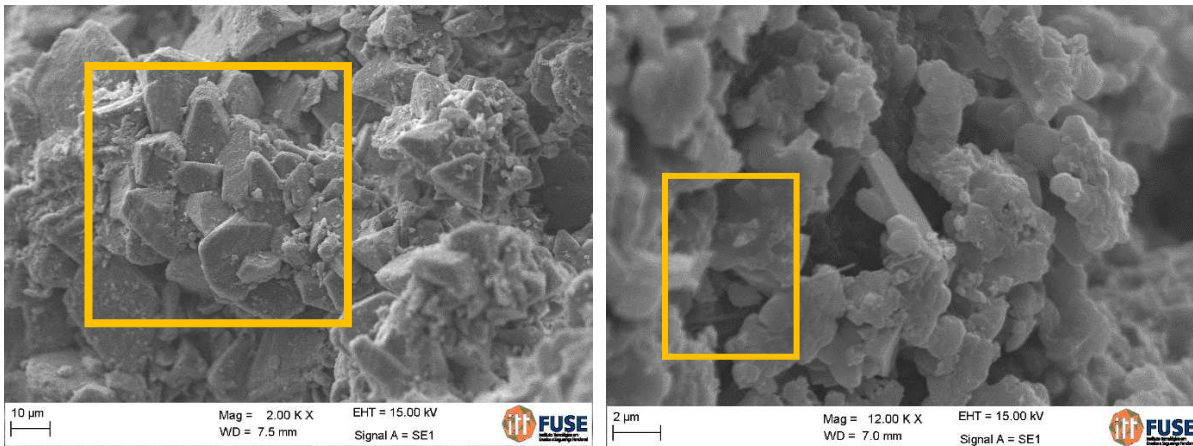


O Óxido de cálcio pode não ter sido identificado pois houve a identificação do carbono no C-A-S-H e do C-S-H.

Por fim, foi identificada ainda a presença em dois pequenos picos do produto identificado como $\text{Al}_2\text{H}_2\text{Na}_2\text{O}_7\text{Si}$. Sobre este, cabe destacar a presença de Al e Si, presentes na composição das pozolanas. A presença de sódio ocorre em pequena quantidade na composição da sílica ativa, o que pode ser um ponto de concordância com o produto apresentado.

Novamente, para complementar a análise dos produtos identificados, tem-se a a Figura 110 e a Figura 111 que apresentam imagens oriundas da microscopia em amostras contendo CV e SA, respectivamente.

Figura 110 – MEV- Amostra com variável do uso de P- CV- (a)PC15, aprox. de 2000x e (b) PC30, aprox. de 12000x

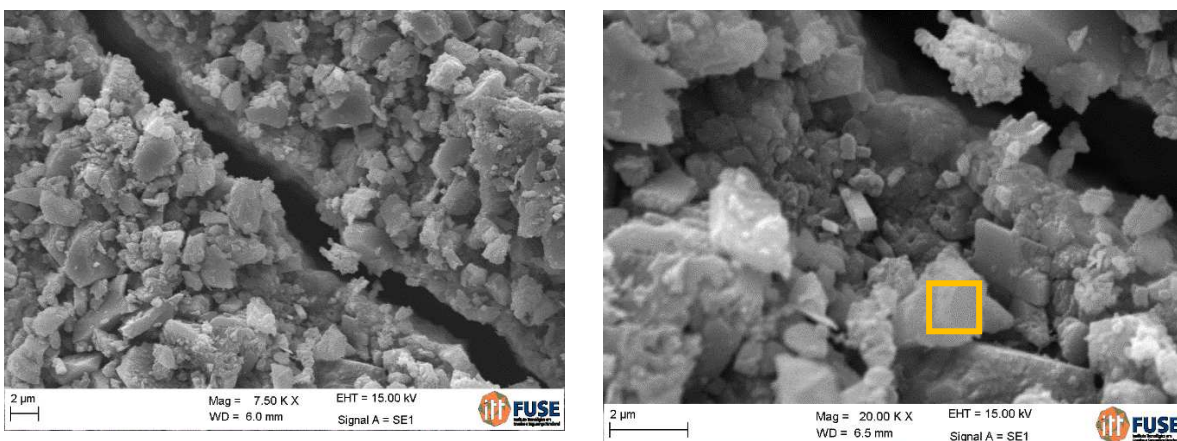


(a)

(b)

A Figura 110 apresenta semelhança com o que é apontado pela bibliografia como presença de calcita, ocorrendo com formato de lâminas sobrepostas (área destacada em a, por exemplo). O difratograma referente ao uso de CV reportou para a presença de CaCO_3 , tendo conformidade, portanto, com o apresentado nesse item. Em b, no entanto, percebe-se a presença de produtos no formato de longos fios. Atribui-se em bibliografia a formação de C-A-S-H como de formato denso (ROSSEN; SCRIVENER, 2017) podendo estar presente também nessa imagem. A Figura 111 apresenta imagens da microscopia em amostras contendo SA no teor de 15%.

Figura 111 – MEV- Amostra com variável do uso de P- SA, PS15, (a) aprox de 7500x e (b) 20000x



(a)

(b)

Deve-se citar, novamente, que percebe-se o formato de sobreposição de lâminas, em camadas. No difratograma avaliado no traço PS 7.5 ocorreu a identificação de CaCO_3 , porém, não percebido no traço PS15, sendo o material provável pela imagem da microscopia, porém, não sendo o principal produto que espera-se formar nesse tipo de composição. Cabe destacar que nesse estudo não foi realizada a MEV e o difratograma na mesma amostra, pois para as duas técnicas houve as etapas de corte e raspagem, o que poderia danificar o produto de cicatrização, e assim as técnicas foram realizadas em amostras diferentes de uma mesma composição. De fato, como percebido na verificação visual, entre as amostras há divergência no que tange ao formato e tipo de ocorrência dos produtos. A técnica de energia dispersiva de raios-X foi realizada nas áreas em destaque apresentadas pela Figura 110a e pela Figura 111, sendo obtidos os resultados da Tabela 53.

Tabela 53 – Verificação pela técnica de Energia dispersiva de raios-X

Identificação na amostra PC15		Identificação na amostra PS15	
Elemento	Percentual em massa(%)	Elemento	Percentual em massa(%)
C	36,76	C	6,13
Si	9,32	Si	6,16
Ca	53,92	Ca	41,61
O	-	O	44,85
Al	-	Al	1,25

Conforme aponta a Tabela 53, foi possível identificar a presença de silício e cálcio, sendo um forte indicativo da presença de C-S-H. No espectro de análise da amostra PC15 não foi percebida a presença de alumínio, o que poderia se esperar pela identificação de C-A-S-H pela técnica de DRX. Essa presença, no entanto ocorreu na amostra PS15, concordando com o difratograma supraapresentado. A verificação de carbono percebida na PC15 concorda com a identificação realizada pelo DRX que apontou para a presença de CaCO_3 , que ocorreu pelo DRX na amostra PC15 mas não na amostra PS15.

5.3 AUTOCICATRIZAÇÃO PELO USO DE SOLUÇÕES QUÍMICAS

5.3.1 Resistência à compressão

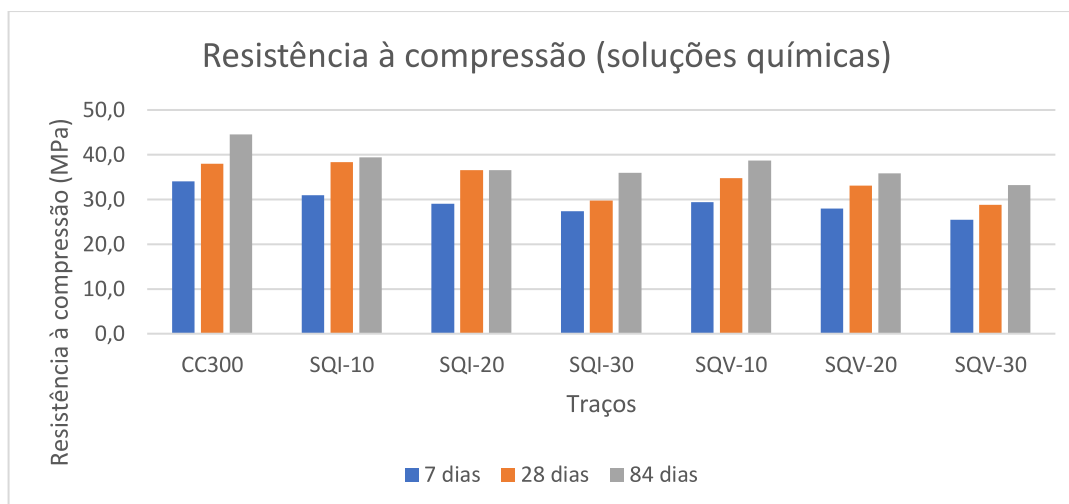
A Tabela 54 apresenta os resultados de resistência à compressão das amostras contendo soluções químicas. A Figura 112 complementa a apresentação dos dados de forma gráfica.

Tabela 54 – Resultados de resistência à compressão (MPa) das amostras contendo SQ

Amostra	7 dias				28 dias				84 dias			
	Tensão	Valor pot	Valor médio	dp	Tensão	Valor pot	Valor médio	dp	Tensão	Valor potencial	Valor médio	dp
CC300.1	32,4				27,6				44,0			
CC300.2	34,0	34,0	31,0	3,9	36,9	38,0	34,2	5,7	42,4	44,5	43,6	1,1
CC300.3	26,6				38,0				44,5			
SQI-10.1	31				38,3				39,4			
SQI-10.2	30,3	31	30,5	0,4	35,8	38,3	37,1	1,3	36,8	39,4	37,6	1,5
SQI-10.3	30,3				37,1				36,7			
SQI-20.1	29,1				36,3				35,5			
SQI-20.2	27,1	29,1	27,9	1,1	34,7	36,6	35,9	1,0	35,2	36,6	35,8	0,7
SQI-20.3	27,4				36,6				36,6			
SQI-30.1	27,4				28,9				36			
SQI-30.2	26,3	27,4	26,9	0,6	29,8	29,8	28,5	1,5	35,7	36	35,8	0,2
SQI-30.3	26,9				26,9				35,6			
SQV-10.1	28,6				34,8				36,8			
SQV-10.2	29,1	29,4	29,0	0,4	33,7	34,8	34,3	0,6	37,9	38,7	37,8	1,0
SQV-10.3	29,4				34,4				38,7			
SQV-20.1	26,4				33,1				35,8			
SQV-20.2	28	28	27,2	0,8	32,8	33,1	32,8	0,3	35,7	35,8	35,4	0,6
SQV-20.3	27,1				32,5				34,8			
SQV-30.1	23,6				27,5				33			
SQV-30.2	25,1	25,5	24,7	1,0	27,9	28,8	28,1	0,7	33,2	33,2	32,6	0,8
SQV-30.3	25,5				28,8				31,7			

SQI refere-se as amostras com solução química impregnada por imersão. SQV refere-se a impregnação com aplicação de vácuo. Os números ao lado indicam o teor de uso da PE, de 10, 20 e 30%. CC300 é a referência de comparação dos demais traços.

Figura 112 – Valores de resistência à compressão axial das amostras contendo SQ



Conforme os resultados apresentados, pode-se perceber o efeito da incorporação do agregado leve na *fc* em todas as idades. Tanto nos agregados impregnados à vácuo (SQV) como nos impregnados por imersão (SQI), percebeu-se a relação inversamente proporcional entre o teor de uso da PE e a *fc*. Reforçando o percebido nesse estudo, Sengul et al., (2011) citam que se espera tais resultados. Os autores citados, ao comparar uma amostra referência com a de substituição de 20%, perceberam uma redução na resistência de 40%. A redução obtida no presente estudo foi de 21,5% entre a referência e o teor de 30% de PE submetidos à imersão.

Analisando-se as amostras SQI, cabe citar que o acréscimo dos 28 aos 84 dias chegou a ser de 20% para o teor de 30% de uso de PE. Nos demais teores o valor se manteve praticamente o mesmo obtido na idade de 28 dias. Tal fato decorre da não utilização de adições pozolânicas, somado ao tipo de cimento empregado nesse estudo. Comparando as amostras desse grupo com o traço de referência, percebe-se em todos os teores que houve redução na *fc*.

Nas PE encapsuladas com uso de bomba de vácuo, os resultados foram semelhantes aos dos agregados tratados por imersão, porém, com valores inferiores de *fc*, em todas as idades de análise.

Jedidi, Benjeddou e Soussi (2015) afirmaram que teores de substituição de 45% ou mais apresentam impactos mais severos na *fc*, relatando que em seu estudo, ao empregar 30% do agregado leve, houve redução de 65% da resistência. Leyton-Vergara et al., (2019) apresentam essa mesma contatação da faixa de substituição,

indicando o teor máximo de 40% para viabilizar a resistência adequada dos concretos. O teor ótimo é apresentado por Alhazari et al., (2018) como de 20%.

Sahmaran et al., (2014) empregaram PE encapsuladas apenas com água em matrizes de compósitos cimentícios flexíveis, percebendo reduções de 11,8%, 20% e 34,5% para os teores de substituição de 10, 20 e 30%, respectivamente, como garantia de disponibilidade de água para cura e cicatrização. Considerando a idade de análise de 28 dias, os percentuais de redução nesse estudo foram de 0, 3,6% e 21,5% para os mesmos teores de 10,20 e 30%, respectivamente, considerando o encapsulamento por imersão, e de 8,4, 12,9 e 24,2%, respectivamente, para o tratamento com aplicação de vácuo. Os valores menores podem ter sido oriundos da granulometria utilizada de PE, ou das demais características do traço dos autores.

Leyton-Vergara et al., (2019) citam que os impactos sofridos pela matriz pelo uso da PE variam de acordo com a sua distribuição granulométrica e módulo de finura. No presente estudo, percebe-se ainda a influência do tratamento de encapsulamento no resultado dessa variável.

Sidiq, Gravina e Giustozzi (2019) citam que o silicato de sódio aumenta a resistência à compressão, porém, no presente estudo, percebeu-se que seu efeito foi inferior ao dano alusivo ao uso de PE.

5.3.2 Índices físicos: absorção total, massa específica e índice de vazios

A Tabela 55 apresenta os resultados de índices físicos das amostras contendo soluções químicas.

Tabela 55 – Valores obtidos de índices físicos- Amostras com soluções químicas

Amostras	Absorção de água		índice de vazios		Massa específica seca		Massa específica saturada		Massa específica real	
	indiv	méd	indiv	méd	indiv	méd	indiv	méd	indiv	méd
CC-300.1	3,63		8,38		2,31		2,39		2,52	
CC-300.2	3,39	3,35	7,76	7,74	2,29	2,31	2,36	2,39	2,48	2,50
CC-300.3	3,03		7,06		2,33		2,40		2,51	
SQI-10.1	6,42		14,15		2,20		2,34		2,57	
SQI-10.2	6,41	6,52	14,12	14,31	2,20	2,20	2,34	2,34	2,56	2,56
SQI-10.3	6,72		14,68		2,18		2,33		2,56	
SQI-20.1	6,71		14,70		2,19		2,34		2,57	
SQI-20.2	7,12	6,90	15,45	15,04	2,17	2,18	2,33	2,33	2,57	2,57
SQI-20.3	6,87		14,98		2,18		2,33		2,56	
SQI-30.1	7,48		16,03		2,14		2,30		2,55	
SQI-30.2	7,53	7,50	16,17	16,09	2,15	2,14	2,31	2,31	2,56	2,56
SQI-30.3	7,50		16,08		2,14		2,31		2,56	
SQV-10.1	6,10		13,43		2,20		2,33		2,54	
SQV-10.2	4,06	5,48	9,32	12,16	2,29	2,23	2,39	2,35	2,53	2,54
SQV-10.3	6,27		13,73		2,19		2,33		2,54	
SQV-20.1	7,22		15,65		2,17		2,32		2,57	
SQV-20.2	7,11	7,22	15,31	15,55	2,15	2,15	2,31	2,31	2,54	2,55
SQV-20.3	7,32		15,70		2,14		2,30		2,54	
SQV-30.1	7,81		16,52		2,11		2,28		2,53	
SQV-30.2	7,91	7,90	16,70	16,69	2,11	2,11	2,28	2,28	2,54	2,54
SQV-30.3	7,98		16,84		2,11		2,28		2,54	

Sengul et al., (2011) ao substituírem areia em diferentes teores por PE citam o impacto na absorção de água das amostras, em decorrência dos elevados vazios da PE. Jiang et al., (2020) informam que o procedimento de revestir as cápsulas de PE pode reduzir a absorção de água dos agregados e consequentemente pelos concretos. Porém, no presente estudo, mesmo com o revestimento com camada fina de cimento a absorção de água chegou a ser mais de 2x superior ao traço de referência, considerando as amostras SQV-30. Rashad (2016) informa que o acréscimo na absorção de água é esperado quando a PE é utilizada como agregado, o que não ocorre quando o material é empregado como fino.

No estudo de Jedidi, Renjeddou e Soussi (2015), os autores, diante do teor de substituição de 30% de agregado convencional por PE, obtiveram redução da massa específica na ordem de 24%, sendo que nesse estudo o percentual foi de 7,3% para massa específica seca, 3,3% para massa específica saturada e na massa específica real. O uso de PE acarretou em 3% do aumento em relação ao traço referência,

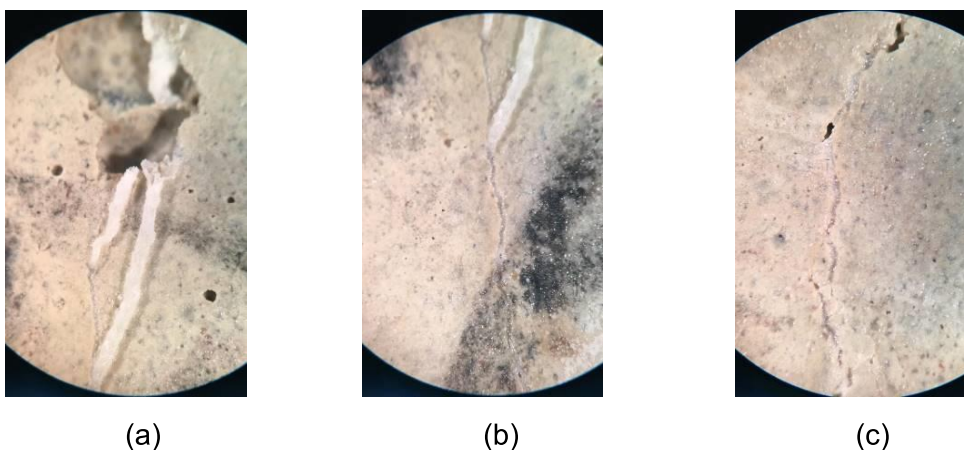
considerando-se o encapsulamento por imersão. O encapsulamento através de vácuo resultou em reduções de 8,6% para a massa específica seca, 4,6% para saturada e acréscimo de 1,5% para a real.

5.3.3 Análise visual - Microscopia óptica

As Tabelas referentes aos traços contendo soluções químicas são apresentadas no Apêndice D dessa pesquisa. Na sequência, apresentam-se os principais pontos destacados, iniciando-se pelo SQI10. Neste traço, em relação ao grupo submetido ao corte, não se percebeu a formação de nenhum produto de cicatrização.

Cabe citar que nesse grupo, percebeu-se em uma amostra a formação de produto de cicatrização excedendo a abertura e chegando a mais de 1mm (SQI10.R.CS.7a). Giannaros, Kanelloipoulos e Al-Tabbaa (2016) citam que essa formação é típica do uso de silicato de sódio, com acúmulo de material branco e se depositando sobre a superfície. Para ilustrar as ocorrências, seguem figuras alusivas a esse grupo amostral. A Figura 113 ilustra as manifestações ocorridas na amostra identificada como SQI10.N.CS.2.

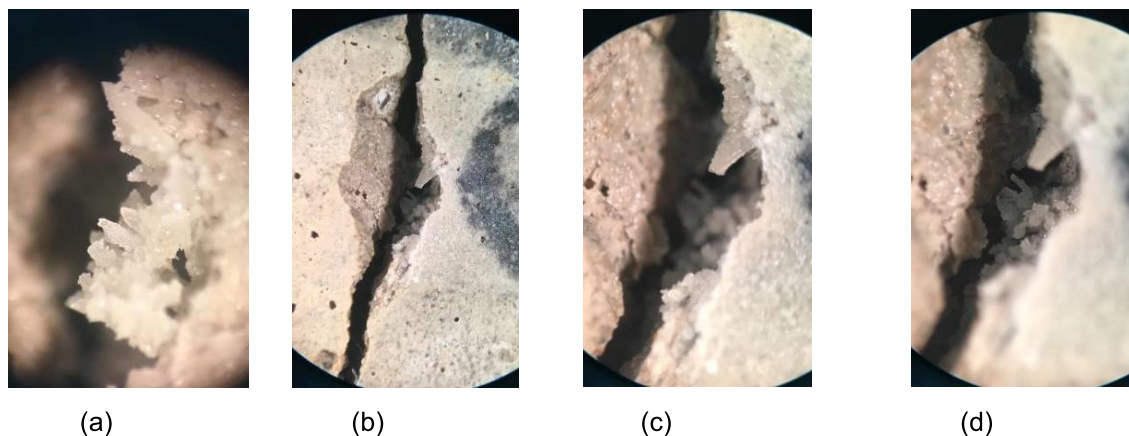
Figura 113 – Ocorrências da amostra SQI10.N.CS.2 em (a) face a, aprox. 20x (b) face a, aprox. 20x, excedendo a fissura (c) face c, com coloração incolor e esbranquiçada, 56 dias



Conforme a Figura 113, a formação de produto na fissura ocorreu e em alguns pontos extravasou a espessura da fissura, depositando-se na superfície. Percebe-se que a ocorrência não foi semelhante nas diferentes faces da amostra, o que pode ser decorrente da distribuição heterogênea das cápsulas no interior da matriz.

Na verificação da amostra SQI10.N.CS.3a, foi possível, com diferentes aproximações microscópicas, verificar o formato dos produtos de cicatrização formados na fissura, vide Figura 114.

Figura 114 – Verificações realizadas na amostra SQI10.N.CS.3a (a) 56 dias, aprox 30x (b) 84 dias, aprox 10x (c) 84 dias, aprox 20x (d) 84 dias, aprox 20x



Através da Figura 114a é possível perceber o formato cristalino verificado nos produtos de cicatrização, chegando a apresentar aspecto pontiagudo. O formato relatado é apontado na bibliografia por diversos autores (DE MUYNCK et al., 2008; KRELANI, 2015). Kalhori e Bagherpour (2017) perceberam tal formato somado à presença de cristais de calcita. Giannaros, Kannepoulous e Al-Tabba (2016) relacionaram esse formato à presença de etringita. Estes últimos autores perceberam através da técnica de DRX a presença de portlandita, etringita e C-S-H semicristalino.

O produto formado, no entanto, não se manteve nas demais idades, o que pode ser percebido na Figura 114b. Inclusive, percebe-se que houve ruptura do produto que passou a se situar na base da fissura, permanecendo apenas um ponto de CP. Considerando que tal amostra teve CS, pode-se supor que na submersão a pressão de água possa ter quebrado o produto de cicatrização. Além disso, na Figura 114, pode-se ver na interface entre o produto e o concreto que há vazios nesse perímetro, o que pode ter interferido nessa aderência. Muhammad et al., (2016) falam que nos diversos métodos alusivos aos SHC não há estabelecida a durabilidade do produto. Herbert e Li (2012) haviam citado essa lacuna referente à eficácia de adesão do produto à matriz gerada.

Outras ocorrências são apresentadas a seguir. A Figura 115a e a Figura 115b apresentam a formação de CP e CC, respectivamente.

Figura 115 – Verificações realizadas- Amostra SQI10.N.CS.3b e SQI10.N.CU.4a



(a) SQI10.N.CS.3b, aprox de 20x, 28 dias



(b) SQI10.N.CU.4a aprox de 10x, 28dias

Percebeu-se, assim como relatado na Figura 115a, que em algumas amostras, nos trechos com maior abertura de fissura, não houve a formação dos produtos, e sim, apenas lâminas nas irregularidades. Nota-se, inclusive, que por vezes, esse material pode ter perdido a aderência de sua fixação e não permanecido entre uma idade de análise e outra, reforçando o já citado. Não apenas a lâmina é verificada, mas ainda, trechos com cristais pontiagudos. Na Figura 115b, percebe-se coloração esbranquiçada e cicatrização ao longo trecho da amostra. Apenas em um trecho da cicatrização percebem-se pequenas falhas na formação do produto.

Em algumas amostras desse traço, assim como nos traços com uso de pozolana, verificou-se que, além de haver a formação de produto de cicatrização na fissura, essa ocorrência superou a abertura, contando com depósito de material na superfície, nos arredores da abertura avaliada, como pontuado anteriormente.

A Figura 116 apresenta esse fenômeno, incluindo a ocorrência de formação de produtos na borda de uma fissura, chegando a alcançar a espessura total em trecho superior da amostra e o escoamento de produto gerado na cicatrização.

Figura 116 – Verificações na amostra SQI10.R.CS.7a (a) face a, aos 84 dias, PBE e CC, aprox de 20x e (b) produto excedente a abertura da fissura, aprox de 7,5x



(a)



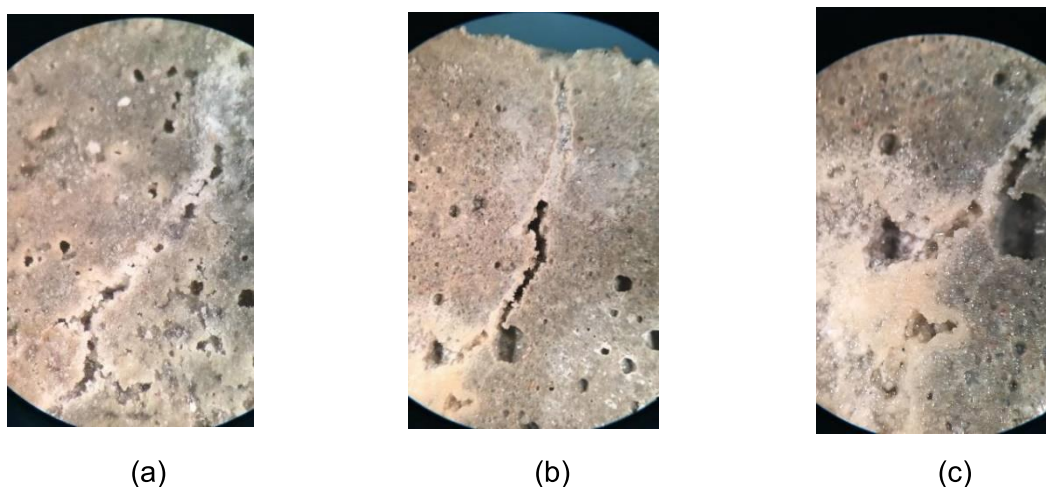
(b)

Como percebe-se na Figura 116a, houve a formação de produtos ocorrendo em espessuras consideráveis, tendo sido apontados trechos com CC. Na borda da fissura, perceberam-se cristais no interior das fissuras (PBI), que se assemelham à formação de C-S-H, conforme apontado pela bibliografia (HUANG;YE;DAMIDOT, 2013; HILLOULIN et al., 2016; KRELANI, 2015; SIDIQ, GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019). No trecho mais acima, e de maior espessura, no entanto, houve CC. Considerando que as amostras têm a mesma composição, exposição e cura, o que pode ter variado ao longo da mesma fissura é a presença de pasta e PE (e conseqüentemente do agente de cicatrização) e o formato interior da fissura. A Figura 116b apresenta fenômeno diferente no qual o produto formado escorreu fora da espessura da fissura, com grande relevo na amostra e depósito (ZAI; MURTHY, 2015). O aspecto verificado é de produto sólido, não são percebidos formatos de cristais pontiagudos.

Em relação ao produto químico empregado, a reação química esperada é a formação de gel de C-S-H (SIDIQ, GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019; LI et al., 2019), o que de fato se assemelha ao aspecto de cicatrização verificado na Figura 116a. Não há, no entanto, semelhança com outros estudos em relação à formação excedente de C-S-H como registra a Figura 116b. Cabe destacar, porém, que talvez o teor avaliado no presente estudo tenha sido superior a estudos semelhantes, e que assim, tenha havido excedente no que tange a disponibilidade de produtos de cicatrização.

Complementando a apresentação das ocorrências desse traço, a Figura 117 apresenta a amostra SQI10.R.CS.8b, analisada aos 84 dias, idade final de análise.

Figura 117 – Verificações na amostra SQI10.R.CS.8b, ocorrência de PBE e CC (a) aprox. 40x, 84 dias (b) aprox. 10x, 84 dias (c) aprox. 20x, 84 dias



A Figura 117 retrata uma ocorrência verificada na amostra SQI10.R.CS.8b que apontou de modo concomitante a presença de produtos sólidos e ao longo de região considerável da amostra e trechos onde houve apenas a formação de PBE. Como a distribuição dos produtos de cicatrização depende da dispersão da PE na matriz, pode-se supor que tenha ocorrido arranjo não homogêneo, e assim, em alguns trechos da fissuração há maior presença do agregado (GUPTA; KUA, 2016), resultando na maior reação com a água e com o CH gerando C-S-H.

Dando continuidade aos resultados para permitir a análise comparativa dos percentuais, tem-se que no traço SQI20, nas amostras submetidas ao corte, houve uma ocorrência de cicatrização, como evidencia a Figura 118.

Figura 118 – Formação de CC na amostra SQI20.N.CU.4, aprox de 10x, aos 84 dias.



A ocorrência verificada na Figura 118 se deu em fissura com espessura média de 1,48mm. Na imagem, percebe-se a formação de produto de coloração branca, de modo aparentemente denso (diferente do aspecto translúcido já verificado nas amostras alusivas ao consumo de cimento e na utilização de pozolanas). Percebeu-se, através dessa amostra, que com o uso de SQ há potencial de cicatrização em fissuras de espessura considerável. Além disso, diferentemente de outros métodos, parece não ter havido danos em decorrência da parede lisa provocada pelo corte na amostra. Há de ser citado, no entanto, que trata-se de uma única ocorrência em relação às 18 amostras que compõem esse conjunto. No traço contendo 10% de PE não percebeu-se cicatrização nas amostras fissuradas pelo corte, podendo ser uma influência do teor de PE na efetividade da cicatrização.

Manoj-Prabakar et al., (2017) analisaram o percentual máximo de uso de 6% de partículas encapsuladas com silicato de sódio em substituição ao cimento, percebendo que o melhor teor de substituição nesse caso foi de 4,5% para a cicatrização, indicando, porém, que o fator determinante pode ser o formato e a espessura da fissura formada (SAHMARAN et al., 2014). Em relação ao estudo do

autor, aponta-se que o percentual da presente pesquisa é superior, corroborando com a afirmação apresentada anteriormente, que o maior teor pode ter sido responsável pela formação excedente de cicatrização.

As ocorrências do traço SQI20 são apresentadas através das próximas figuras. Considerando que a ocorrência de PBE foi expressiva nesse grupo amostral, a Figura 119 apresenta de que modo essa ocorreu, considerando nessa figura a amostra SQI20.R.CU.4b.

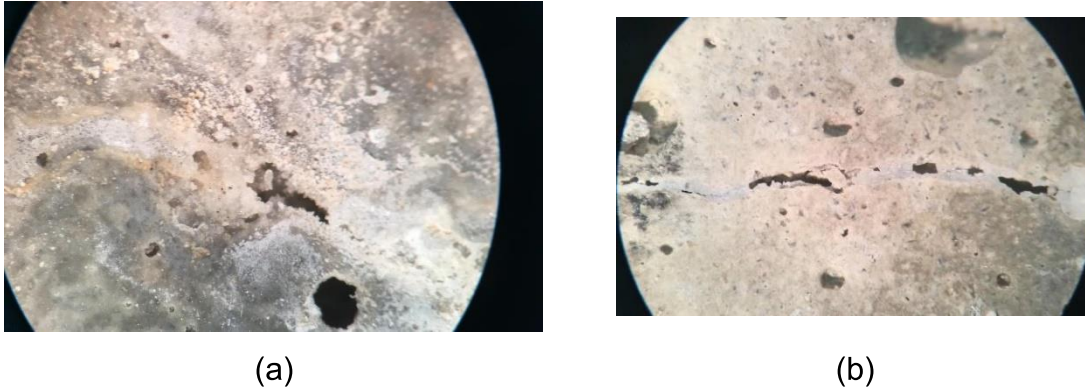
Figura 119 – Ocorrência de PBE, amostra SQI20.R.CU.4b, (a) aprox. de 30x, 84 dias
(b) 50x, 84 dias



Através da Figura 119 percebe-se o formato de pequenas agulhas nos produtos formados. Em alguns trechos, os dois lados da fissura chegam a se encostar, porém, não há solidez nessa interface, e assim, não se percebe ocorrência de CC ou de CP. Há uma incerteza relacionada a esse processo, referente a sua ocorrência no que tange à resistência e à adesão para que os produtos formados permaneçam aderidos à superfície. Para tal, deve atentar-se para adesão do produto com a matriz, conforme já destacado por Herbert e Li (2012) e Wang et al., (2019). No presente estudo não houve evolução para formação de CC.

A Figura 120 apresenta as evidências de cicatrização apontadas pelas amostras SQI20.N.CU.5b e SQI20.C.CS.13c.

Figura 120 – Evidências de cicatrização das amostras (a) SQI20.N.CU.5b, aos 56 dias, aprox de 30x e (b) SQI20.C.CS.13c, aprox de 40x e 28 dias de idade



Na amostra SQI20.N.CU.5b, percebe-se a formação de produto cicatrizante denso, ocorrendo em regiões da fissura e com pequenas falhas. O formato apresentado pelo produto de cicatrização nessa amostra é pontiagudo, com a presença de arestas. A coloração é esbranquiçada, podendo ser atribuída à presença de calcita, verificada por Giannaros, Kanelloupoulos e Al-Tabba (2016). Na amostra SQI20.C.CS.13c, denota-se para uma ocorrência divergente, com a formação de produto ocorrendo em alguns pontos, com outros, contudo, que apresentaram pequena presença de PBE. Questiona-se assim, se houve a disponibilidade de PE de modo contínuo e homogêneo ao longo da amostra. Outro ponto que pode ser destacado é a diferença de espessura que ocorre muitas vezes ao longo de uma fissura formada pelo ensaio de tração na flexão, podendo ser responsável pelos trechos com e sem ocorrência de CC e apenas PBE.

Dando continuidade à exposição desse traço, a Figura 121 aponta para amostra na qual a fissura ocorreu próxima a grande irregularidade superficial.

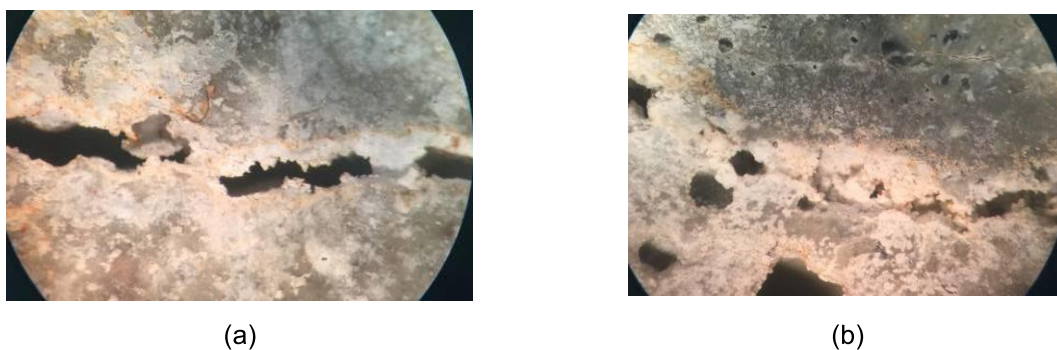
Figura 121 – Evidências de cicatrização amostra SQI20.C.CS.15b (a) zoom interno, aprox 30x, 56 dias e (b) externo, aprox 30x, 56 dias



Como pode ser percebido na Figura 121, notou-se não apenas a formação de PBE, mas ainda, a sua ocorrência ao longo da fissura, em seu interior. Há, assim, sinais de que havia a presença de água no interior da fissura e não apenas na superfície, considerada a CS e a espessura do local, além da disponibilidade do produto de cicatrização. Roig-Flores et al., (2015) destacam o formato da fissura como um fator crucial para o modo de ocorrência da cicatrização. Além disso, a presença dos produtos encontra-se próxima a uma irregularidade superficial e nesse ponto pode ter havido uma vantagem para adesão do produto formado. Em relação ao produto verificado nessa amostra, percebe-se uma sobreposição de camadas, atribuída pela bibliografia à presença de calcita (GIANNAVOS, KANELLOUPOULOS; AL-TABBAA, 2016; LI et al., 2019; PARKS et al., 2010).

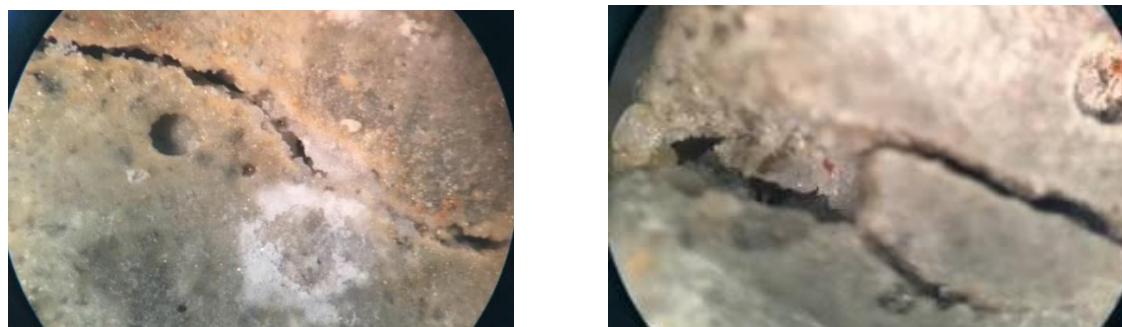
Finalizando os traços de SQI, tem-se os registros realizados no traço SQI30. Inicialmente, cabe destacar que nessa composição não houve nenhuma amostra com ocorrências dentre as submetidas ao corte, em oposição ao SQI20 e em concordância com o SQI10. A Figura 122 apresenta a PBE, em alguns pontos seu avanço até o centro da fissura e CP. As amostras a que essas Figuras se referem são do grupo exposto à névoa salina.

Figura 122 – Ocorrências nas amostras (a) SQI30.N.CS.3b, aprox 40x, 56 dias e (b) SQI30.N.CU.4b, aprox 30x, 56 dias



Como indica a Figura 122, houve formação de PBE ao longo das amostras, com coloração esbranquiçada e formato irregular. É possível perceber um aspecto de acúmulo de partículas na superfície, e em alguns pontos, o formato pontiagudo é novamente verificado, assim como relatado por Muyinck et al., (2008), relacionado à presença de calcita. A Figura 123 apresenta ocorrências semelhantes às citadas.

Figura 123 – Ocorrências nas amostras (a) SQI30.N.CU.6b, aprox 30x, 84 dias
(b)SQI30.R.CS.7a, aprox de 30x e 84 dias



(a)

(b)

Como percebe-se pela Figura 123a, tem-se a formação de PBE em alguns pontos e em trechos da amostra chega a ocorrer uma CC que supera a abertura de fissura. Cabe ser destacada a presença de produto esbranquiçado também na superfície da amostra. Na Figura 123b, percebeu-se uma suave formação de PBI em mais de uma fissura. Manoj-Prabakar et al., (2017), abordando o uso de Na_2SiO_3 , citam que há viabilidade de formação de produtos em múltiplas aberturas, indicando a pertinência dessa ocorrência. A Figura 124 apresenta duas amostras e a diferença no que tange o produto formado.

Figura 124 – Ocorrências nas amostras (a) SQI30.R.CU.12b, aprox 20x, 84 dias e
(b) SQI30.C.CS.15c, aprox 50x, 84 dias



(a)

(b)

Como é possível notar pela Figura 124, tem-se em (a) a formação mais comum nos traços, com PBE e ora a formação de CC e CP. A ocorrência apresentada em (b), no entanto, destoa das demais formações, concentrando-se na superfície das amostras, ao lado da fissura, porém não em seu interior, com formato esbranquiçado e não opaco, ocorrendo em lâminas. Por estar em superfície é mais provável que essa

formação possa ser atribuída à calcita, e de fato, a amostra em questão pertence ao grupo submetido a câmara de carbonatação, o que facilita sua formação.

Finalizando as ocorrências alusivas a esse traço, buscou-se através da Figura 125 apresentar o que se acredita ser a interface da matriz com a PE e a sua verificação na parede interna da fissura formada.

Figura 125 – Amostra SQI30.C.CU.18d, aprox de 50x e idade de 56 dias



Na Figura 125, percebe-se volume esbranquiçado no interior da fissura, o que pode ser atribuído a presença de PE. O fato de haver produto de cicatrização nos arredores desse ponto corrobora com essa hipótese, indicando que a fissura possa ter sido eficaz no que tange o rompimento do agregado leve e a liberação do produto de cicatrização que tende a se formar em sua periferia (LI; HERBERT, 2012; SHIVAM et al., 2017; ZHANG et al, 2017).

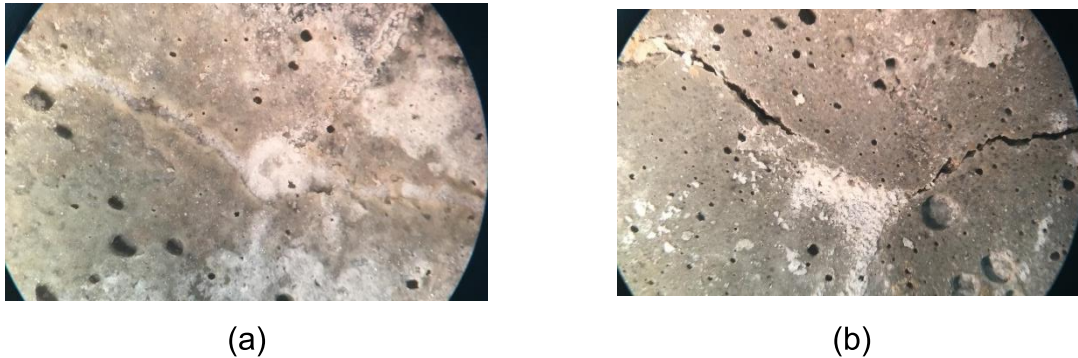
Inicia-se aqui a descrição dos traços nos quais a inserção da SQ na PE ocorreu com utilização de bomba de vácuo. O primeiro traço desse grupo é o SQV10, no qual foram percebidas duas ocorrências nas amostras fissuradas através de corte, sendo apenas a formação de produtos na borda interna.

Essa manifestação destoa da amostra também submetida ao corte e alusiva ao traço SQI20, uma vez que nessa última, houve formação densa do produto de cicatrização ao longo de toda espessura e extensão da fissura. As hipóteses poderiam ser a disposição da PE na fissura, o aspecto da sua parede interna e a limitação em termos da abertura. Deve-se considerar que entre os traços alterou-se o procedimento de encapsulamento do Na_2SiO_3 , o que pode ter impactado na liberação do produto de cicatrização. Mauludin e Oucif (2018) afirmam que há diferenciação em termos de desempenho relacionada a aderência da cápsula e a zona de transição, o que teoricamente poderia ter sido mantido entre os diferentes tratamentos desse estudo pela envoltória dos grãos com partículas de cimento. Li et al., (2019) pontuam a fácil solubilidade do Na_2SiO_3 em água, então a hipótese para essa diferenciação seria a distribuição do produto químico na matriz porosa da PE, que pode ter alcançado a

fissura com diferente concentração, impactando, como citado, na formação da cicatrização. Pelletier et al., (2011) citam que há tal variação com diferentes procedimentos e tratamentos com os agregados leves, concordando com o citado.

As imagens a seguir apresentam as ocorrências no traço SQV10. A Figura 126 aponta para ocorrências verificadas na amostra SQV10.N.CS.1, faces a e b.

Figura 126 – Ocorrências na amostra (a) SQV10.N.CS.1a, aprox de 20x, 84 dias e (b) SQV10.N.CS.1b, aprox de 7,5x, 84 dias



A ocorrência verificada na Figura 126a é a formação de produto em irregularidade e ao longo da fissura, o que ocorreu com aspecto esbranquiçado e denso, indicativos da formação de calcita. O formato difere do apresentado na Figura 126b, que indica uma maior dispersão do produto na superfície, com aspecto de escorrimento. Um fenômeno verificado nesse traço ocorreu na amostra SQV10.N.CU.5b, na qual, inicialmente, percebeu-se formação de PBE e após, CC na região de maior espessura da fissura, como indica a Figura 127.

Figura 127 – Evolução na cicatrização da amostra SQV10.N.CU.5b, análise aos (a) aprox 20x, 56 dias e (b) aprox 20x, 84 dias



Como apresenta a Figura 127, na amostra SQV10.N.CU.5b foi possível perceber um comportamento de progressão na formação de produtos de cicatrização, entre as idades de 56 e 84 dias. Inicialmente, havia PBI e PBE (bordas). Aos 84 dias, ainda havia falhas, e assim, a ocorrência não caracterizou-se como CC ou CP, mas

evidentemente houve acréscimo no produto da cicatrização, ainda que em região de irregularidade superficial, com maior abertura. Koster et al., (2015) citam que essa formação expressiva em um ponto indica que há presença do agregado leve no local, liberando o produto de cicatrização. Observando o perímetro da fissura, notam-se falhas e vazios, indicando a formação não contínua ou que pode ter havido despreendimento do produto formado. Outro ponto que pode ter culminado na existência das falhas é a espessura e geometria da fissura. (MULLEM et al., 2019). Danish, Mosaberpanah e Salim (2020) citam que diferentes métodos e produtos de cicatrização podem apresentar falhas, consideradas as inúmeras variáveis no processo. A Figura 128 apresenta a formação de CC em duas amostras.

Figura 128 – Formação de CC (a) SQV10.N.CS.2a, aprox 40x, 84 dias (b) e SQV10.R.CU.11b, aprox 20x, 84 dias



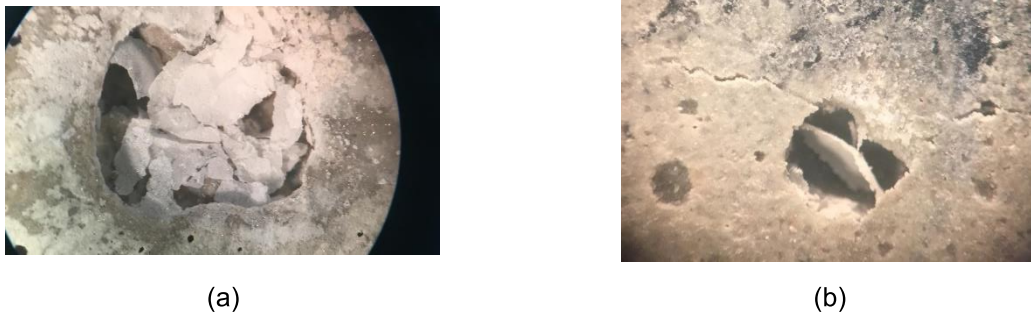
(a)



(b)

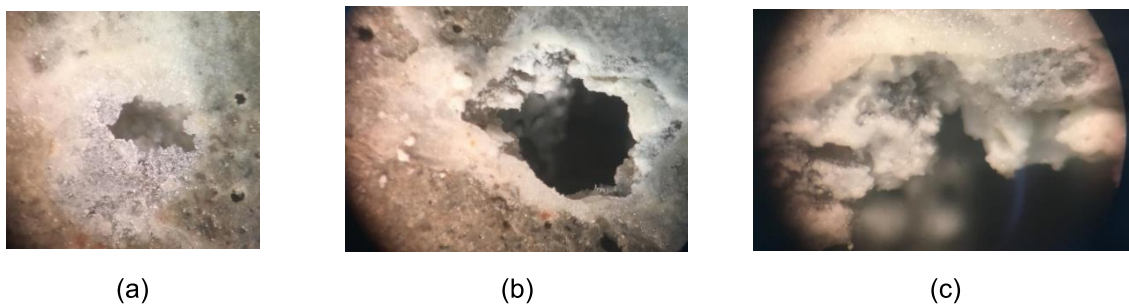
A Figura 128a mostra a formação de CC, e em alguns trechos com depósito na superfície, acima do produto formado na abertura da fissura. Também nessa figura, percebe-se que o produto formado é semelhante ao acúmulo de cristais já apresentado por Krelani et al., (2015), Park et al., (2010) e Schwantes-Cezario et al., (2019) . Já em (b), a amostra apresentou a formação de CC com espessura fina, sem depósito nas bordas ou superfície, com algumas falhas ou vazios. O acúmulo de material branco se acumulando sobre a superfície é apresentado por Giannaros, Kanellouopoulos e Al-Tabbaa (2016), que o atribuíram à presença de calcita, etringita e C-S-H semicristalino. Outra ocorrência verificada nesse traço foi a formação de produtos de cicatrização, porém, com sua quebra e ruptura, como indica a Figura 129.

Figura 129 – Ocorrências (a) amostra SQV10.N.CU.5c, aprox 20x, 84 dias (b) amostra SQV10.R.CS.9a, aprox. 7,5x, 84 dias



Nas amostras apresentadas na Figura 129, foi verificada a ocorrência da formação de produtos de cicatrização, que no entanto se desprenderam ao longo do tempo, se quebrando no formato de lâminas. Esse comportamento de quebra e falha de adesão dos produtos de cicatrização foi percebido por Tsangouri (2018) e destacado por Wang et al., (2019) como possível falha na cicatrização. Também em relação às irregularidades de fissuras, percebeu-se a formação de produtos de cicatrização com diferentes tipos de ocorrência, como ilustra a Figura 130.

Figura 130 – Ocorrências relacionadas a regiões com irregularidades nas amostras (a) SQV10.R.CU.11b, aprox. 30x (b) SQV10.R.CU.12b, aprox. de 30x (c) SQV10.R.CU.12b, aprox 50x



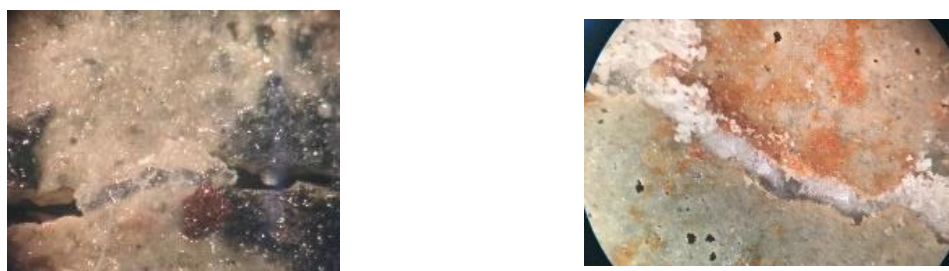
A Figura 130 apresenta a formação de produtos na irregularidade de fissuras. Em (a), percebe-se um aspecto transparente no produto de cicatrização, de forma radial do perímetro externo da fissura. Em (b), nota-se que a concentração do produto se manteve na borda, aparentemente com sobreposição, sem progressão na direção da abertura da fissura. Sabe-se pela bibliografia que esse formato dos produtos é atribuído a presença de calcita (HOMMA et al., 2009; SNOECK et al., 2016; ZAI; MURTHY, 2015), comprovado pela constatação que superficialmente a presença de CO_2 é maior (AL-TABBAA et al., 2019; BARY; SELIER, 2004; HUANG; YE; DAMIDOT, 2013). Cabe pontuar que essa ocorrência não se restringe apenas às

amostras relatadas na figura, ocorrendo ainda em amostras expostas à carbonatação, concordando com o citado. Em c, percebe-se a referida acumulação superficial.

No traço SQV20, não foram percebidas ocorrências nas amostras com fissura por corte. Dentre as amostras fissuradas por ensaio mecânico, percebe-se o escorrimento além da espessura da fissura, com valor máximo de 164%, alcançando nesse caso espessura de 0,456mm e uma espessura máxima de 0,854mm, superando valores apresentados em bibliografia, de por exemplo, até 0,2mm (LI et al., 2019). Se analisado o traço anterior, percebe-se uma certa semelhança mesmo com o acréscimo no teor de PE.

A Figura 131 aponta para ocorrência em amostras de mesma composição, condição de fissuração e cura, porém, com ocorrências diferenciadas.

Figura 131 – Verificações nas amostras (a) SQV20.N.CS.1a, aprox 50x, 56 dias (b) SQV20.N.CS.2c, aprox 40x, 84 dias



(a)

(b)

Na Figura 131a, tem-se a formação de uma placa transparente de cicatrização ao longo de toda a fissura e na Figura 131b, há produto esbranquiçado, com relevo em relação a amostra e de ocorrência contínua. Giannaros, Kanellopoulos e Al-Tabba (2016) citam em seu estudo que foi percebido C-S-H com estrutura cristalina pobre, como já foi citado, o que pode ser condizente com o apresentado na Figura 131a. Na Figura 131b notou-se que a ocorrência é semelhante a percebida na Figura 124, sendo ambas amostras referentes ao grupo exposto à névoa salina. Nessas, notou-se uma ocorrência diferenciada, sem o acúmulo superior na superfície e sobreposição, mas sim, com aparente maior densidade dos produtos. Em relação a essa exposição, tem-se que o próprio NaCl possa ter formado cristais que se depositaram sobre a superfície, considerando ainda que há sódio no produto químico empregado, o que pode ter aumentado essa concentração.

A Figura 132 apresenta o aspecto verificado na amostra SQV20.N.CU.6b, na qual a formação de CC ocorreu em 90% da amostra, incluindo FP e FS.

Figura 132 – Amostra SQV20.N.CU.6b, formação de CC em 90% da amostra



Como pode ser percebido na Figura 132, na referida amostra, a formação de CC ocorreu tanto na FS como na FP, abrangendo cerca de 90% da fissura. Pode-se supor por esse registro, que houve distribuição homogênea das PE, possibilitando a liberação do produto de cicatrização em diferentes pontos e culminando nessa eficácia. A Figura 133 apresenta a formação de produtos de cicatrização em amostras do grupo de referência.

Figura 133 – Ocorrências (a) amostra SQV20.R.CS.8b, aprox. 30x, 84 dias (b) amostra SQV20.R.CS.9b, aprox. 20x, 84 dias



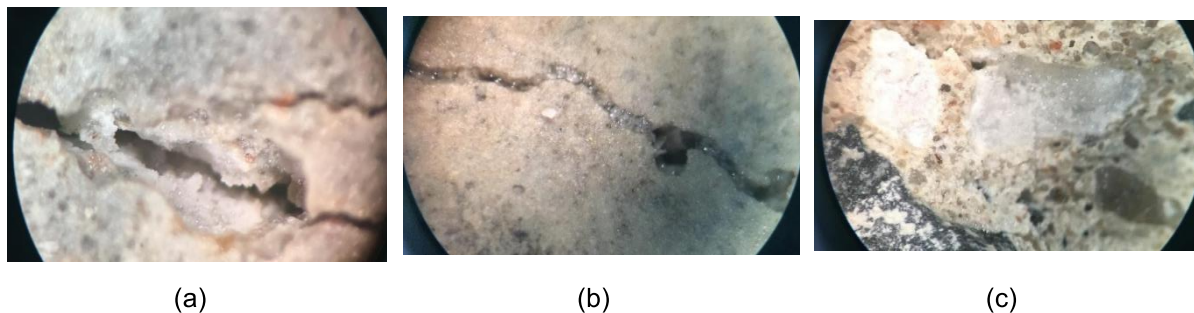
(a)



(b)

Na Figura 133a é relatada a ocorrência de CC em trecho da amostra, percebendo-se o formato do produto e sua pequena presença na borda da fissura e superfície, mantendo-se no interior da abertura e promovendo a cicatrização. Esse aspecto é vinculado a presença de C-S-H. Já em (b) a ocorrência diverge dessa descrita, uma vez que se formam e acumulam cristais na parede interna e externa da fissura, de modo unilateral e com sobreposição, o que pode ser um indício de que trata-se de calcita (GIANNAROS; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016). Essas amostras tem a mesma composição, exposição e cura, pode-se atribuir essa diferença à distribuição de PE e sua ocorrência na região da fissura. Em relação ao grupo de amostras exposto à câmara de carbonatação, tem-se as ocorrências apresentadas na Figura 134.

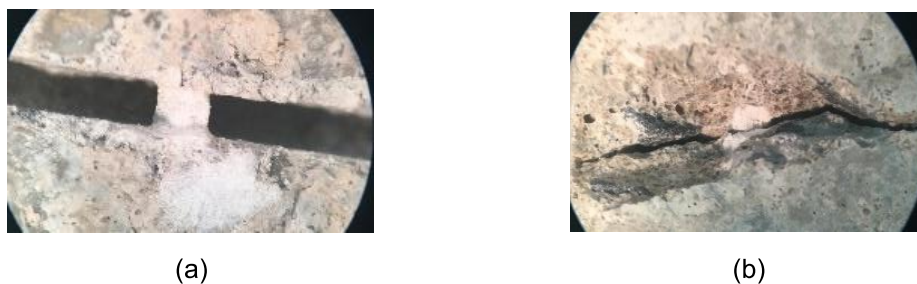
Figura 134 – Ocorrências em amostras expostas à câmara de carbonatação (a) amostra SQV20.C.CS.15d, aprox. 40x, 84 dias (b) amostra SQV20.C.CU.18, aprox. 50x, 84 dias (c) amostra SQV20.C.CU.18, aprox. 50x, 84 dias



Na Figura 134a tem-se o contorno de um agregado, região com formação de FS e FP e o provável rompimento da PE. Nesse ponto, percebe-se depósito de produto, reforçando que este pode ocorrer nos arredores da PE (LI et al., 2019; SHIVAM et al., 2017). Na Figura 134b a ocorrência foi diferente da citada, com aspecto de cicatrização em diversos pontos, porém não continuamente e sem aparente densidade do produto. Em Figura 134c tem-se o depósito de cristais na superfície e ao redor da PE. Em relação aos diferentes percentuais, o uso de 20% de PE gerou 46 manifestações referentes a cicatrização, em relação as 37 ocorrências percebidas com 10% de PE. Percebe-se, no entanto, que no traço SQV10 a ocorrência predominante foi de CC, e no SQV20 foi de PBE, ou seja, considerando o método de impregnação por vácuo, o acréscimo de teor não acarretou em maiores fechamentos ou seu prolongamento ao longo da fissura, mas sim, a pequena formação de produtos.

Para iniciar as evidências verificadas no traço SQV30, cabe-se citar que nas amostras com fissuração formada através de corte, foram percebidas duas ocorrências, evidenciadas na Figura 135.

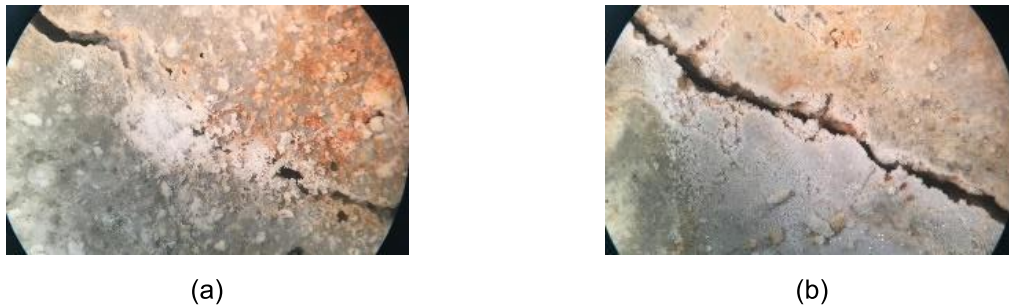
Figura 135 – Ocorrências nas amostras com fissuração provocada pelo corte (a) SQV30.C.CS.14, aprox. 20x, 56 dias e (b) SQV30.C.CU.17, aprox. 10x, 56 dias



Como ilustra a Figura 135a, na amostra SQV30.C.CS.14 foi percebida a ocorrência de CP. Essa CP foi uma ocorrência isolada na amostra, e isso pode decorrer da disposição do agregado leve liberando o produto de cicatrização pontualmente (WU et al., 2012). No restante da amostra, apenas percebeu-se a formação de PBI. Em b, percebeu-se que no local da formação da fissura houve o rompimento na PE, sendo tal verificação a acompanhada da presença de PBI.

Complementando a análise das ocorrências, o traço SQV30 tem os registros apresentados a seguir. O primeiro (Figura 136) é referente às amostras do grupo de referência.

Figura 136 – Verificações nas amostras (a) SQV30.N.CU.4c, aprox 20x, 84 dias e (b) SQV30.N.CU.5d, aprox 20x, 84 dias



Tem-se na Figura 136a, a ocorrência de cicatrização somada ao seu acúmulo na superfície, em relevo, chegando a alcançar a CC. A formação de produto mais atenuada e permanecendo próximo a borda e a superfície é apresentada na Figura 136b. A ocorrência se assemelha com o descrito em bibliografia como calcita.

A Figura 137 é referente a diferentes amostras submetidas ao mesmo tipo de exposição e cura, tendo ambas apresentado formação de PBE.

Figura 137 – Ocorrências (a) amostra SQV30.R.CS.8b, aprox. 20x, 84 dias (b) amostra SQV30.R.CS.9b, aprox. 30x, 56 dias



A Figura 137 apresenta a formação de PBE. Tem-se a formação nas paredes laterais, e percebe-se o aspecto esbranquiçado e com aparente densidade. Parece haver acúmulo e sobreposição de produtos de cicatrização nos arredores da fissura. Giannavos, Kanellououlos e Al-Tabbaa (2016) indicam que com o uso de Na_2SiO_3 em diversas amostras se percebeu PBE com formato pontiagudo em alguns pontos e irregular.

A Figura 138a apresenta a formação de produtos na FS e da FP, além do depósito em superfície. Na Figura 138b, tem-se a CC, evidenciando as características do produto formado.

Figura 138 – Ocorrências (a) amostra SQV30.R.CU.11a na borda da FP e FS, aprox 20x, depósito na superfície, 56 dias (b) amostra SQV30.R.CU.13c, aprox 30x, 56 dias



(a) SQV30.R.CU.11a, aprox. de 20x



(b) SQV30.R.CU.13c, aprox. de 30x

Na Figura 138 aponta-se para as duas ocorrências percebidas não apenas nas referidas amostras. Em a, tem-se a formação de PBE e o escoamento do produto na superfície, aspecto esbranquiçado e acúmulo fora da fissura. Em b, o produto se formou na fissura, com falhas, sem obter a continuidade ao longo da abertura da fissura. Nessa última, refere-se a uma amostra exposta à carbonatação, o que pode ter reduzido a quantidade de CH disponível, impactando na formação de C-S-H. Tal fato concorda com o verificado, pois houve ocorrência predominante de PBE nas amostras submetidas à carbonatação, não apenas nesse traço, mas em todos com o uso de SQ.

Como síntese do que foi percebido em todas as amostras contendo a solução química, conta-se com a Tabela 56.

Tabela 56 – Síntese dos resultados obtidos nas amostras com uso SQ encapsuladas em agregados de PE

Traço	Tipo de fissura	e Máx cicatrizada para cada tipo (mm)		e média dentre as cicatrizações verificadas em cada traço (mm)		Nº de amostras com ocorrência de cicatrização					
		CC	CP	CC	CP	N		C		R	
						CS	CU	CS	CU	CS	CU
SQI10	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	1,119	0,503	0,5	0,341	9	7	5	8	8	9
SQI20	Corte mecânico	1,48	0	1,48	0	0	1	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,6	0,549	0,328	0,368	7	8	12	7	7	6
SQI30	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,806	0,724	0,475	0,461	7	8	0	6	9	9
SQV10	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
	Ensaio de tração na flexão	0,983	0,659	0,591	0,5358	9	7	4	4	7	6
SQV20	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,854	0,659	0,553	0,359	8	9	4	6	10	9
SQV30	Corte mecânico	0	1,66	0	1,66	0	0	1	1	0	0
	Ensaio de tração na flexão	1,162	0,719	0,482	0,525	6	6	11	8	6	7
Número total de ocorrências						46	46	37	40	49	46

Legenda: SQI: amostras com solução química encapsulada por imersão e SQV: por aplicação de vácuo; e: espessura; N: névoa salina; C: carbonatação; CS: cura submersa; CU: cura úmida; FS: fissura secundária; FP: fissura principal; CC: cicatrização contínua; CP: cicatrização pontual;

Roig-Flores et al. (2015), ao avaliarem a cicatrização proporcionada por SQ, perceberam que o contato com a água não era suficiente, era necessária sua submersão. Segundo os autores, dependendo da espessura da fissura, não há acesso da água e, assim, apenas a submersão garante essa eficácia. No presente estudo, percebeu-se o mesmo número de ocorrências em CS e CU, totalizando 132 amostras em cada condição, apontando para a viabilidade diante dos dois tipos de cura, sendo um contraponto ao citado pelos referidos autores. Li et al., (2019) citam que o Na_2SiO_3 se dissolve facilmente na água, o que pode ocorrer mesmo em amostras que não estejam em CS, permitindo a formação de cristais e conduzindo a formação mesmo que parcial de produtos de cicatrização, concordando com os resultados da presente pesquisa. Al-Tabbaa et al., (2019), em escala e exposição real, notaram que a ocorrência de chuva causa dispersão e lavagem dos componentes. Mesmo nas amostras submersas, houve retirada e submersão por 4x para registro de imagens, podendo ter sido o produto disperso nessas ocorrências. Cabe citar que o acúmulo de produtos na superfície também foi apresentado por Sidiq, Gravina e Gustozzi (2019)

e por Li et al., (2019), que classificaram o fenômeno como uma nuvem esbranquiçada de produto de cicatrização e atribuíram à presença de C-S-H.

Em relação ao ambiente de exposição, nas amostras do grupo de referência foram percebidos 95 registros. No conjunto exposto à névoa salina foram 92 manifestações, incluindo uma amostra submetida ao corte, na qual percebeu-se a elevada densidade do produto formado e o preenchimento efetivo da fissura. O grupo de amostras submetidas à carbonatação acelerada foi o que apresentou o menor número de registros, com 77. Cabe destacar que não apenas houve inferioridade em relação ao número, mas ainda, que as amostras carbonatadas apresentaram em sua maioria a ocorrência de PBE, verificada em 87% dos casos. A hipótese da influência da presença de CO_2 na formação de produtos por este mecanismo é que houve consumo de CH na formação de CaCO_3 (GIANNAROS; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016). Percebeu-se nesse estudo, que o grupo submetido à carbonatação apresentou majoritariamente a formação de PBE. Além disso, outra hipótese que pode ser apresentada, é que o período em que as amostras permaneceram em sazonalidade para distribuição da umidade e na exposição à câmara de carbonatação – já fissuradas e cortadas- possa ter havido perda do produto de cicatrização com fluxo de umidade para o interior da matriz de concreto, podendo não ter atuado efetivamente na fissura. Ammouche et al., (2001) citam que procedimentos realizados nas amostras e nas cápsulas podem prejudicar sua atuação, dando como exemplo a secagem dos materiais, efeito que pode ter ocorrido na câmara de carbonatação. Por fim, no traço SQV30, nas fissuras por ensaio mecânico o grupo predominante foi o da carbonatação.

Em relação a dispersão da perlita, não apenas a presença dos grãos de PE é importante, mas tem-se ainda a necessidade de uma tensão atuante de modo que as partículas possam se romper, liberando o agente de cicatrização (GUPTA; PANG; KUA, 2017). Considerando diferentes pontos da amostra, e a formação ou não da fissura, o que pode ocorrer é ter uma distribuição diferencial da pressão causada, resultando ora no rompimento das partículas, ora na sua permanência íntegra sem liberação do Na_2SiO_3 . Tal ponto depende, ainda, da distribuição de poros na matriz.

Também em relação a PE, Beglarigale et al., (2018) afirmam que durante os diversos processos de mistura, adensamento e lançamento, podem ser formadas microfissuras nas esferas pelas quais o produto de cicatrização pode escoar, resultando assim em cápsulas ocas. A não disposição do produto suficiente pode

ter impactado na formação de CC e CP, sendo viável apenas a ocorrência de PBE. Wu et al., (2012) citam que as cápsulas tem material limitado, e pode não ser suficiente.

Também avaliando o uso de Na_2SiO_3 , Beglarigale et al., (2018) informam que há uma incerteza em relação à envoltória da solução química, pois pequenas fissuras podem prejudicar, fazendo com que o silicato de sódio se modifique (com a ação da água ou perda de umidade), podendo impactar o potencial de cicatrização.

Ainda em relação a esse contexto, Xu et al., (2019) afirmam que a cicatrização pode se limitar aos arredores da posição das cápsulas, por ser o local de alcance do produto de cicatrização. Al-tabbaa et al., (2019) validaram essa ocorrência em escala real. Mauludin e Oucif (2018) relatam que a eficácia da cura nos mecanismos que envolvem o uso de cápsulas se relaciona não apenas com a disponibilidade destas, mas ainda com aspectos de sua superfície, aderência com a matriz e a interação entre o núcleo e a casca da cápsula.

As hipóteses para a predominância de PBE podem ser:

- a) as fissuras podem ter espessuras na sua maioria superiores à limitação dessa técnica;
- b) a disponibilidade da PE e conseqüentemente do produto de cicatrização pode ter sido suficiente apenas para depósito superficial de produto e não para sua ocorrência em termos de densidade e espessura efetiva. O contraste dessa afirmação seria a ocorrência de produtos excedentes à abertura das fissuras, fenômeno percebido em outras amostras contendo percentuais ainda inferiores de PE.
- c) a formação de produtos de cicatrização depende fundamentalmente da presença de PE disponíveis no local da fissuração. Gupta e Kua (2016) citam que a cápsula traz essa desvantagem de dependência de sua presença no local da fissura para viabilizar o método.

No que tange a não ocorrência de cicatrização em amostras com fissura formada por corte, tem-se algumas hipóteses:

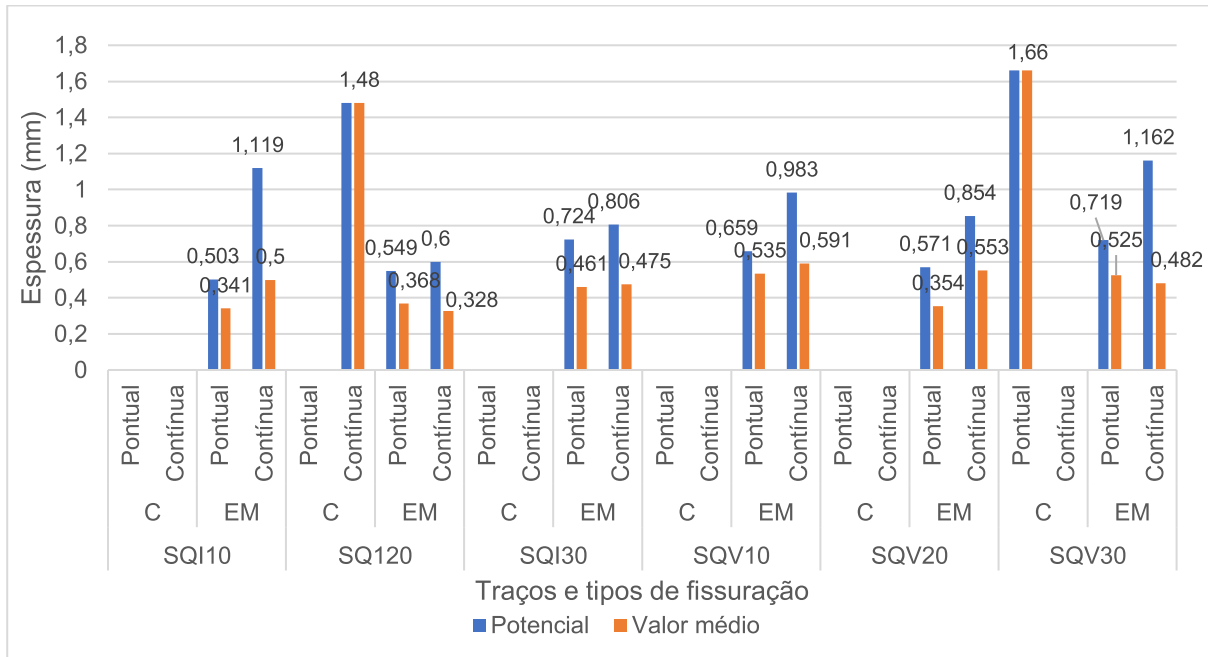
- (a) isso pode decorrer do formato do corte, somado à inexistência, nessa região da amostra, de PE que pudessem ser rompidos no processo de corte, liberando o agente de cicatrização (GUPTA, KUA, 2016)

- (b) como o corte é realizado com a presença da água, pode-se supor que o corte em si tenha causado a ruptura dos agregados leves disponíveis nesse local e liberado o agente de cicatrização, que, no entanto, foi carregado pela água pelo método de corte feito à via úmida;
- (c) no processo de adensamento, o agregado leve, por seu menor peso específico, pode ter ficado mais próximo da superfície, e no corte, foi eliminado desse trecho da amostra;
- (d) havia agregados leves e houve sua ruptura, com liberação gradual do agente, porém, as fissuras eram muito espessas e não houve potencial de cicatrização com o produto disponibilizado (SAHMARAN et al., 2014);
- (e) há falhas no que tange à aderência da cápsula à matriz, e assim, esse ponto poderia aliviar a tensão da fissuração, não rompendo a PE e não havendo a formação de produtos (TSANGOURI, 2018; WU et al., 2012).

Referente à idade em que foi verificada a cicatrização, foram notados produtos já aos 28 dias, o que pode indicar que com a formação do CH já há ativação do Na_2SiO_3 formando produtos de cicatrização. (WANG et al., 2019). Manoj-Prabakar et al., (2017) analisaram em seu estudo a cicatrização até os 14 dias, indicando que a reação química é de ocorrência rápida. De fato, parte das amostras apresentou estagnação na formação de produtos entre os 28 dias e as demais idades.

Para analisar o fechamento de fissuras potencial e as aberturas médias cicatrizadas em cada traço, conta-se com a Figura 139.

Figura 139 – Espessura máxima e média cicatrizada (mm) em cada um dos traços variando-se o mecanismo de formação de fissura e o tipo de cicatrização- SQ



Conforme aponta a Figura 139, não foi percebida relação entre o percentual de uso de PE e a espessura cicatrizada. Novamente, percebeu-se apenas 2 pontos que apresentaram a cicatrização em fissuras formadas pelo corte. Como já apresentado anteriormente, o aspecto das paredes dessas fissuras pode não ter permitido a fixação de produtos de cicatrização. Além disso, as fissuras formadas por corte apresentam maior espessura, sendo esse um ponto decisivo para a cicatrização. A bibliografia apresenta, por exemplo, a limitação de cicatrização em fissuras com até 0,22mm (DANISH; MOSABERPAHAH; SALIM, 2020)

Em termos de CP, o valor máximo foi de 1,66mm e para as CCs foi de 1,48mm. Algo a ser destacado em relação ao grupo de SQ é a formação de produto sobressalente em relação à espessura da fissura, formando-se em acréscimo na superfície e por vezes apresentando escorrimento, como apresentado e já trazido por Giannaros, Kanellopoulos e Al-Tabbaa (2016) e Li et al., (2019).

5.3.4 Análise química e microestrutural

Para análise dos produtos formados por SQ, empregou-se a técnica de DRX em três amostras, sendo duas delas referentes ao grupo SQI e uma alusiva a SQV. A

Figura 140 apresenta o difratograma de raios X referente a amostra SQI10 e a Figura 141 referente a amostra SQI20.

Figura 140 – Difratograma de raios-X- Variável de uso de soluções químicas- SQI10

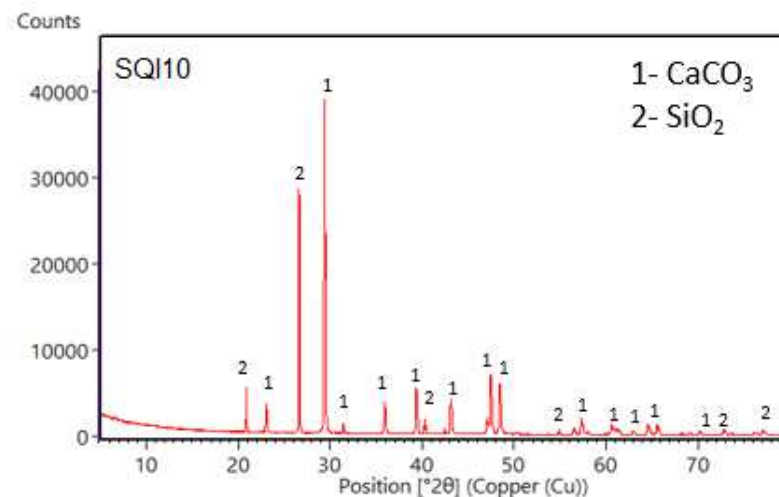
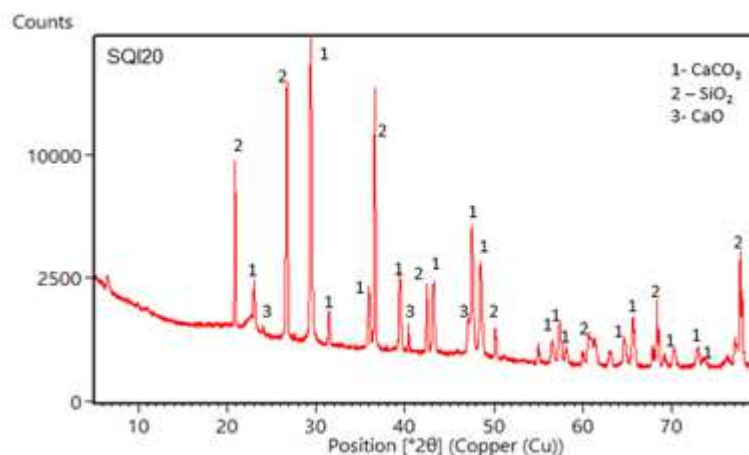


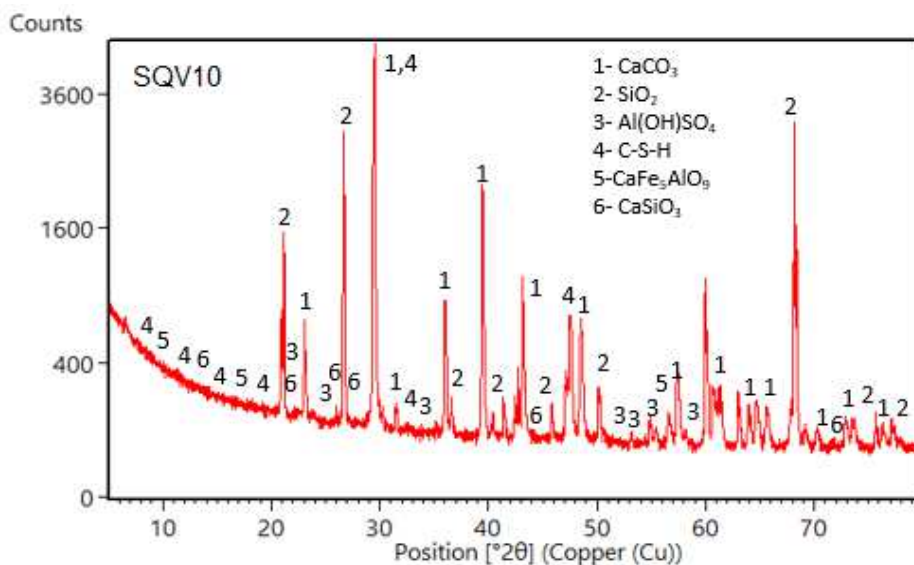
Figura 141 – Difratograma de raios-X- Variável de uso de soluções químicas- SQI20



Nas Figuras supraapresentadas, além de ter-se a formação de CaCO_3 , foi percebida ainda a presença de SiO_2 e CaO . A formação de calcita pode ser decorrente da carbonatação do CH, passível de ocorrência em todos os traços avaliados nesse estudo. A presença de SiO_2 e CaO é decorrente dos componentes prioritários do cimento Portland, como silicato tricálcico, silicato dicálcico, podendo ser tais pontos verificados no difratograma apresentado. Soma-se a isso os produtos formados como já apresentado na Equação 17, decorrente da reação do Na_2SiO_3 com CH e a água forma o CaO , o SiO_2 e a presença de Na_2O , sendo assim pertinente sob essa ótica a sua identificação (MANOJ PRABAHAR et al., 2017).

Por mais que todos os picos tenham sido caracterizados pelos materiais descritos, no estudo de Mao, Gu e Gregory (2015), os autores perceberam a apresentação de óxido de sódio (Na_2O) próximo à posição de 70 graus, tendo sido identificado um pico semelhante a esse nesse estudo. Dando continuidade ao apresentado, tem-se na Figura 142 o difratograma gerado na amostra SQV10.

Figura 142 – Difratograma de raios-X- Variável de uso de soluções químicas- SQV10



Nesse difratograma, diferente dos demais até o momento apresentados foram identificados 6 compostos. A presença de CaCO_3 é oriunda da carbonatação do CH, como já citado. A presença de SiO_2 decorre da reação do Na_2SiO_3 com a água e o CH, pertinente nessa análise. A presença de C-S-H decorre da hidratação do cimento, e pode ser oriunda também da reação do Na_2SiO_3 com o CH. Há concordância com os produtos identificados por Li et al., (2019).

Lv et al., (2018), ao analisarem matrizes cimentícias em termos microestruturais, identificaram a presença de $\text{CaFe}_5\text{AlO}_9$ (óxido de ferro e cálcio), em concordância com o apontado no difratograma apresentado. Shadid et al., (2019), também em matrizes cimentícias e com o uso de Na_2SiO_3 , perceberam a presença de Al, Na, C e Fe, concordando em termos dos elementos nos produtos verificados no presente estudo.

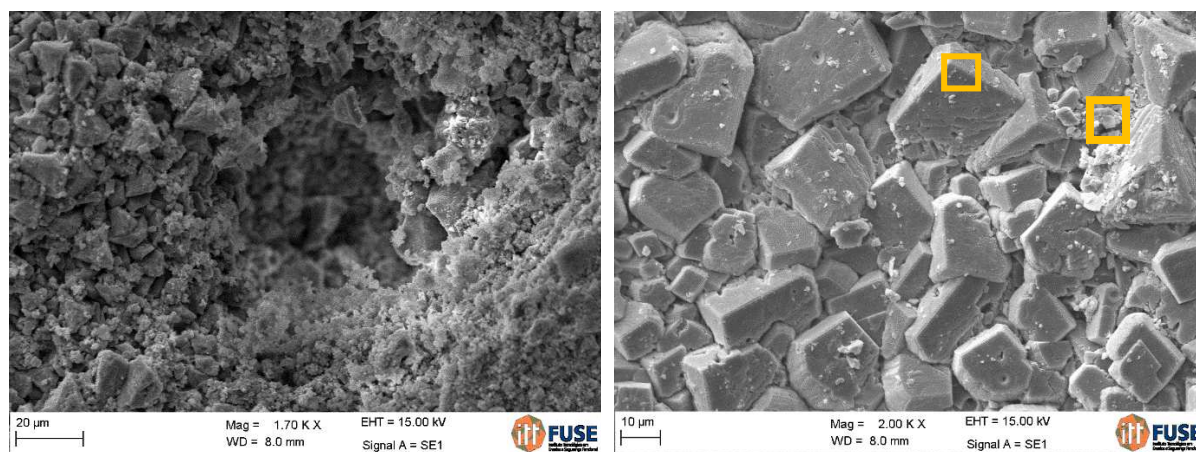
Além disso, identificou-se o metassilicato de cálcio (CaSiO_3), chamado wollastonita e também visto no estudo de Shadid et al., (2019). Esse composto pode ser decorrente de uma reação entre o Na_2SiO_3 e o cálcio presente no cimento. Ainda, é pertinente destacar que essa identificação ocorreu ao lado de picos de SiO_2 ,

podendo ser um ponto de identificação de CaO, o que poderia indicar a presença de C-S-H, não identificado no difratograma.

A presença de $\text{Al}(\text{OH})\text{SO}_4$ está presente em picos de menor dimensão, e considerando o reduzido número de contagens desse diagrama, pode ter sido um erro de identificação. Do contrário, esse aparecimento pode ser atribuído a uma contaminação, não sendo o produto esperado na amostra ou seus componentes.

Para complementação de análise, a Figura 143 apresenta a microscopia eletrônica de varredura em amostra do traço SQI20 e do traço SQI10.

Figura 143 – MEV- Amostra com variável do uso de SQ- (a) SQI20 aprox de 1700x e (b) SQV10 aprox 2300x

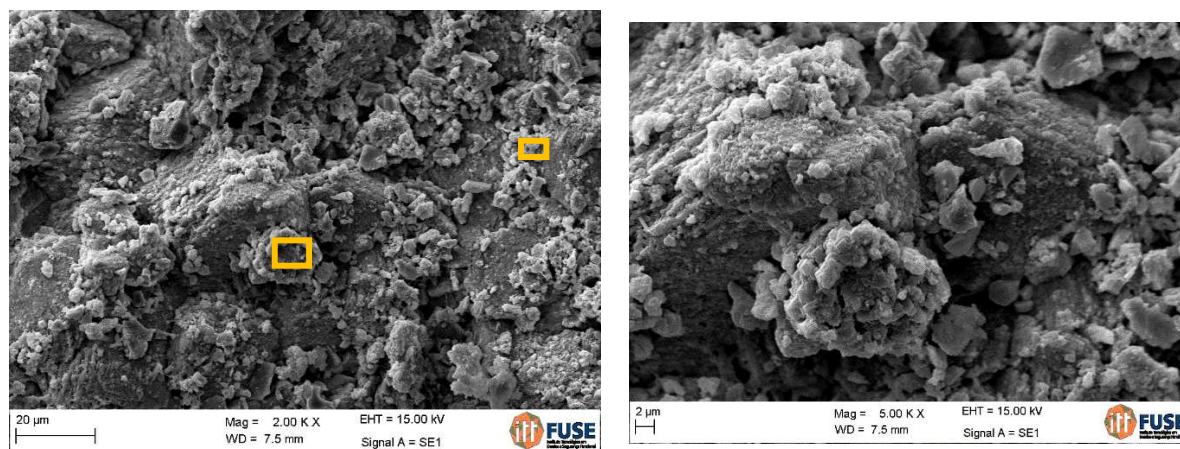


(a)

(b)

A Figura 144 apresenta as microscopias do traço SQV20.

Figura 144 – MEV- Amostra com variável do uso de SQ – SQV 20 (a) aprox de 2000x e (b) aprox de 5000x



(a)

(b)

Como é possível notar através da Figura 143 foi percebido novamente o acúmulo e sobreposição de materiais com formato definido e lamelar, mais evidente na Figura 143b. Como já citado, atribui-se esse comportamento à presença de CaCO_3 (PARKS et al., 2010). Aparentemente, não se percebe o formato atribuído à presença de C-S-H. Dessa forma, concorda-se com os difratogramas apresentados na Figura 140 e Figura 141. Ao analisar a Figura 144, com aproximações de 2000x e 5000x, é possível perceber a distribuição dos cristais formados ao longo da fissura, através da qual verifica-se que existem pontos de acúmulo sobre a parede do local analisado.

A análise de energia dispersiva de raios-X foi realizada nas áreas que estão em destaque na Figura 143b e na Figura 144b. Os resultados obtidos foram verificados na Tabela 57.

Tabela 57 – Análise de EDS – SQV10 e SQV20

Identificação na amostra SQV10		Identificação na amostra SQV20	
Elemento	Percentual em massa(%)	Elemento	Percentual em massa(%)
C	7,58	C	6,13
Si	-	Si	6,16
Ca	48,96	Ca	41,61
O	43,45	O	44,85
Al	-	Al	1,25

Em conformidade com os resultados apontados na Tabela 57, tem-se a verificação em ambas as amostras da presença de C, Ca e O, sendo um indício de correlação com o DRX. Na amostra de SQV10, através do difratograma, foi percebida a presença de Al, o que não ocorreu no EDS correspondente, mas sim no da amostra SQV20. Na amostra SQV10 não foi verificada a presença de Si, que esteve presente em pequeno teor na amostra SQV20. Observando-se esses mesmos traços, nos difratogramas correspondentes não foi reconhecida a presença de C-S-H, por mais que essa fosse a expectativa em relação aos dados da bibliografia (GIANNAROS; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; MANOJ PRABAHAR et al., 2017).

5.4 AUTOCICATRIZAÇÃO PELO USO DE SOLUÇÕES BACTERIANAS

Em relação ao uso de SB, contou-se com a utilização de 6 traços, todos eles com a mesma concentração de solução, variando-se o mecanismo de

encapsulamento desta (à vácuo ou por imersão), e o percentual de uso da perlita expandida (10,20 e 30%).

5.4.1 Resistência à compressão

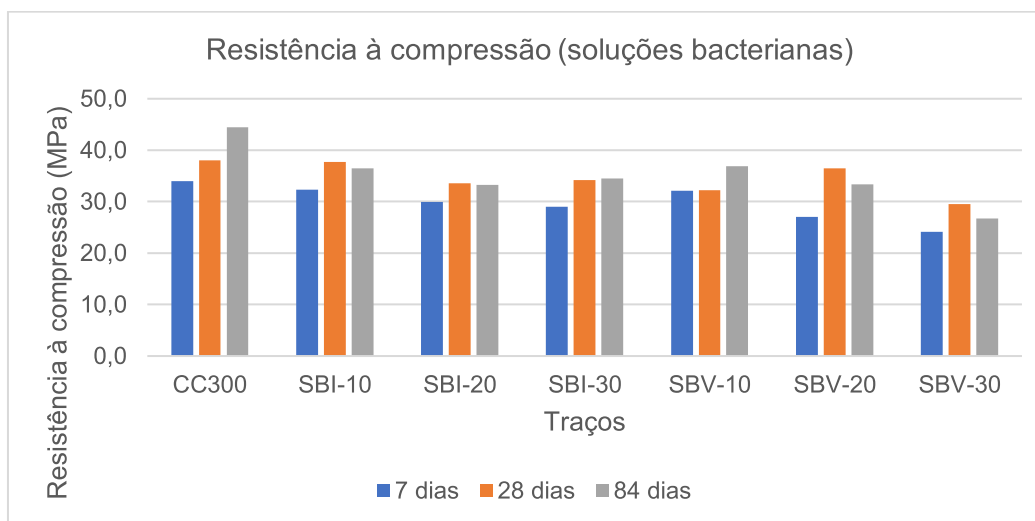
A Figura 145 apresenta os valores obtidos de resistência mecânica à compressão quando do emprego de SB. Os valores apresentados no gráfico referem-se aos valores potenciais. Os demais valores são apresentados na Tabela 58.

Tabela 58 – Resistência à compressão (MPa) das amostras contendo SB

Amostra	7 dias			28 dias			84 dias		
	Tensão (MPa)	Valor potencial (MPa)	Valor médio (MPa)	Tensão (MPa)	Valor potencial (MPa)	Valor médio (MPa)	Tensão (MPa)	Valor potencial (MPa)	Valor médio (MPa)
CC-300.1	32,4			27,6			44		
CC-300.2	34,0	34,0	31,0	36,9	38,0	34,2	42,4	44,5	43,6
CC-300.3	26,6			38			44,5		
SBI-10.1	30,8			32,9			36		
SBI-10.2	30,8	32,3	31,3	34,9	37,7	35,2	35,1	36,5	35,9
SBI-10.3	32,3			37,7			36,5		
SBI-20.1	27,3			33,6			31,3		
SBI-20.2	29,4	29,9	28,9	33,3	33,6	33,4	28,7	33,3	31,1
SBI-20.3	29,9			33,2			33,3		
SBI-30.1	29,0			32,1			33,6		
SBI-30.2	28,0	29,0	28,3	34,2	34,2	33,5	34,5	34,5	33,4
SBI-30.3	28,0			34,1			32,2		
SBV-10.1	32,1			31,9			36,6		
SBV-10.2	29,6	32,1	30,9	31,5	32,2	31,9	35,6	36,9	36,4
SBV-10.3	31,1			32,2			36,9		
SBV-20.1	27,0			36,5			31,7		
SBV-20.2	26,7	27,0	26,7	34,4	36,5	35,5	33,4	33,4	32,5
SBV-20.3	26,5			35,7			32,5		
SBV-30.1	23,5			27,9			22,8		
SBV-30.2	24,0	24,1	23,9	27,1	29,5	28,2	26,7	26,7	25,3
SBV-30.3	24,1			29,5			26,4		

Legenda: SBI refere-se as amostras com solução bacteriana impregnada por imersão. SQV refere-se a impregnação com aplicação de vácuo. Os números ao lado indicam o teor de uso da PE, de 10, 20 e 30%. CC300 é a referência de comparação dos demais traços.

Figura 145 – Valores de resistência à compressão- traços com uso de SB



Considerando os resultados apresentados, novamente é perceptível o efeito da inserção da PE em relação ao traço de referência, reduzindo a f_c . Em relação à linearidade entre o percentual de uso da PE e a redução na f_c , percebeu-se, dentre as composições com SBI, que o traço SBI30 foi superior ao SBI20 nas idades de 28 e 84 dias. Entre os traços SBV, percebeu-se o único ponto discrepante no traço SBV20, na idade de 28 dias.

Sengul et al., (2011) citam que teores de uso de PE acima de 20% devem ser empregados sem fins estruturais em decorrência do dano causado à resistência. Nesse estudo, o percentual de redução das amostras SBI20 e SBV20 em relação à amostra de referência foi de 10% e 22%, respectivamente. Leyton- Vergara et al., (2013) informam que a redução pode ser amenizada em função da dimensão da PE, que pode proporcionar benefícios em termos de empacotamento.

Resgatando os valores obtidos nas composições em que a PE foi encapsulada com SQ, torna-se evidente que o efeito verificado na resistência à compressão relaciona-se com o uso de PE, sendo pouco ou nada influenciado pela adição da SQ ou da SB. Aos 28 dias, comparando as composições com os mesmos percentuais de PE, tem-se diferenciação máxima de 4,4MPa entre as misturas com os dois tipos de solução.

Um ponto verificado nas amostras contendo solução bacteriana é que, contrariando o esperado no que tange ao desenvolvimento da resistência, 4 dos 6 traços apresentaram valor inferior aos 84 dias em relação ao verificado aos 28 dias. A variação ocorrida pode derivar da distribuição não homogênea da PE entre as

diferentes amostras, ou erros intrínsecos ao processo de mistura, moldagem e confecção dos corpos de prova, ou ainda, falhas no ensaio.

Estudam citam a vantagem de incorporar SB para melhorias na resistência à compressão dos concretos. (KALHORI; BAGUERPOUR, 2017; NAIN et al., 2019; REEDY et al., 2010; VIJAY; MURMU, 2017) Todavia, cabe destacar que na parte majoritária desses estudos é analisado o efeito da solução após a formação de fissuras, quando há a ativação dos esporos bacterianos, que ao formar calcita ampliam a resistência do material. Há, ainda, estudos que avaliam a inserção sem envoltória de proteção, na água de amassamento, e assim pode haver benefícios na resistência mecânica, uma vez que a biomineralização não tem dependência da ruptura do agregado e pode ocorrer também em vazios existentes na matriz.

5.4.2 Índices físicos: absorção total, massa específica e índice de vazios

A Tabela 59 apresenta os índices físicos obtidos nas amostras referentes aos traços com uso de soluções bacterianas.

Tabela 59 – Valores obtidos de índices físicos- Amostras com SB

Amostras	Absorção de água		índice de vazios		Massa específica seca		Massa específica saturada		Massa específica real	
	indiv	médica	indiv	méd	indiv	média	indiv	média	indiv	média
CC-300.1	3,63		8,38		2,31		2,39		2,52	
CC-300.2	3,39	3,35	7,76	7,74	2,29	2,31	2,36	2,39	2,48	2,50
CC-300.3	3,03		7,06		2,33		2,40		2,51	
SBI10.1	5,92		13,25		2,24		2,37		2,58	
SBI-10.2	6,23	5,96	13,90	13,33	2,23	2,24	2,37	2,37	2,59	2,58
SBI-10.3	5,72		12,84		2,25		2,37		2,58	
SBI-20.1	7,10		15,48		2,18		2,34		2,58	
SBI-20.2	7,21	7,09	15,66	15,48	2,17	2,18	2,33	2,34	2,58	2,58
SBI-20.3	6,97		15,30		2,20		2,35		2,59	
SBI-30.1	6,80		15,02		2,21		2,36		2,60	
SBI-30.2	6,75	7,01	14,95	15,44	2,21	2,20	2,36	2,36	2,60	2,61
SBI-30.3	7,47		16,33		2,19		2,35		2,61	
SBV-10.1	6,11		14,29		2,20		2,48		2,54	
SBV-10.2	5,95	6,06	14,16	14,04	2,21	2,20	2,52	2,43	2,54	2,54
SBV-10.3	6,11		13,67		2,20		2,28		2,54	
SBV-20.1	6,78		14,60		2,15		2,30		2,52	
SBV-20.2	6,85	6,81	14,62	14,64	2,14	2,15	2,28	2,30	2,50	2,52
SBV-20.3	6,80		14,69		2,16		2,31		2,53	
SBV-30.1	7,98		16,87		2,11		2,28		2,54	
SBV-30.2	7,17	7,49	15,34	15,98	2,14	2,13	2,29	2,29	2,53	2,54
SBV-30.3	7,33		15,71		2,14		2,30		2,54	

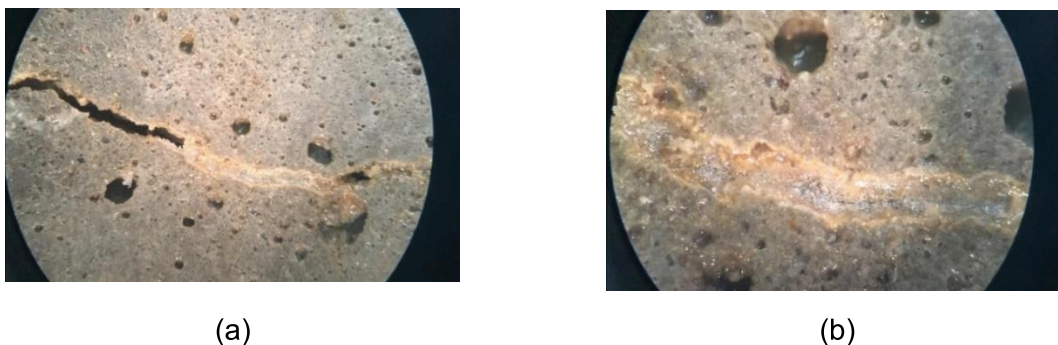
Novamente, assim como percebido em relação à f_c , existe paridade entre os resultados obtidos nos traços com PE encapsulada por imersão e com aplicação de vácuo. Atribui-se assim, as alterações nas propriedades físicas à presença da PE, não sendo percebida a relação com os agentes que foram encapsulados. Por mais que exista o efeito positivo oriundo da presença das bactérias, conduzindo a menor presença de vazios (KRISHNAPRIYA; VENKATESH BABU, 2015), o efeito preponderante é resultante da presença de PE, reduzindo a f_c , aumentando a absorção de água e a incidência de poros na matriz (RASHAD, 2016).

Ainda que tais efeitos sejam percebidos, com índice de vazios de até o dobro do valor do traço de referência (SBV30 em relação a CC300), por exemplo, há vantagens ao utilizar as cápsulas, pois estas previnem que o material seja liberado precocemente (MILLA et al., 2019), além de serem cruciais para a sobrevivência das bactérias (GUPTA; PANG; KUA, 2017). Ao analisar comparativamente os valores obtidos com as SQ e as SB, percebe-se que o uso de SB impactou de modo mais severo por exemplo na absorção de água, com exceção dos traços SBV 20 e SBV30. A solução química pode ter proporcionado maior preenchimento dos poros da perlita, reduzindo sua absorção de água e os vazios comparativamente.

5.4.3 Análise visual- Microscópio óptico

Todas as tabelas contendo a verificação por análise visual dos traços contendo solução bacteriana constam no Apêndice E desse estudo. O relato das manifestações percebidas se inicia pela composição SBI10, traço no qual não percebeu-se cicatrização nas amostras submetidas ao corte. Em relação as amostras submetidas ao ensaio de tração, tem-se uma ocorrência de CC apresentada pela Figura 146.

Figura 146 – Ocorrência de CC –Amostra SBI10.N.CU.6b (a) aprox. de 10x, 56 dias e (b) aprox. 30x, 56 dias



Percebe-se pela Figura 146 a formação de produtos de cicatrização ao longo de toda a espessura da fissura. Nas bordas, com a aproximação de 30x, é possível notar uma aparente maior densidade do produto, enquanto que no preenchimento da fissura a aparência é mais translúcida. Nessa formação, não percebe-se o aspecto de acúmulo de cristais que se sobrepõe, o que ainda poderia ocorrer em outras idades de análise. A Figura 147 ilustra ocorrência típica do uso de SB.

Figura 147 – Ocorrências nas amostras (a) SBI10.R.CS.7a, aprox 30x, 84 dias e (b) SBI10.R.CS.7c, aprox 30x, 84 dias



(a)

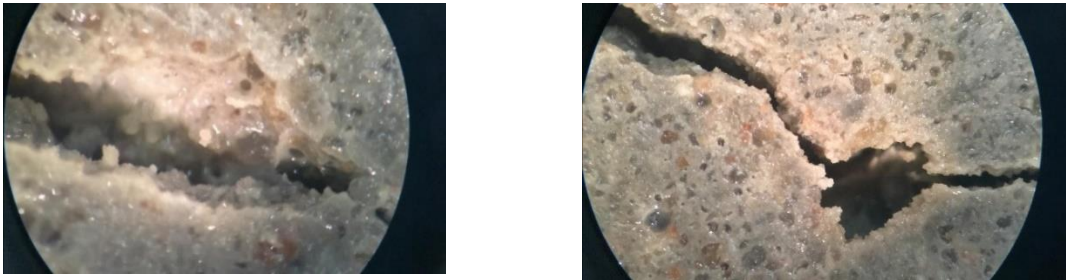


(b)

Por mais que a ocorrência apresentada na Figura 146 e na Figura 147 tenha aparência e ocorrência diferente, segundo Zai e Murthy (2015) o produto formado em composições com SB sempre é a calcita. O formato apresentado pela calcita em bibliografia é de sobreposição de cubos ou lâminas esbranquiçadas, podendo se depositar em relevo em relação à superfície (HOMMA et al., 2009; TALAIEKHOZAN et al., 2014; ZEMANN; DEHN, 2019; WIKTOR; JONKERS, 2011). A presença de C-S-H pode decorrer, no entanto, da hidratação natural do cimento, considerando que trata-se de amostras cimentícias (DANISH; MOSABERPANAH; SALIM, 2020). Ainda, há coerência se analisar-se os drifotogramas até o momento apresentados, que de modo prevalecente indicam mais de um mecanismo -ou produto- de cicatrização.

A manifestação caracterizada como PBE é apresentada através da Figura 148.

Figura 148 – Verificações na amostra SBI10.R.CS.7 (a) face a, aprox 40x, 56 dias
(b) face b, aprox 20x, 56 dias



(a)

(b)

Percebe-se a formação de PBE, avaliada na síntese entre os traços, e presente em algumas amostras. Em termos da influência da abertura da fissura, a Figura 149 apresenta uma amostra na qual a FP contou apenas com PBE, enquanto a FS teve ocorrência de CC.

Figura 149 – Ocorrências verificadas na SBI10.R.CS.9d (a) FP, aprox 30x, 84 dias
(b) FS, aprox de 30x, 84 dias



(a)

(b)

Conforme a Figura 149, percebeu-se a formação de PBI na FP. Ainda na mesma amostra, houve formação de CC em longo trecho na FS, indicando que a limitação do método ocorreu em decorrência da maior abertura da fissura e/ou disponibilidade de PE no local. Para complementar a análise em relação a essa composição, apresenta-se amostra submetida à câmara de carbonatação com CC, vide Figura 150.

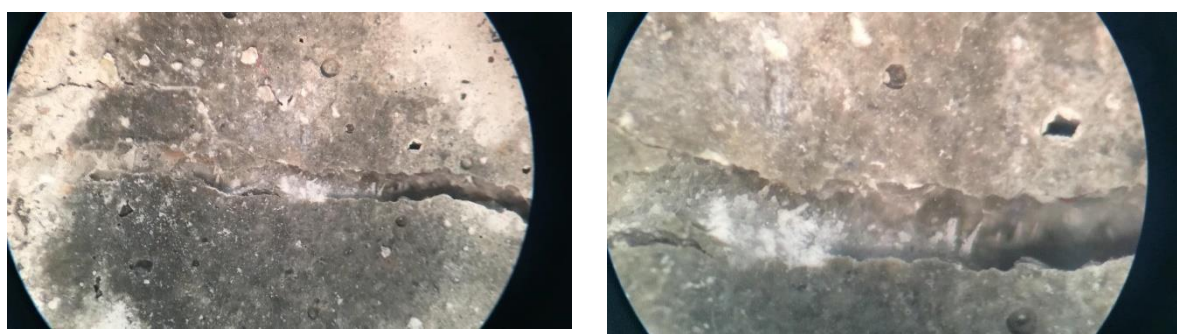
Figura 150 – Manifestação de CC na amostra SBI10.C.CS.15b, aprox 7,5x



A Figura 150 apresenta amostra submetida à carbonatação acelerada. Sobre essa exposição em amostras com SB, tem-se que, conforme já citado, o ambiente não inibiu a cicatrização, pelo contrário, esse foi o grupo amostral de maior êxito em relação a esse traço. O fato decorre da própria atividade microbiana que pode converter CO_2 formando CaCO_3 , contando com o lactato de cálcio como nutriente (SHIVAM et al., 2017).

Fazendo referência ao traço SBI20, não houve registro nas amostras submetidas ao corte. A apresentação das ocorrências verificadas no grupo submetido ao ensaio mecânico se iniciam pela amostra SBI20.R.CS.7a, apresentada na Figura 151, sendo o registro realizado 7 dias pós fissuração.

Figura 151 – Ocorrência de CC na amostra SBI20.R.CS.7a, com aprox. de (a) 30x e (b) 50x, ambas aos 7 dias



(a)

(b)

Além de ter se dado de modo rápido, na Figura 151, se nota que os produtos formados na amostra SBI20.R.CS.7 ocorreram com aparente densidade e na totalidade da espessura, sem falhas ou irregularidades, mesmo na reduzida idade de exposição. Também nesse grupo de amostras, tem-se a formação de produtos excedentes à espessura das fissuras, ao seu redor, ou escorrendo na superfície do corpo de prova, como ilustra a Figura 152.

Figura 152 – Verificação do produto de cicatrização formado na superfície da amostra SBI20.R.CS.9a, análise aos 7 dias (a) aprox. de 7,5x (b) aprox. de 40x.



(a)



(b)

A referida imagem apresenta acúmulo superficial e escorrimento no produto de cicatrização formado. A Figura 153 apresenta ocorrências verificadas aos 7 dias, através das quais fica claro o formato dos produtos gerados de cicatrização.

Figura 153 – Ocorrências verificadas aos 7 dias, amostra SBI20.R.CU.11a (a) aprox de 40x, 7 dias (b) aprox de 50x, 7 dias



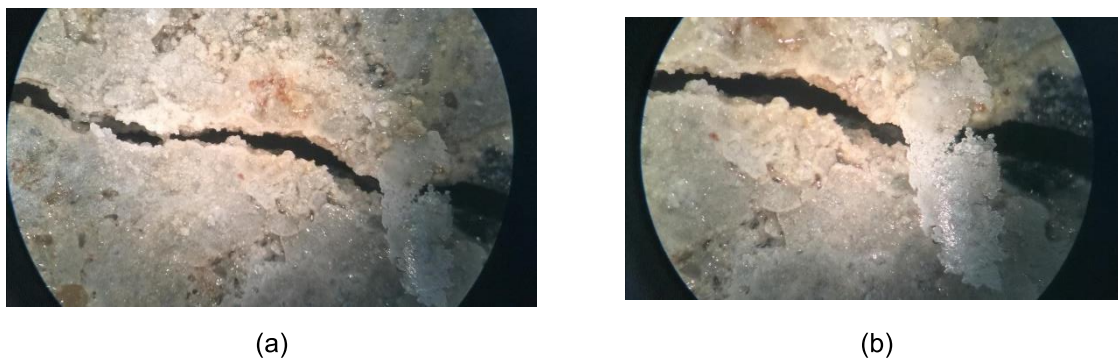
(a)



(b)

Como observa-se da Figura 153, com ampliação de 40 e 50x, tem-se os produtos formados nas bordas e paredes internas das amostras, direcionando-se para o centro da amostra, porém, sem a cicatrização efetiva. O formato do produto é ramificado e esbranquiçado, concordando com o citado por (ROOIJ et al., 2013). Uma ocorrência também de PBE, porém com diferente aspecto é apresentada na Figura 154.

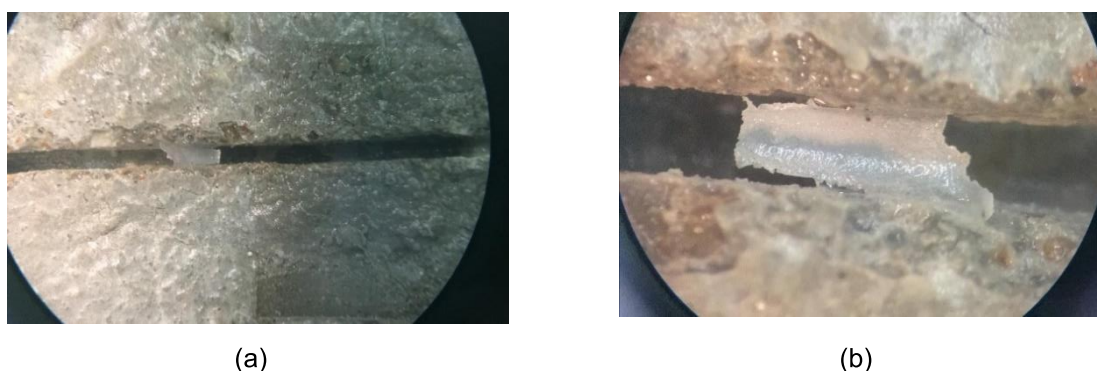
Figura 154 – Ocorrência de PBE e formação de placa na amostra SBI20.N.CU.4d (a) aprox. 10x, 56 dias (b) aprox. 30x, 56 dias



A Figura 154 apresenta a formação de PBE na fissura e no mesmo trecho representado tem-se uma lâmina formada excedente a espessura da fissura, depositando-se sobre a superfície (SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018b).

Dando continuidade na apresentação dos resultados, em relação ao traço SBI30, percebeu-se a formação de produtos em amostras submetidas ao corte. Em uma das amostras, percebeu-se a formação de lâminas com a espessura total da fissura, porém de modo isolado, como ilustra a Figura 155.

Figura 155 – Verificações na amostra SBI30.C.CS.14 (a) 28 dias e aprox de 7,5x e (b) 84 dias e aprox de 30x



Essa placa formada tem espessura de 1,43mm. Nela, pode-se perceber a fragilidade que reside na fixação, ao analisar os vazios na interface entre a borda da fissura e o produto. Em relação ao formato verificado, Zai e Murthy (2015) já citam que a calcita ocorre em formatos de lâminas sobrepostas. Em termos da espessura, 1,43mm é muito superior a bibliografia e inclusive em relação à maioria das cicatrizações apresentadas no presente estudo. A outra amostra que apresentou ocorrências pertencendo a esse grupo é apresentada na Figura 156.

Figura 156 – Verificações na amostra SBI30.C.CU.17 (a) ocorrência de CC e (b) aprox interior fissura



(a)



(b)

Na Figura 156, são percebidas duas ocorrências: em um trecho da amostra houve formação de CC, em trecho com espessura de 1,52mm. Ainda, ao aproximar a imagem na base da fissura, notou-se o acúmulo de produtos sobressalentes à superfície, com aspecto de sobreposição.

Dentre as amostras submetidas ao ensaio mecânico, foi notada uma predominância de PBE e PBI. A Figura 157 inicia a apresentação das ocorrências manifestadas, apontando para a formação expressiva de produtos já na idade de 7 dias.

Figura 157 – Formação de produtos -PBE e acúmulo superficial- SBI30.N.CU.7b (a) aprox 20x, 7 dias (b) aprox 50x, 7 dias



(a)



(b)

Percebe-se na referida figura a formação de produto interna e externamente à fissura, ocorrendo com depósito superficial. Também em relação a ocorrências na idade de 7 dias, tem-se a Figura 158 apresentando a formação de PBE e de CC com escorrimento, conforme segue.

Figura 158 – Formação de cicatrização aos 7 dias, PBE e acúmulo superficial (a) amostra SBI30.R.CS.8b, aprox 30x (b) SBI30.R.CS.9b, aprox 30x



(a)



(b)

Como tem-se na Figura 158, mesmo considerando a mesma composição das amostras, meio de exposição e cura, a ocorrência se diversificou tendo uma delas apontado para a formação de PBE, aparentemente densa e com coloração esbranquiçada, e a outra apresentando CC com aparente escorrimento na superfície da amostra. A Figura 159 apresenta outras ocorrências verificadas também nas idades iniciais, novamente apontando para comportamentos diferentes em amostras pertencentes a um mesmo grupo de análise.

Figura 159 – Ocorrências aos 7 dias, (a) PBE, amostra SBI30.R.CS.9c, aprox 40x (b) PBE, amostra SBI30.R.CS.9c, aprox 50x (c) acúmulo superficial, SBI30.R.CS.9d, aprox 50x



(a) SBI30.R.CS.9c, 7dias,
aprox 40x



(b) SBI30.R.CS.9c,
7dias, aprox 50x



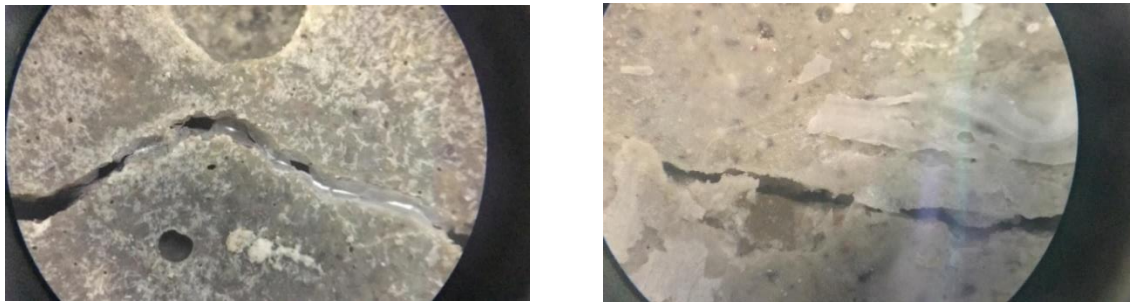
(c) SBI30.R.CS.9d, 7dias,
aprox 50x

Como ilustra a Figura 159, em uma mesma amostra são vistas diferentes ocorrências. Em a, percebe-se a formação do produto com formato semelhante a uma placa, com grande acúmulo e não apenas na borda. Em b, conta-se com outro comportamento, em que há novamente grande acúmulo de produtos, com

sobreposição em relação a superfície. Em c, a imagem se aproxima de região com grande permanência do produto, através da qual se nota sua coloração esbranquiçada e aparente densidade.

Um formato diferente foi verificado em outras amostras desse grupo amostral, com cicatrização no formato de placas transparentes, que ora se depositaram na espessura da fissura, ora sobre a sua superfície, como ilustra a Figura 160.

Figura 160 – Formação de produtos no formato de placas (a) SBI30.R.CU.12c, aprox de 20x (b) SBI30.C.CU.17a, aprox. de 30x, idade de 28 dias após carbonatação



(a)

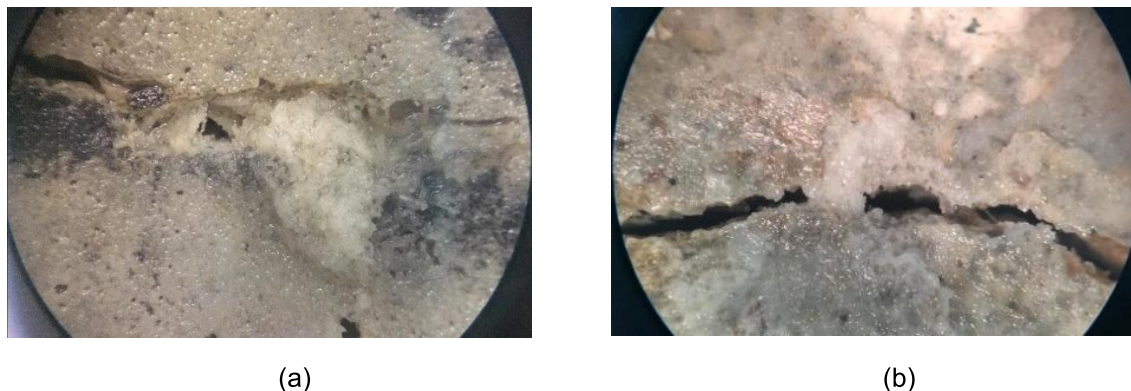
(b)

Conforme a Figura 160, nem sempre o formato do produto de cicatrização é o acúmulo superficial, podendo ocorrer no formato de placas na fissura e superficialmente. A diferenciação no produto gerado pode decorrer da ativação de partículas de cimento anidro formando C-S-H (WANG et al., 2014c), e ainda, de variações na SB que interferem na morfologia da calcita, como já citado. Zemmann, Herrmann e Dehn (2019) verificaram lâminas, concordando com o aqui apresentado.

Inicia-se nesse ponto a descrição dos traços nos quais as SB foram inseridas através da aplicação de vácuo. No traço SBV10, não houve nenhuma ocorrência relacionada às amostras cortadas. No outro tipo de formação de fissura, a maior espessura cicatrizada foi de 0,748mm, indicando para viabilidade de ocorrência do fenômeno nessa faixa de abertura. Luo, Qian e Li (2015) indicam que em fissuras dessa dimensão a cicatrização ocorreu, em seu estudo, em percentual entre 50 e 70%.

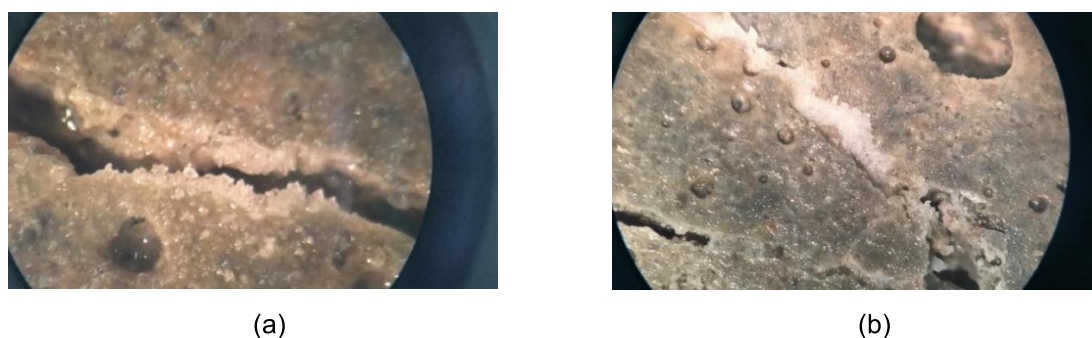
A Figura 161a apresenta para a formação de produtos de cicatrização nos arredores da irregularidade da amostra. Em Figura 161b, percebe-se a formação de produtos na borda e em um ponto alcançando a CC.

Figura 161 – Ocorrências verificadas em amostras expostas à névoa salina (a) SBV10.N.CS.1a, aprox. 20x, 84 dias (b) SBV10.N.CU.4b, aprox. 30x, 56 dias



Ambas amostras apresentadas na Figura 161 foram submetidas à névoa salina, e apresentaram produtos de cicatrização. Em a, tem-se a formação de cristais sobrepostos, de coloração esbranquiçada. Tziviloglou et al., (2016) indicam que não é possível perceber o formato da SB ou dos esporos pois há sobreposição de tais produtos pela calcita, o que parece ser o verificado na Figura 161a. A ocorrência em Figura 161b pode indicar que não havia PE na região da fissura com incidência suficiente para maiores ocorrências de cicatrização. A Figura 162 apresenta amostra com ocorrência em duas fissuras.

Figura 162 – Ocorrências na amostra SBI10.R.CS.7b (a) aprox 40x, 56dias (b) aprox 20x, 56 dias



Como nota-se, na amostra a que se refere a Figura 162 houve formação de produtos com diferente aspecto e em duas fissuras. Conforme a Figura 162a, houve formato pontiagudo e ao longo do interior da fissura, sem que houvesse progressão para CP ou CC, podendo indicar uma limitação em termos de abertura máxima ou disponibilidade de cápsulas. Na Figura 162b, é possível notar que em outra fissura da mesma amostra que houve formação densa do produto de cicatrização, ao longo de sua espessura. inclusive em trecho com irregularidade e curvo, em cor branca e

sobreposição na superfície, atribuído a presença de calcita. A Figura 163 apresenta diferentes ocorrências de CC.

Figura 163 – Ocorrências de CC com diferentes configuração, (a) SBV10.R.CS.9b, aprox 20x, 84 dias e (b) SBV10.C.CU.17b, aprox 30x, 56 dias



(a)



(b)

Como expõe a Figura 163, nota-se novamente o diferente aspecto de duas amostras do mesmo traço que apresentaram a CC. Enquanto verifica-se em a uma aparente maior densidade e uniformidade do produto ao longo da fissura, em b percebem-se inúmeras falhas no perímetro e na periferia.

Em relação ao traço SBV20, novamente não foram percebidos registros de cicatrização nas amostras com corte. Dentre as amostras fissuradas pelo ensaio mecânico, destaca-se a ocorrência de CC, promovendo de fato a selagem e a maior durabilidade da estrutura, tendo valor potencial de 0,854mm.

A Figura 164 apresenta CC com diferente aspecto em amostra pertencente ao grupo exposto à névoa salina e ao grupo neutro, respectivamente.

Figura 164 – Ocorrências aos 84 dias (a) SBV20.N.CU.6d, aprox 20x (b) SBV20.R.CS.7d, aprox. de 40x



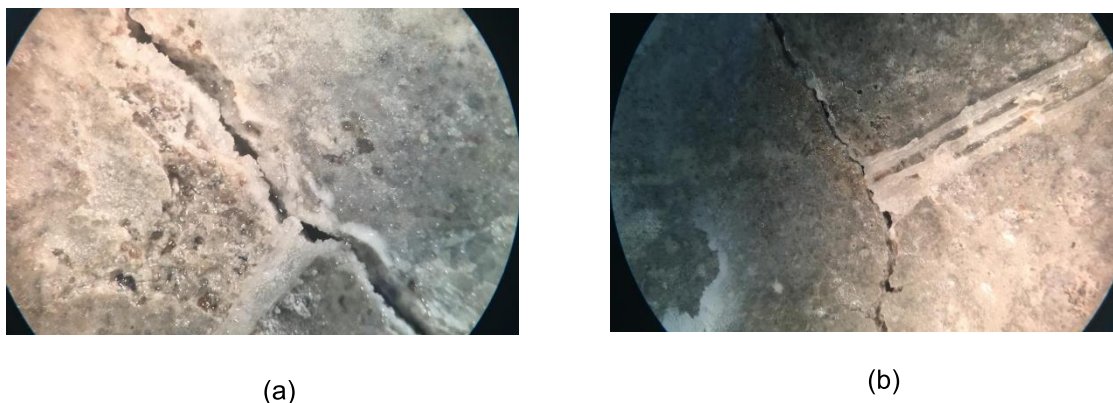
(a)



(b)

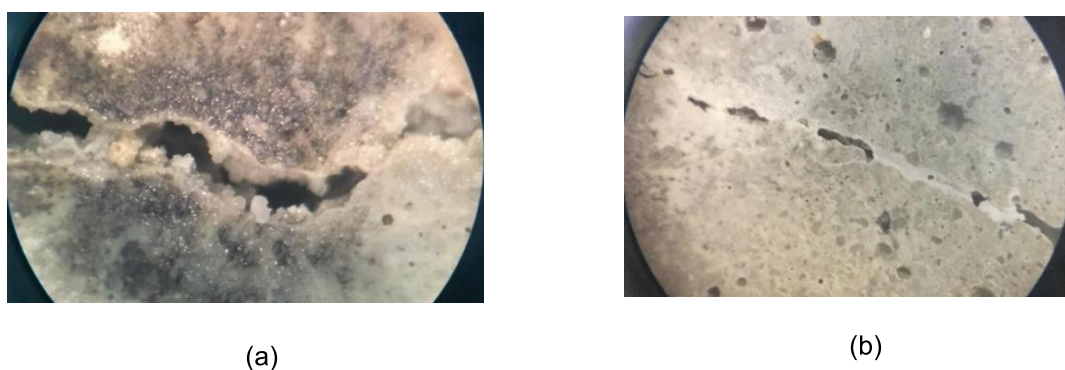
A Figura 164a ilustra os produtos formados nas paredes das fissuras, chegando a alcançar a CC em um trecho da amostra. Na Figura 164b há maior acúmulo e sobreposição superficial em trechos com falhas, sem cicatrização efetiva. A Figura 165 apresenta para o escorrimento percebido assim como nos outros traços.

Figura 165 – Amostra SBV20. R.CS.7b, 56 dias (a) aprox 20x e (b) aprox. 7,5x, com escorrimento



Como nota-se na Figura 165, de modo correlato ao já verificado em outros traços, houve o escorrimento de produtos pela superfície da amostra. Avançando na apresentação das imagens, a Figura 166 apresenta para a formação de produtos de diferente configuração.

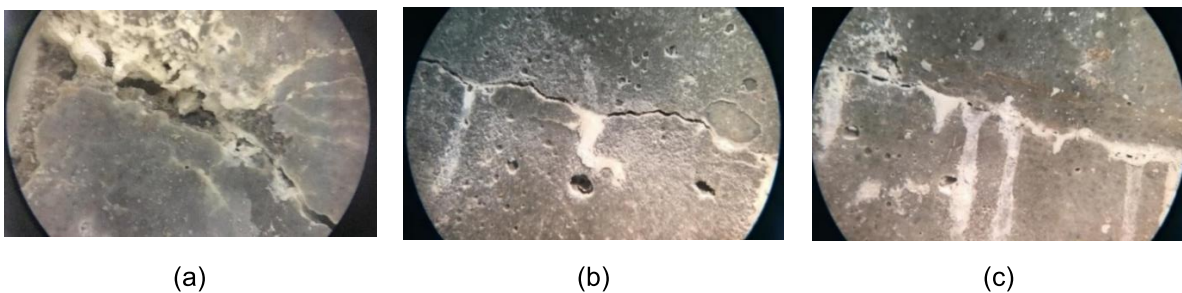
Figura 166 – Verificações em (a) amostra do grupo referência, SBV20.R.CU.12a, aprox. 50x, 84 dias e (b) exposto à carbonatação acelerada, SBV20.C.CU.18b, aprox. 20x, 84 dias



Conforme a Figura 166a, foi vista a formação de produtos na parede das fissuras, com formato irregular e aparente sobreposição. Nesse caso, em termos de profundidade também é possível notar a formação de cristais. Na Figura 166b o produto apresenta aspecto esbranquiçado e com aparente densidade ao longo de toda a fissura.

No traço SBV30, não foram percebidas ocorrências nas amostras submetidas ao corte. Um ponto a ser destacado no grupo de amostras fissurado mecanicamente em relação aos demais é a capacidade desse traço de cicatrizar de forma contínua um trecho de fissura com abertura superior à 1mm (amostra SBV30.R.CS.8c), tendo sido essa espessura quase que 3x superior à espessura da fissura e assim representando o acúmulo de produto na superfície da amostra. A Figura 167 apresenta diferentes tipos de produto formado já aos 7 dias.

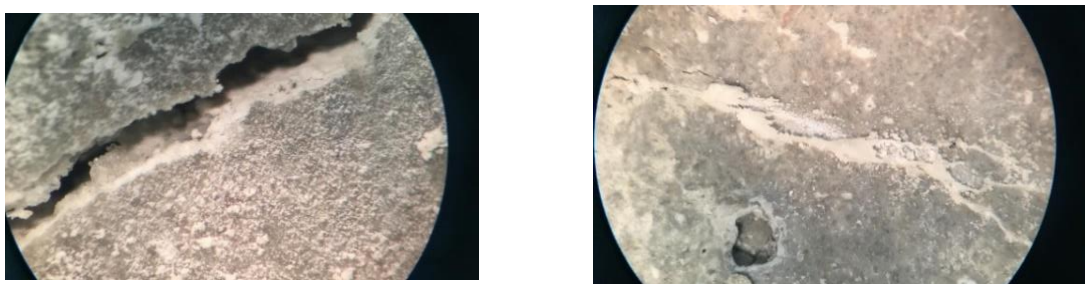
Figura 167 – Ocorrências verificadas aos 7 dias (a) SQV30.R.CS.7d , aprox. 20x (b) SQV30.R.CS.8b, aprox. 7,5x (c) SQV30.R.CS.8c, aprox.10x



Como apresenta a Figura 167, nas referidas amostras e espessuras de fissura, já aos 7 dias houve formação de produtos de cicatrização dissemelhantes. Em a, o produto se formou no interior da fissura, parcialmente ao longo de sua abertura e em termos superficiais. Por mais que o produto formado seja vasto, não percebe-se a cicatrização total, indicando que ele pode estar se concentrando nos arredores das cápsulas, conforme já relatado (SHIVAM et al., 2017). Em b, a ocorrência também contou com escoamento, ocorrendo em dois pontos e nos demais com a formação de produtos limitando-se às paredes das fissuras. Em c, em outra face da mesma amostra retratada em b, parece ter havido maior presença de PE, uma vez que notou-se o escoamento em diversos pontos da amostra, que chegou a apresentar CC, porém, com pequenas falhas pontuais.

A Figura 168 apresenta a mesma amostra porém em diferentes idades e faces de análise.

Figura 168 – Ocorrências na amostra SQV30.R.CS.9a (a) aprox 20x, 56 dias (b) aprox 20x, 7 dias

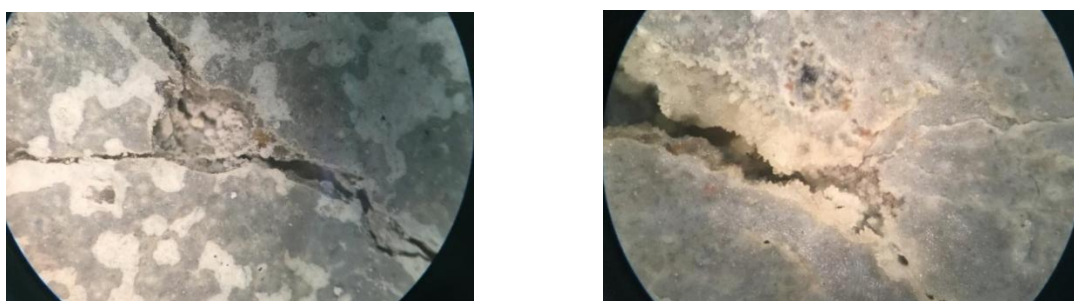


(a)

(b)

Como aponta a Figura 168, por vezes em uma mesma amostra é possível identificar comportamento díspar. Em a, tem-se a face a da amostra SQV30.R.CS.9, na qual aos 56 dias de análise e depois percebeu-se apenas PBI. Em b, tem-se a face c, na qual não apenas formou-se o produto ao longo da fissura como ainda houve acúmulo superficial, indicando para um depósito de calcita. A Figura 169 apresenta ocorrências próximas a irregularidades na amostra SQV30.C.CU.17, face d.

Figura 169 – Progressão na cicatrização da amostra SQV30.C.CU.17d (a) aprox. 20x, 28 dias, PBE (b) aprox. 20x, 84dias acúmulo de cristais sobre a superfície da amostra



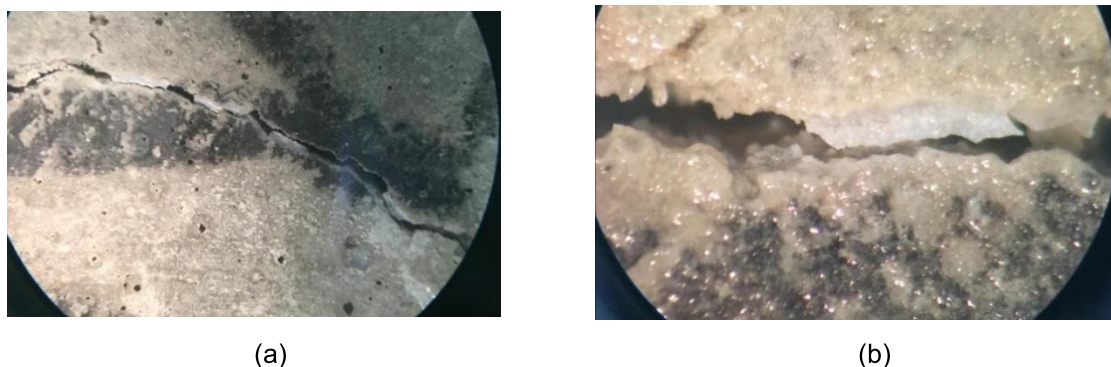
(a)

(b)

Como exibe a Figura 169, novamente, assim como nos traços contendo SQ, percebe-se nas irregularidades superficiais um ponto de formação potencial de produtos de cicatrização. A Figura 170 conclui a apresentação desse traço, expondo amostra na qual a formação ocorreu no formato de placas formadas no interior da fissura, o que foi identificado em mais de um ponto, com aparente densidade elevada. Sobre essa ocorrência, pode-se citar que ocorreu na parede interna da fissura, sem que fosse percebido escoamento para a superfície. Além disso, não

se nota a ocorrência pontual, e sim em pequenos trechos ao longo da abertura da fissura.

Figura 170 – Progressão da cicatrização na amostra SQV30.R.CU.18a -Ocorrência no formato de placas (a) aprox 10x, 28 dias (b) aprox 50x, idade final



Dentre os traços contendo SB, diversas vezes foi percebida uma formação de produto que excede a espessura da fissura, chegando a valores mais de 2x a abertura média inicial. Esse acúmulo superior de produtos é abordado por diversos estudos (HOMMA et al, 2009; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018; XU et al., 2019; ZHANG et al., 2017).

De acordo com Wiktor e Jonkers (2011) e Khaliq e Ehsan (2016) essa formação excedente e expressiva de calcita, pode ser explicada pelos dois mecanismos que lhe dão origem:

- I. Há a formação de CaCO_3 pela reação do lactato de cálcio com o oxigênio;
- II. Decorrente da reação metabólica tem-se CO_2 , que pode reagir também com o CH e formar CaCO_3 ;

O formato, o tipo de ocorrência e o acúmulo superficial são tidos em bibliografia como uma confirmação de que o produto formado é a calcita (KRELANI, 2015; KRISHNAPRIYA; VENKATESH BABU; G., 2015; TZIVILOGLOU et al., 2016). Khaliq e Ehsan (2016) citam que o acúmulo sobre a superfície chega a ocorrer com sobressalência de até 0,2mm.

Outro ponto de relevante ocorrência foi a formação de PBE, sobre a qual faz-se as seguintes considerações:

- a) Sahmaran et al., (2014) citam que o produto se forma nas bordas da fissura e chega ao centro para a cicatrização. Depende-se da disponibilidade de água e da produção de calcita, a fissura pode ser cicatrizada ou não;

- b) Há indícios de que em termos de cápsulas com SB, quando há a formação da fissura a cicatrização pode se limitar ao local próximo à posição do agregado, podendo se depositar na parede interna da fissura e ter cicatrizado internamente a abertura, sem indícios na superfície externa da amostra (AL-TABBAA et al., 2019; LI; HERBERT, 2012; LUO; QIAN; LI, 2015; SNOECK et al., 2016; TALAIKHOZAN et al., 2014). Shivam et al., (2017) explicam que essa ocorrência se deve ao fato do CH não se dissolver longe do local onde há a abertura da fissura, e assim, age diretamente e localmente na produção de CaCO_3 ;
- c) Ainda em relação a presença das cápsulas, tem-se que sua envoltória protege a SB, sendo superior a aplicação direta (KHALIQ; EHSAN, 2016) e sua dispersão tem relação linear com a viabilidade de ocorrência de cicatrização;
- d) Em relação a presença dos agregados convencionais dispersos na matriz, Chen, Chen e Tang (2020) citam que na zona de transição pode haver grande formação de cristais de CH e etringita, por permitir maior acúmulo de água. Além disso, segundo os autores, por sua fragilidade e fácil ruptura pela fissura, quando do uso de SB parece haver condições favoráveis para a formação de CaCO_3 .
- e) Xu et al., (2019) abordando as misturas contendo SB, informam que a formação da calcita pode ocorrer interna ou externamente, dependendo do local e da respectiva presença de cápsulas que liberem esses agentes. Os autores pontuam ainda que essa ocorrência pode se dar tanto na superfície quando no interior da amostra, concordando com os resultados obtidos nessa pesquisa.

Na análise visual, percebeu-se em diversas figuras a aparente densidade do produto. Ling e Qian (2017) avaliando o uso de SB perceberam que havia maior resistência ao ataque por cloretos após a ocorrência da cicatrização, o que pode ser decorrente de um produto formado com densidade adequada e coesão, concordando, portanto, com a manifestação apontada.

Diversos estudos relatam que com SB tem-se apenas a formação de CaCO_3 (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016; ZAI; MURTHY, 2015; ZHANG et al., 2016b), porém, nesse estudo notou-se em algumas amostras o formato diferenciado, com menor definição do produto, com semelhança ao apresentado pela bibliografia como

C-S-H. De Muynck et al., (2008) citam, no entanto, que o tipo e o meio de cultura, assim como o tipo de bactéria e ser implementada exercem influência relevante na morfologia do CaCO_3 , o que pode justificar tais diferenças. Pode ter ocorrido, ainda, a cicatrização autógena considerando a quantidade de cimento da amostra.

Em relação a tais traços, assim como nas SQ, traça-se hipótese relacionada à disponibilidade dos agregados de PE com a solução bacteriana (GUPTA; KUA, 2016; LUO; QIAN, LI, 2015; WU et al., 2012) e o conseqüente tipo de cicatrização verificado. Sobre esse aspecto, Talaiekhazan et al., (2014) citam que pode ocorrer formação apenas no interior da fissura sem que isso seja visto em superfície. Snoeck et al., (2016) pontuam que ocorre paralelamente a formação de produtos no interior da fissura e a sua fixação na superfície da amostra e em sobressalência, como apontado por Zhang et al., (2017). Al-tabbaa et al., (2019) citam que é possível inclusive as duas regiões apresentarem diferente formação de produto. Em seu estudo, os autores perceberam que havia C-S-H no interior da fissura e CaCO_3 na superfície.

Outra hipótese é oriunda do estudo de Iheanyichukwu, Umar e Ekwueme (2018), que citam que mesmo havendo o rompimento das cápsulas os esporos podem permanecer por até 6 meses, e assim, o corte pode ter provocado a ruptura do agregado, sem lavar os esporos que permaneceram aptos para formar os cristais de cicatrização. Além da disponibilidade da PE com SB, como enfatizam Koster et al., (2017), deve-se atentar para a aderência da cápsula na matriz, no que tange a abertura causada pela fissura (MUHAMMAD; OUCIF, 2018).

Outro ponto a ser destacado é a formação de produtos próximo a irregularidades superficiais das amostras. As variações na superfície da amostra podem ter se apresentado como um ponto com acúmulo e presença contínua de água, podendo assim, ter sido favorável para a efetivação da cicatrização, nos casos de cura CU (TZIVILOGLOU et al., 2016; YILDIRIM et al., 2018; ZHANG et al., 2017).

Em diversas amostras foi verificado diretamente CC. Pode ser que em alguns pontos a formação tenha se iniciado como CP e progredido para CC, como citam Kalhori e Bagherpour (2017). No caso das amostras em exposição à névoa e carbonatação esse fenômeno inicial pode nem ter sido observado. Xu et al., (2019) relatam pequena variação nos traços entre os 3 e os 28 dias.

No que tange à idade de ocorrência, diversas amostras apresentaram a cicatrização já aos 28 dias após a data da fissuração, e muitas vezes já na espessura total, indicando um período reduzido de atuação da SB após a sua ativação. Segundo

Davies et al., (2018), assim que a fissura se forma e há condição favorável (presença de água), os esporos germinam, a bactéria metaboliza os nutrientes e precipita calcita. Ainda em relação ao período de formação dos produtos e contrariando o citado, Lucas et al., (2018) indicam a eficiência da cicatrização sendo de 40% aos 63 dias. De fato, duas amostras apresentaram apenas aos 56 dias a formação de produtos, tendo sido essas expostas à câmara de carbonatação acelerada. Xu et al (2019) e Schwantes-Cezario et al (2018b) citam que tem-se uma estimativa de que a reação de formação CaCO_3 por ativação microbiana seja rápida.

Em relação ao tipo de cura empregado, a utilização de SB implica algumas condições para a formação de calcita e decorrente cicatrização. Alguns estudos citam que há vantagens em relação a tipo de CS, uma vez que esse garante a disponibilidade de água e de oxigênio constantemente e por toda a extensão das fissuras. (TZIVOGLOU et al., 2016; ZHANG et al., 2016). Outros estudos posicionam-se a favor de realizar ciclos de molhagem e secagem, uma vez que nos ciclos secos há maior fornecimento de oxigênio, e assim, contribui-se para a formação de calcita. Wiktor e Jonkers (2011) citam que a CU é suficiente para a formação dos produtos de regeneração, o que de fato foi percebido nessa pesquisa. Luo, Qian e Li (2015), analisando comparativamente os tipos de cura, informam que primeiramente tem-se a CS como melhor condição, seguida dos ciclos de molhagem e secagem e por fim CU.

Zhang et al., (2016) afirmam que uma das vantagens da CS é o fornecimento de oxigênio para viabilizar a atuação das soluções bacterianas. Ao perceber essa necessidade constante de água, Tittelboom e De Belie (2013) chegam a comentar que há vantagem em ter-se reservatórios internos de água em cápsulas. Zhang et al., (2017) confirmam, indicando a água e o oxigênio como chaves para esse processo. Tais autores concordam com o apresentado, mesmo tendo sido reduzida a superioridade de CS. Sobre esse ponto, Luo, Qian e Li (2015) destacam que quando a amostra é submersa a SB é transportada por diferença de concentração da matriz para a fissura, facilitando e fomentando essa ocorrência. Tziviloglou et al., (2016) concordam apontando para a superioridade da CS para composições com SB. Nesse estudo há essa superioridade, ainda que com pequena diferença.

Em relação aos ambientes de exposição, há uma insegurança relacionada ao pH do meio em que a bactéria está inserida. Sobre esse ponto, considera-se que, apesar de protegida no meio de envoltória proporcionado pela PE, as cápsulas estão

imersas em matriz cimentícia, com pH alcalino. Sobre isso, Wang et al., (2017) testando a bactéria *Bacillus Sphaericus*, disseram que a faixa ótima para a formação de produtos é de pH entre 7~9, mas que entre 10~11 a formação de calcita não é inviabilizada, é apenas reduzida. Ramachandran et al., (2011) citam o desenvolvido pleno de calcita por bactérias do tipo *B pausterii* em matrizes cimentícias com ph superior a 12, o que concorda com os apontamentos verificados nesse estudo.

Também, Madigan et al., (2016) apontam que este gênero tem sido o mais estudado quanto ao cultivo de suas espécies em ambiente alcalino, e quanto à formação de endósporos. Conforme Zai e Murthy (2015) tais microorganismos são capazes de precipitar carbonato de cálcio e ao mesmo tempo resistir em ambientes agressivos.

Em relação à exposição em câmara de carbonatação acelerada em específico, cabe destacar que a reação do lactato de cálcio com a presença de oxigênio gera CO₂, que as bactérias podem converter em CaCO₃, gerando cristais que podem cicatrizar as fissuras (JONKERS et al., 2010; KHALIQ; EHSAN, 2016). Ou seja, além da carbonatação do CH, há ainda a formação de cristais decorrentes da atividade microbiana (WIKTOR; JONKERS, 2011).

Seifan et al., (2016) afirmam que o fato de haver íons cloreto e carbono não impede a formação de cristais, porém, parece ter impacto na ocorrência de cicatrização efetiva (GUPTA; PANG; KUA, 2017). A Tabela 60 apresenta síntese dos resultados.

Tabela 60 – Síntese dos resultados obtidos nas amostras com uso de SB

Traço	Tipo de fissura	e. Máx cicatrizada para cada tipo		e média dentre as cicatrizações verificadas		Nº de amostras com ocorrência, formação de produtos com cicatrização					
		CC	CP	CC	CP	N		C		R	
						CS	CU	CS	CU	CS	CU
SBI10	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	1,670	0,690	0,569	0,435	9	6	10	9	9	9
SBI20	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,907	0,546	0,581	0,473	7	9	10	7	9	9
SBI30	Corte mecânico	1,520	0	1,480	0	0	0	1	1	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,661	0,429	0,428	0,429	10	6	11	11	8	9
SBV10	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,748	0,520	0,437	0,408	6	8	6	5	8	3
SBV20	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ensaio de tração na flexão	0,854	0,259	0,554	0,259	8	6	3	4	9	9

	Corte mecânico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SBV30	Ensaio de tração na flexão	1,049	0	0,5185	0	11	9	11	10	12	10
Número total de ocorrências						51	44	52	47	55	49

Legenda: SQI: amostras com solução química encapsulada por imersão e SQV: por aplicação de vácuo; e: espessira; N: névoa salina; C: carbonatação; CS: cura submersa; CU: cura úmida; FS: fissura secundária; FP: fissura principal; CC: cicatrização contínua; CP: cicatrização pontual;

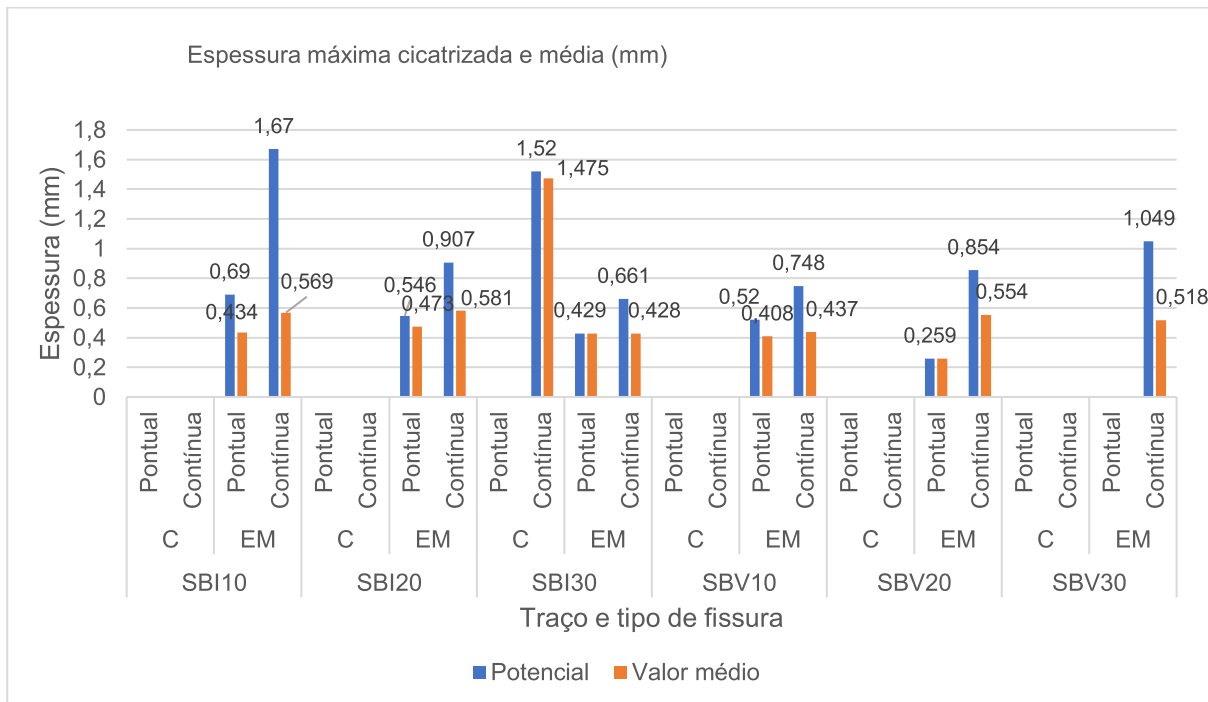
Tendo em vista a ocorrência de CC, nas amostras de SBI não houve relação entre a espessura potencial e o teor de PE impregnadas com SB. Nas amostras nas quais houve aplicação de vácuo essa relação diretamente proporcional foi percebida. Em relação à ocorrência de CP, percebeu-se relação inversa, o que pode apontar para uma não influência apenas da composição, mas sim, e majoritariamente, da dispersão dos grãos de PE na matriz, (WU; JOHANNESON; GEIKER, 2012). Zhang et al., (2017) contrapõem os autores, ao afirmar que, mesmo com a dependência da dispersão, ao analisar o encapsulamento comparativamente com o lançamento direito na matriz, os agregados de PE possibilitam até 3x mais cicatrização. Muhammad e Oucif (2018) somam nesse cenário a influência da relação núcleo/casca. Em termos dos diferentes processos, ainda deve ser investigado o mecanismo de liberação de SB na matriz.

Outro parâmetro de extrema relevância não apresentado nessa Tabela 60 é a abertura e a conseqüente geometria da fissura, o que pode ter possibilitado maiores potenciais de cicatrização por apresentar menor abertura da fissura (FAN; LI, 2015; MULLEM et al., 2019), ou ainda, por características já apresentadas, tais como a presença e o fluxo da água nas diferentes espessuras de fissura (MIHASHI; NISHIWAKI, 2012). Gogne e Argouges (2012) citam que a cinética de formação de produtos de cicatrização é maior em fissuras de dimensão mais elevada, no entanto, com a maior abertura da fissura pode não haver produtos de cicatrização suficiente para formação de produtos. Zhang et al., (2017) citam que de fato a abertura é o fator chave para a cicatrização.

Ao considerar as diferentes exposições das amostras foram 95 ocorrências no grupo submetido à névoa salina, contra 99 do conjunto exposto à carbonatação e 104 do conjunto de referência, apontando para um certo equilíbrio nessa ocorrência e para viabilidade do fenômeno em ambientes reais de exposição das estruturas (RAMACHANDRAN; RAMAKRISHNAN; BANG, 2001; SULEIMAN; NEHDI, 2018; ZEMSKOV; COPUROGLU; VERMOLEN, 2013).

Avaliando o tipo de cura praticada, foram 158 ocorrências em amostras submetidas a CS, enquanto que as de CU foram 140. Tem-se assim a superioridade da CS, como já apontado por Zhang et al., (2016), ainda que de apenas 13% no presente estudo. Para apresentar os valores de cicatrização potencial e média das amostras com as soluções bacterianas, conta-se com a Figura 171.

Figura 171 – Espessura máxima e média cicatrizada (mm) em cada um dos traços variando-se o mecanismo de formação de fissura e o tipo de cicatrização- uso de SB



Conforme ilustra-se na Figura 171, em alguns traços e configurações de fissura que existem diferenças expressivas entre os valores de cicatrização potencial e médios, apontando possivelmente para pontos isolados, como a cicatrização de 1,67 mm. Em 5 dos 6 traços, percebe-se que na formação de fissura por corte não houve cicatrização, o que decorre do motivo já apresentado de que a parede da fissura pode não ter proporcionado as condições necessárias para formação e fixação dos produtos de cicatrização, além dos possíveis danos à PE provocados pelo corte.

Muhammad et al., (2016) apontam que com o uso de SB foi possível obter cicatrização de até 0,97mm com 0,32mm de profundidade. Esse valor se assemelha aos obtidos nesse estudo, porém, considerando que houve pontos de cicatrização potencial ainda superiores. Já Xu et al., (2019), ao sintetizar diferentes métodos de transporte de bactérias, citam que o método de absorção, realizado

nas PE apresenta o fechamento de fissuras máximo de 0,79mm, semelhante a alguns dos pontos verificados. Zhang et al. (2017) encontraram valores entre 0,51 mm e 0,79 mm quando da ocorrência de CC, valores semelhantes ao traço SBI20 e SBV10, por exemplo. Wang et al., (2014), por sua vez, indicam o valor de 0,970 mm para amostras contendo SB e de 0,25 mm quando utilizado apenas cimento. Schwantes-Cezario et al., (2018b), também utilizando a B.subtilis AP 91, relataram que foi possível cicatrizar aberturas de até 0,4mm, havendo, no entanto, formação excedente à superfície da amostra, o que também foi verificado em algumas ocorrências desse estudo.

5.4.4 Análise química e microestrutural

Para identificação dos produtos químicos gerados em decorrência do uso de SB, foi coletada uma amostra no traço SBI e uma amostra no traço SBV, que são apresentadas pela Figura 172 e Figura 173, respectivamente, sendo ambas com o mesmo teor de utilização de PE, de 30%.

Figura 172 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de SBI30

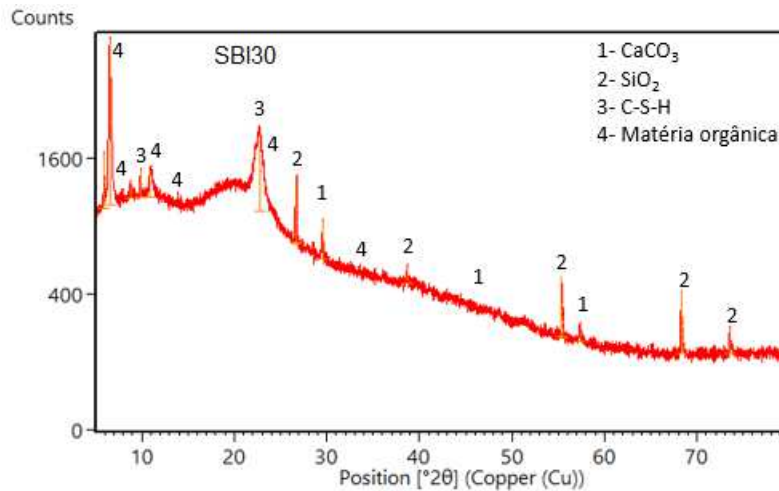
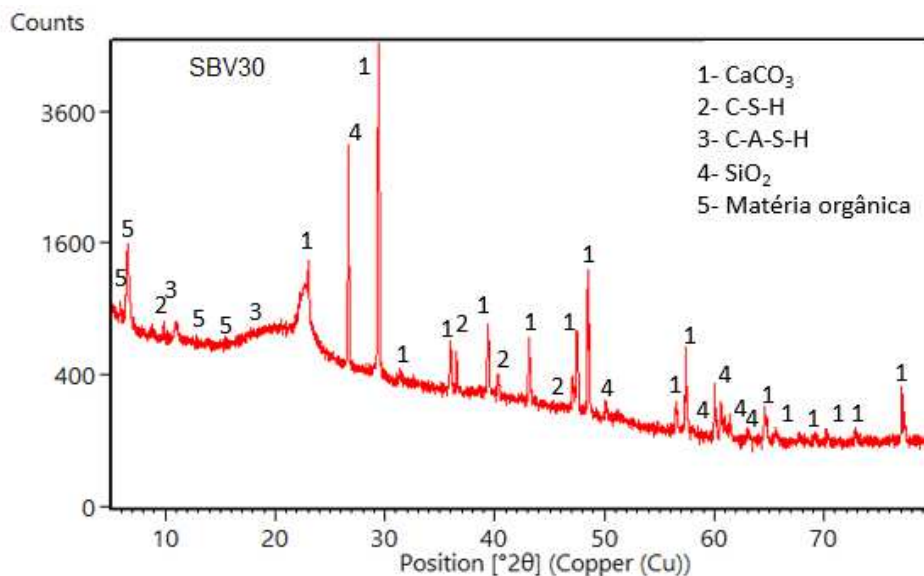


Figura 173 – Difratoograma de raios-X- Variável de uso de SBV30



No difratograma apresentado na Figura 172, detectou-se a presença de CaCO₃, sendo realmente o produto esperado considerando a conversão bacteriana e o nutriente utilizado de lactato de cálcio. Essa identificação também ocorreu na Figura 173, porém nessa última com um maior número de picos representativos. Igualmente, outro composto identificado nas duas amostras foi o SiO₂, decorrente da hidratação do cimento. Além disso, no difratograma alusivo ao encapsulamento por imersão foi identificada a presença de C-S-H. Cabe lembrar que mesmo que contenha solução bacteriana, trata-se de um traço com utilização de 300kg/m³ de cimento, e assim, essa identificação é coerente. Além disso, Afifudin et al., (2011) provaram que bactérias

bacillus quando as matrizes cimentícias podem formar C-S-H, concordando com essa identificação.

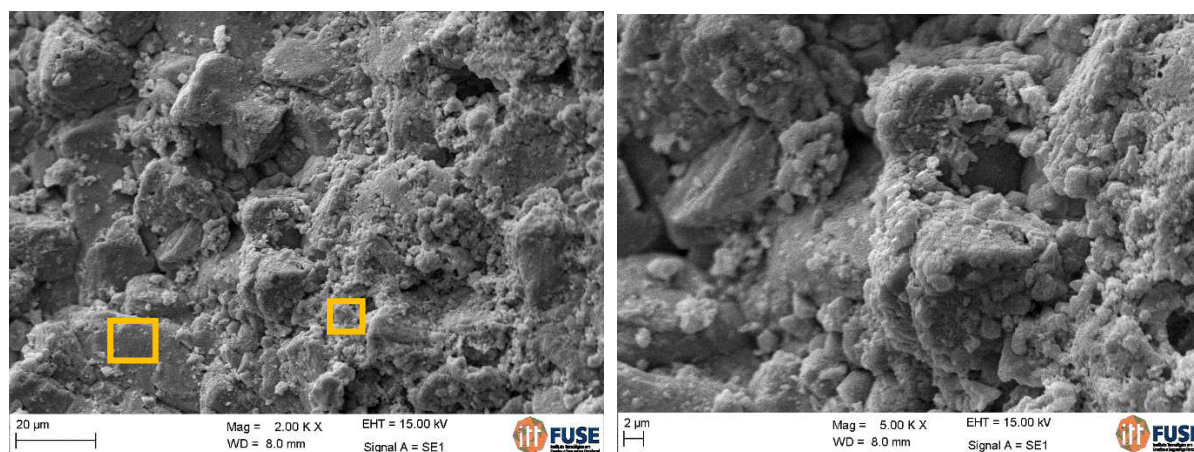
Finalizando a identificação do primeiro diagrama, houve presença de um componente identificado como $\text{Cu}_8\text{N}_{32}\text{C}_{144}\text{H}_{80}\text{Cl}_{32}$. A ficha catalográfica do produto apresenta-o como componente orgânico, o que concorda com a identificação de uma solução bacteriana, contendo C, H, O e N, componentes orgânicos que formam a solução.

Como apresentado nesse estudo, as bactérias empregadas procuram cátions para sua ligação, e assim, pode ser possível que tenha encontrado cobre (Cu) para efetuar essa ligação.

No difratograma da Figura 173 a diferença em relação ao anterior foi a identificação do C-A-S-H, o que também ocorreu nas amostras que continham apenas o consumo de cimento. Além disso, novamente identificou-se a presença de matéria orgânica, sendo nesse traço $\text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{N}_6$. Percebe-se que a identificação de um pico localizado aproximadamente aos 28 graus, referente à presença de CaCO_3 concorda com o apresentado por Park et al., (2010). Vieira (2017) avaliando amostras cimentícias contendo adições bacterianas percebeu a formação de Ca, O e C através da técnica de EDS, o que a autora atribui a presença de CaCO_3 , o que foi confirmado com imagens de MEV que mostraram o formato do produto, assim como, a formação de esporos.

Novamente, para complementar a análise dos produtos identificados, tem-se a a apresentando imagens oriundas da microscopia em amostras referentes aos traços SBI 30 E SBV 30, através da Figura 174 e Figura 175, respectivamente.

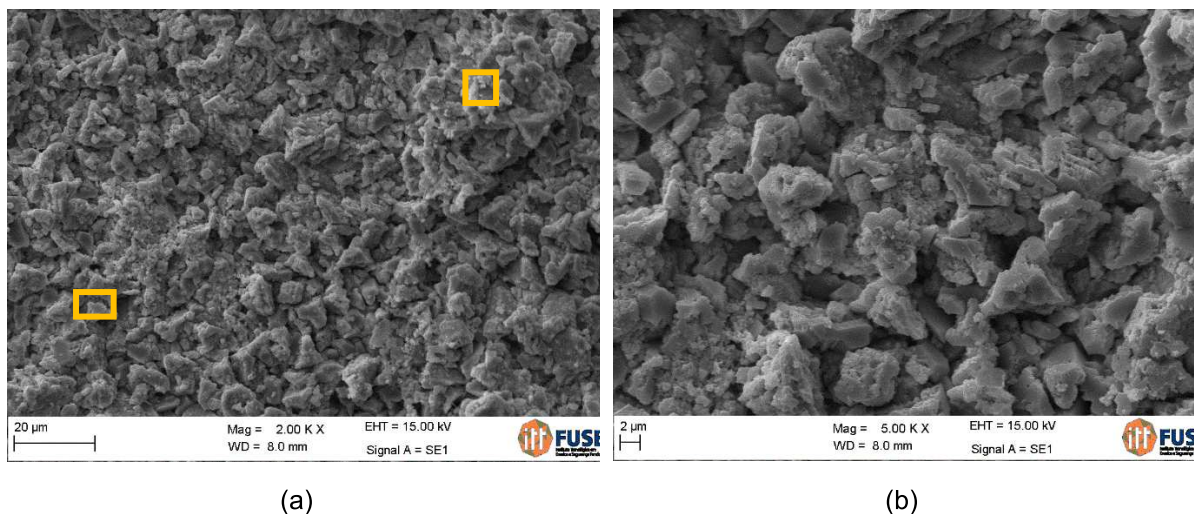
Figura 174 – MEV- Amostra com variável SBI30 - (a) aprox. de 2000x (b) aprox. de 5000x



(a)

(b)

Figura 175 – MEV- Amostra com variável - SBV30 - (a) aprox. de 2000x (b) aprox. de 5000x



(a)

(b)

Na Figura 174 e na Figura 175 foram verificados formatos semelhantes no produto de cicatrização. A amostra SBI30 foi analisada pela microscopia em um corte próximo à abertura da fissura, e nota-se que nesse ponto a imagem apresenta produtos em saliência em relação a superfície. A Figura 175 apresenta o mesmo formato já verificado nos traços anteriores, com sobreposição de produtos em lâminas. Salienta-se que há semelhança entre o reportado na bibliografia e o produto percebido, em que o material de aspecto lamelar e bastante definido é atribuído à presença da calcita, e o material com formato adjacente à formação de C-S-H. (ALGHAMRI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; ZHANG et al., 2017b). A análise de energia dispersiva de raios-X foi realizada nas áreas demarcadas na Figura 174 e na Figura 175. Os resultados obtidos, em termos de percentual de massa são apresentados na Tabela 61.

Tabela 61 – Identificação dos elementos através de EDS- Solução bacteriana

Identificação na amostra SBI30		Identificação na amostra SQV30	
Elemento	Percentual em massa(%)	Elemento	Percentual em massa(%)
C	6,74	C	8,24
Si	-	Si	1,18
Ca	46,61	Ca	44,31
O	46,64	O	46,28

De acordo com o apresentado pela Tabela 61, os produtos verificados foram carbono, cálcio e oxigênio em ambas as amostras, com identificação do silício apenas

na amostra SQV30. Há concordância com o verificado em termos de aparência na MEV, minerais identificados no DRX e elementos químicos visto no EDS.

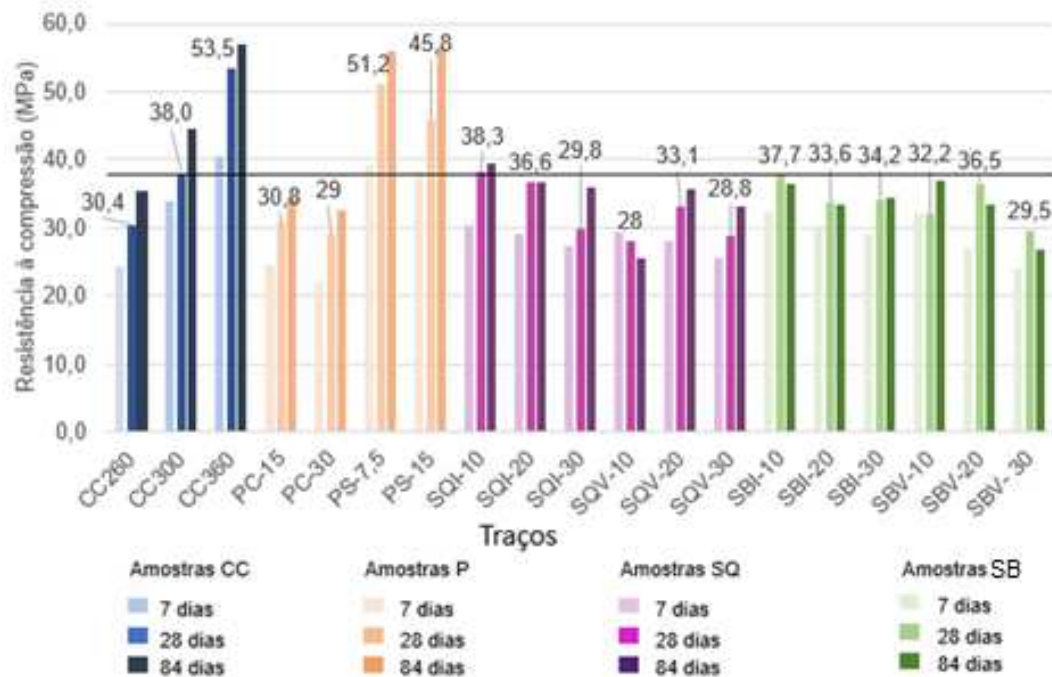
5.5 ANÁLISES COMPARATIVAS

Esse item apresenta as análises comparativas em relação às 19 composições avaliadas. Os traços seguem a mesma identificação usada anteriormente. São abordadas as propriedades mecânicas, físicas, a identificação por imagem e as características da formação de produtos de cicatrização. Avaliam-se ainda os tipos de cura e de exposição empregados, assim como, os valores de cicatrização potencial e média.

5.5.1 Resistência mecânica à compressão

Para facilitar a análise comparativa dos valores obtidos de resistência mecânica à compressão, tem-se, na Figura 176, os valores potenciais para cada composição e idade de análise. Cada um dos grupos de traços está sendo apresentado com um gradiente de cor para facilitar sua análise de acordo com o mecanismo de autocicatrização adotado. Ainda, os resultados são sempre apresentados em triplicata por traço, tratando-se das análises aos 7, 28 e 84 dias, respectivamente. A linha horizontal representa o valor do traço tido como referência aos 28 dias.

Figura 176 – Valores potenciais de resistência à compressão (MPa)



Como é possível perceber através da Figura 176, os maiores alcances de resistência potencial aos 28 dias foram viabilizados pelas composições CC360 e PS7.5 e PS15. Em relação ao CC, percebe-se relação linear entre o consumo e a f_c , tanto pela hidratação do cimento quanto pelo empacotamento das partículas. (MEHTA, MONTEIRO, 2014).

Nas composições contendo CV, mesmo na idade de 84 dias, percebeu-se redução na f_c . Nochaiya, Wongkeo e Chaipanich (2010) afirmam que em teores de 10,20 e 30% de substituição de cimento por CV há relação inversamente proporcional com a resistência à compressão. Tal relação foi percebida nesse estudo nos teores de 15 e 30%. Além disso, a redução é maior ao analisar idades de até 28 dias, concordando com Aggarwal et al., (2010). A SA aumentou a resistência à compressão, devido à estimada finura do material e sua melhoria no empacotamento das partículas (DEMBPVISKA et al., 2017; KHAN, 2017), tendo apresentado, ainda, melhorias entre as idades de 28 e 84 dias.

Nas demais amostras, em decorrência do uso de PE, houve danos na f_c . Jedidi, Benjeddou e Soussi (2015) afirmam que os danos maiores à resistência ocorrem com teores de PE superiores à 40%, de fato, a maior redução nessa pesquisa foi 26%, considerando 30% de uso de PE quando do uso de SQ. Se por um lado há danos à f_c , por outro, a cápsula não pode ter rigidez elevada pois precisa romper para liberação

do agente de regeneração (GUPTA; KUA, 2016; MAULUDIN; OUCIF; 2018; WHITE et al., 2011). Comparando os procedimentos para impregnar os grãos de PE com as SQ e SB, obtiveram-se valores inferiores de resistência ao adotar o procedimento com o vácuo em relação à imersão, com exceção da composição SBV20.

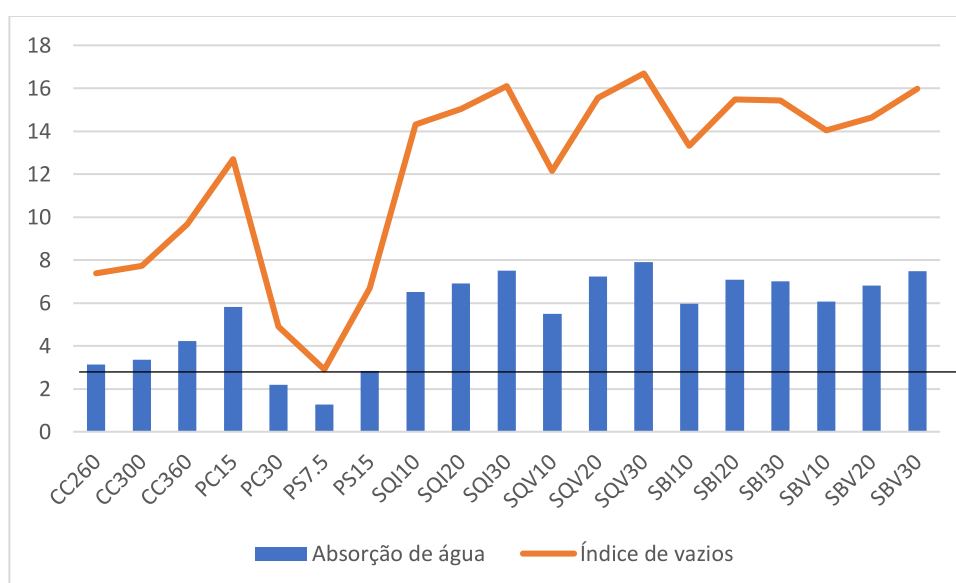
Cabe ser destacada a estimativa presente em bibliografia de que o uso de SB aumenta a resistência mecânica à compressão (KALHORI; BAGHERPOUR, 2017; NAIN et al., 2019; REEDY et al, 2010), sendo que, nesse estudo, não se verificou tal acréscimo em função do efeito predominante de redução causado pelo uso de PE.

Considerando que a composição CC300 foi a referência para os demais traços, percebe-se que, em relação à resistência aos 28 dias, apenas três composições aumentaram a resistência à compressão, sendo a PS7.5, PS15 e SQI10. Nas demais, os valores foram atenuados. Não foi uma unanimidade entre as amostras a relação entre o teor de uso de PE e a resistência obtida, tendo as composições apresentado variações.

5.5.2 Índices físicos

Em relação aos diferentes índices físicos, tem-se a sua apresentação através da Figura 177. Optou-se por apresentar a absorção de água e os índices de vazios. A linha horizontal facilita a análise comparativa com o traço referência (CC300).

Figura 177 – Absorção de água e índice de vazios das diferentes composições analisadas



Como é possível perceber, os únicos traços que proporcionaram menor absorção de água em relação ao CC300 foram a composição CC260- essa contrariando a expectativa decorrente do menor consumo de cimento-, e os traços PC30, PS7,5 e PS15. Nessas últimas composições apresentadas, era de se esperar que a utilização da pozolana reduzisse a absorção de água por promover melhor empacotamento das partículas e redução nos vazios (DEMBOVSKA et al., 2017; NOORUL; KHAN, 2017) .

Em termos dos índices físicos, percebeu-se maior absorção de água e índice de vazios nas amostras com o uso de PE em relação às demais amostras. Com exceção do conjunto de traços identificado como SBI, as demais composições com o uso de PE apresentaram relação proporcional entre teor de uso e valor de absorção de água. Por mais que a densidade da matriz seja um parâmetro de grande interesse para durabilidade do concreto, em termos de cicatrização, Chen, Chen e Tang (2020) citam que se a matriz apresenta elevada densidade, pode haver escassez do oxigênio para ocorrência da atividade microbiana.

5.5.3 Síntese das ocorrências de cicatrização

A Tabela 62 apresenta síntese em relação as ocorrências verificadas. A Figura 178 e a Figura 179 apresentam de modo gráfico o verificado em termos de potencial de cicatrização, indicando os valores médios e potenciais, respectivamente.

Tabela 62 – Síntese das ocorrências de cicatrização

Traço	Fiss.	e. Máx cicatrizada (mm)		e média dentre as cicatrizações (mm)		Nº de ocorrência de cicatrização						Nº Total	média de ocorr. por traço
		CC	CP	CC	CP	N		C		R			
						S	U	S	U	S	U		
CC260	CM	0,00	1,80	0,00	1,60	1	1	0	0	2	2	6	25,3
	ET	0,78	0,80	0,53	0,49	5	1	2	0	6	4	18	
CC300	CM	0,00	1,59	0,00	1,34	1	2	0	1	1	2	7	
	ET	0,83	1,20	0,68	0,58	5	1	1	0	5	4	16	
CC360	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	1	0	0	0	1	0	2	
	ET	0,87	1,52	0,59	0,83	5	4	1	1	7	9	27	
PC15	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	20,5
	ET	0,64	0,49	0,58	0,45	4	6	3	7	0	0	20	
PC30	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	1	0	0	0	0	0	1	
	ET	0,60	0,00	0,53	0,00	3	0	1	0	3	3	10	
PS7.5	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	
	ET	0,44	0,59	0,40	0,37	3	2	0	0	5	4	14	
PS15	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	
	ET	0,50	0,70	0,31	0,37	7	8	5	2	11	4	37	
SQI10	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	44,0
	ET	1,12	0,50	0,50	0,34	9	7	5	8	8	9	46	
SQI20	CM	1,48	0,00	1,48	0,00	0	1	0	0	0	0	1	
	ET	0,60	0,55	0,33	0,37	7	8	12	7	7	6	47	
SQI30	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	
	ET	0,81	0,72	0,48	0,46	7	8	0	6	9	9	39	
SQV 10	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	2	0	2	
	ET	0,98	0,66	0,59	0,54	9	7	4	4	7	6	37	
SQV 20	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	
	ET	0,85	0,66	0,55	0,36	8	9	4	6	10	9	46	
SQV 30	CM	0,00	1,66	0,00	1,66	0	0	1	1	0	0	2	
	ET	1,16	0,72	0,48	0,53	6	6	11	8	6	7	44	
SBI10	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	49,7
	ET	1,67	0,69	0,57	0,44	9	6	10	9	9	9	52	
SBI20	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	
	ET	0,91	0,55	0,58	0,47	7	9	10	7	9	9	51	
SBI30	CM	1,52	0,00	1,48	0,00	0	0	1	1	0	0	2	
	ET	0,66	0,43	0,43	0,43	10	6	11	11	8	9	55	
SBV10	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	
	ET	0,75	0,52	0,44	0,41	6	8	6	5	8	3	36	
SBV20	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	
	ET	0,85	0,26	0,55	0,26	8	6	3	4	9	9	39	
SBV30	CM	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	
	ET	1,05	0	0,52	0	11	9	11	10	12	10	63	
Valores totais						133	115	102	98	145	127	720	

Legenda: CC: Consumo de cimento; PC: traços com cinza volante; PS: traços com sílica ativa; SQI: solução química impregnada por imersão; SQV: solução química impregnada por vácuo; SBI: solução bacteriana impregnada por imersão; SBV: solução bacteriana impregnada por vácuo; CM: fissura causada por corte mecânico; ET: fissura pelo ensaio de tração; CC: cicatrização contínua; CP: cicatrização pontual; N: névoa salina; R: referência; C: carbonatação; CS: cura submersa; CU: cura úmida.

A Tabela 62 objetiva apresentar em termos numéricos as ocorrências de cicatrização verificadas. É importante destacar que nessa tabela são inclusos os registros conforme apresentado a cada composição, e assim, os casos em que houve formação de PBE e PBI também são apresentados, não sendo especificamente pontos de CC ou CP.

Em relação a essa análise numérica, foram percebidas 24 registros no traço CC260, 23 no CC300 e 29 no CC360. Com tais números, o valor médio entre os três traços de 25,3. O maior CC foi favorável em termos do número de ocorrências, não sendo linear esse crescimento no traço de consumo intermediário. Huang e Ye (2012) e Gupta e Kua (2016) citam que quanto maior o CC maior o potencial de cicatrização, indicando assim o motivo de ter-se alto potencial em matrizes de compósitos cimentícios avançados.

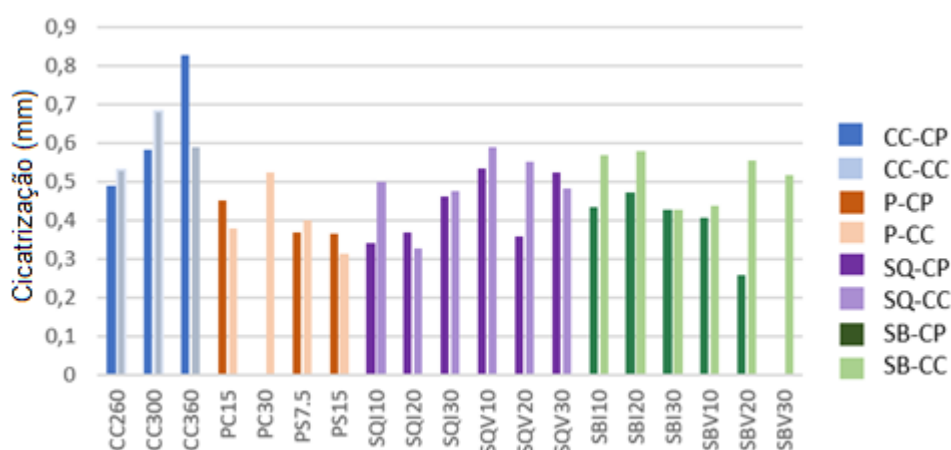
Nas amostras contendo soluções pozolânicas, foram 20 eventos na composição PC15, 11 na PC30, 14 na PS7.5 e 37 no traço PS15. O valor médio obtido entre as 4 composições desse grupo foi de 20,5 ocorrências. Nota-se, no entanto, que mesmo com esse menor número, a amostra com melhor desempenho até o momento foi a PS15. Kaul et al., (2018) de fato afirmam que o teor ótimo de utilização da SA está entre 10 e 15%, concordando com o obtido.

Em relação ao uso de SQ, tanto nos traços com agregados encapsulados à vácuo quanto nos tratados por imersão não houve relação linear entre o percentual de perlita e o número de ocorrências. Considerando as amostras tratadas por imersão, os valores foram de 46, 48 e 39 para os percentuais de 10, 20 e 30%, por exemplo. No que tange ao tratamento por vácuo os valores foram de 39, 46 e 46, resultando em um valor médio de 44 ocorrências por traço, superior portanto ao consumo de cimento e ao uso de pozolanas. Li et al., (2019) citam a superioridade do Na_2SiO_3 ao comparar-se com outros elementos químicos, apontando por exemplo para a fácil dissolução do produto em água, o que facilita a sua ativação. Ainda segundo os autores, na hidratação do cimento, pode se formar etringita ao redor das partículas de cimento anidro, o que impedirá sua hidratação secundária, sendo vantajoso o uso de produtos químicos que possam reagir com os produtos de hidratação formando novos cristais que preencham as fissuras.

No tocante ao uso de SB, foram percebidas 52, 51 e 57 ocorrências, nos traços com encapsulamento de *B subtilis* em PE por imersão, para os percentuais de 10,20 e 30%, respectivamente. Ao analisar a impregnação por vácuo, para esses três teores

citados os valores foram de 36, 39 e 63 ocorrências. Notou-se comportamento díspar, uma vez que com o uso de imersão os valores foram próximos, sendo que no uso de vácuo, obteve-se um valor até 75% superior no número de ocorrências. Por fim, a média entre essas composições foi de 49,6 ocorrências por traço, a maior nesse estudo. De acordo com Zhang et al., (2016a), a presença de SB em um ambiente torna ele favorável para a formação de CaCO_3 , o que ocorre de modo ainda mais intenso quando adicionada fonte de cálcio, como o lactato de cálcio (SCHWANTES-CEZARIO et al., 2017; SHIVAM et al., 2017). Como citado, tem-se a seguir a representação gráfica das cicatrizações médias e potenciais.

Figura 178 – Valores médios dos diferentes tipos de cicatrização em cada traço



Como é possível perceber, inicialmente em relação aos traços com CC, os valores de cicatrização média foram elevados, o que se relaciona com os pontos aparentemente discrepantes verificados como valores potencial, somado à ocorrência de poucos fenômenos de cicatrização. Como apresentará a Figura 179, chegou a ser verificada uma cicatrização de espessura superior a 1,6mm, no traço CC360 e 1,2mm no traço CC300, o que acabou por apontar valores médios elevados. Percebe-se ao analisar a CP que houve relação proporcional entre o consumo de cimento e a espessura cicatrizada, o que não foi verificado ao analisar a ocorrência de CC.

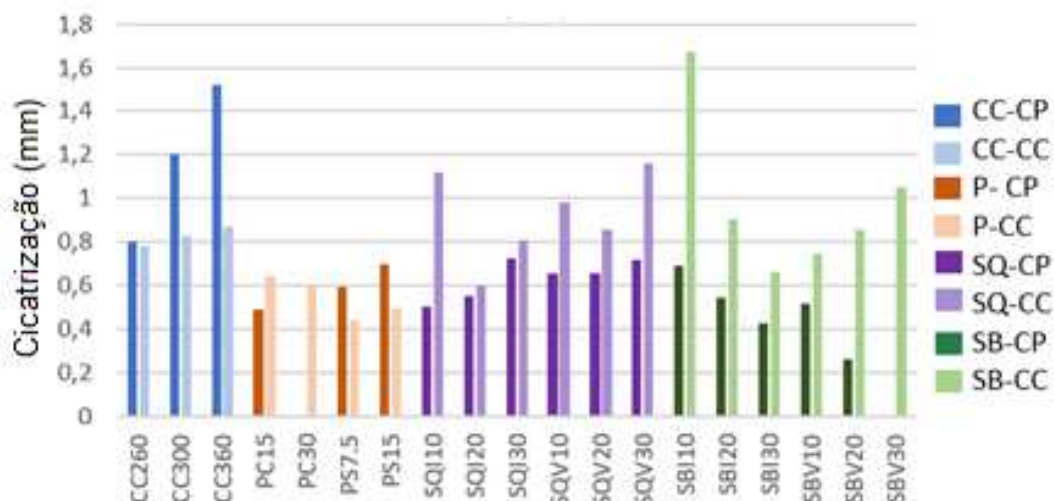
Em relação ao uso de pozolanas, observando-se os valores médios, atribui-se maior eficácia ao uso de CV, o que se inverte quanto analisados os valores potenciais. Considerando os valores da Figura 178, nota-se que há cicatrização média acima de 0,3mm para todos os traços contendo pozolana. Qureshi, Kanellopoulos e Al-tabbaa (2019) citam o valor de 0,5mm para adições pozolânicas. Notou-se comportamento

inferior às amostras contendo CC, o que é contraposto quando observado o número de eventos de formação de produtos.

No que concerne a utilização de SQ, nos dois procedimentos se notou a maior cicatrização do tipo CC quando utilizado 10% de PE sendo os valores de aproximadamente 0,5 mm e 0,6 mm para os traços por imersão e vácuo, respectivamente. Para a ocorrência de CP esse comportamento não foi verificado. Em relação a tais amostras, cabe destacar que por vezes a espessura da cicatrização superou a abertura da fissura, ao apresentar escorrimento, com acúmulo superficial (GIANNAROS; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; LI et al., 2019).

Em relação à utilização de SB houve aleatoriedade no comportamento, sem relação linear entre os percentuais, ou tendências alusivas ao tratamento dos agregados. Analisando a ocorrência de CC percebe-se que em todas as composições ela foi superior a 0,4mm. A bibliografia indica para potencial elevado de cicatrização quando usadas bactérias, em decorrência da capacidade de produção de calcita (MUHAMMAD et al., 2016; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018a; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018a; XU; WANG, 2018). Como já abordado, a calcita se forma por conversão bacteriana, uma vez que tem-se disponível a presença de um nutriente como fonte de cálcio. A Figura 179 apresenta os valores potenciais.

Figura 179 – Valores potenciais das diferentes ocorrências de cicatrização em cada composição



Tendo em vista o uso de cimento em termos potenciais, verificou-se tanto para CC quanto para CP uma linearidade entre o CC e a espessura cicatrizada. O valor de cicatrização referente ao CC chegou a ser superior a 1,5mm, destoando dos

valores apresentados em bibliografia já citados. Sangadji (2017) fala que considerando o consumo de cimento a limitação ocorre em fissuras inferiores a 0,2mm. Seifan et al., (2016) são mais abrangentes, indicando que a limitação em amostras cimentícias está entre 0,1 e 0,3mm, valores que diferem consideravelmente do potencial nesse estudo.

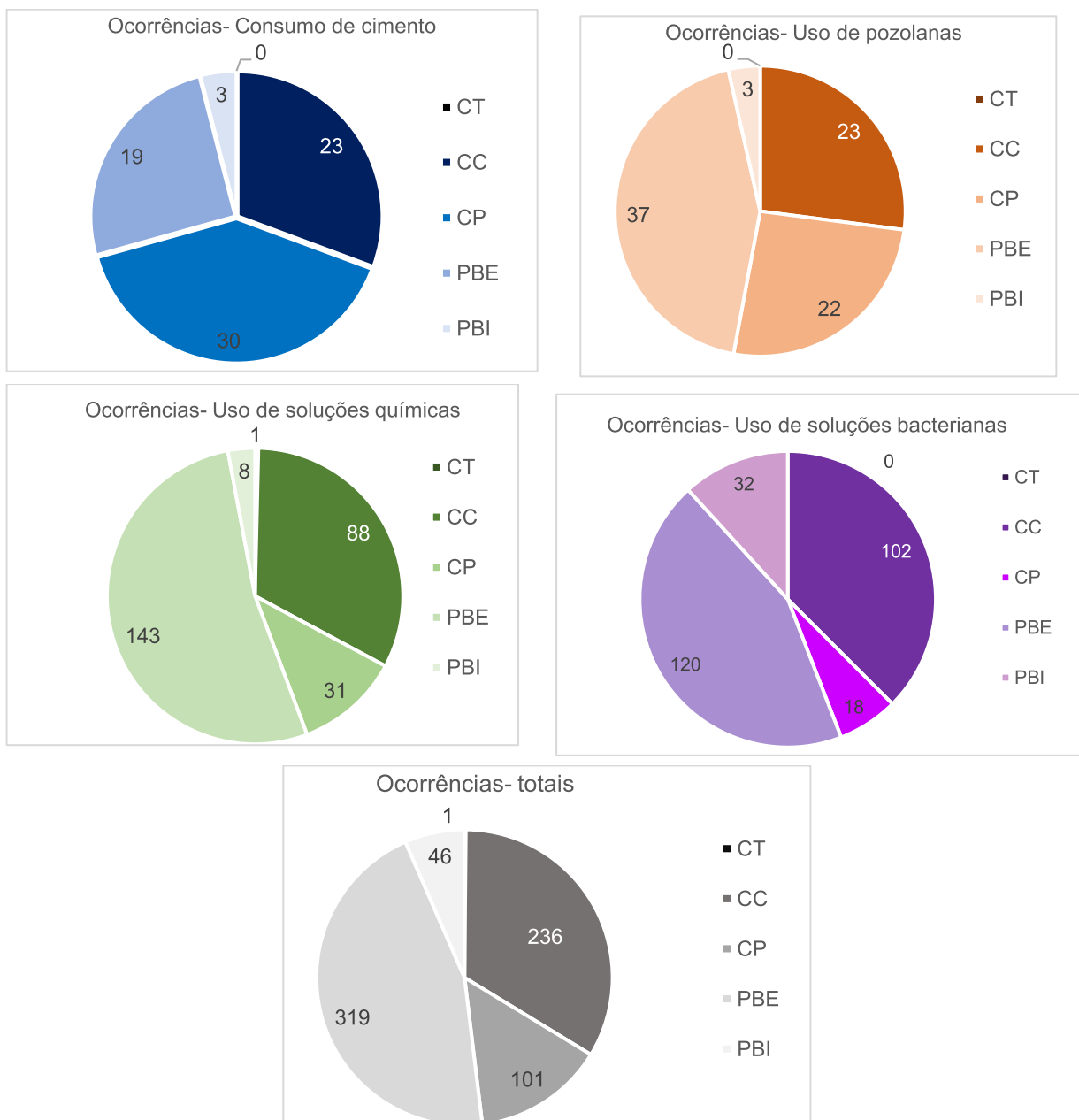
Ao analisar amostras com pozolanas, Ferrara et al., (2017) falam da limitação em fissuras inferiores a 0,2mm. Em termos potenciais, percebeu-se no presente estudo em todas as ocorrências a espessura superior a 0,4mm. Em relação as diferentes pozolanas na CV percebe-se maior espessura de fechamento, no entanto, ao observa-se o número de ocorrências há superioridade da SA. O uso de SA também tem a maior espessura entre as avaliadas, no formato de CP, com aproximadamente 0,7mm. Lakshimi e Anupriya (2019) compararam a utilização de SA e de SB, indicando que o mecanismo biológico obteve maior eficiência em termos de cicatrização, o que foi verificado nesse estudo em todas as composições. Wang et al., (2014) apontam para a cicatrização de até 0,97mm com a utilização de solução bacteriana e 0,250mm em amostras cimentícias, resultados que apresentam semelhança com o presente estudo. Wiktor e Jonkers (2011) apresentam a vantagem das bactérias pois há consumo de oxigênio, e assim, pode-se reduzir a possibilidade de ocorrência de corrosão em barras de aço imersas no concreto.

Em termos da limitação de cada método, deve-se destacar que existem aspectos de relevância além da composição dos concretos. Gupta e Kua (2016) trazem a idade da fissura como parâmetro de influência. Fan e Li (2015) indicam que há grande dependência da profundidade da fissura, além de sua abertura para a viabilidade da cicatrização. Há ainda a consideração de que a pressão de água no local tenha grande relação com a capacidade de cicatrização, tendo Mihashi e Nishiwaki (2012) afirmado que essa importância é superior à da própria composição do concreto. Mullem et al., (2019) citam que a geometria da fissura e a sua variação em termos de extensão são fatores decisivos para o desenvolvimento de produtos de cicatrização. De modo geral, os resultados obtidos no presente estudo apontam para valores superiores aos apontados pela bibliografia, como supraapresentado. Na mesma lógica de apresentação de Danish, Mosaberpanah; e Slim (2020), a Tabela 63 sintetiza os valores obtidos. Destaca-se que tais valores podem envolver *outliers*, e recomenda-se a observação dos registros, espessuras de fissuras e número de ocorrências. A distribuição dos tipos de ocorrência nos traços consta na Figura 180.

Tabela 63 – Espessura média e potencial de cada mecanismo

Mecanismo avaliado	Espessura máxima verificada	Espessura média verificada
Autógeno: Cimento	1,8 mm	0,83 mm
Autógeno: Pozolanas	0,64 mm	0,43 mm
Autogênico: Sol. Química	1,66 mm	0,64 mm
Autogênico: Sol. Biológica	1,67 mm	0,60 mm

Figura 180 – Tipos de ocorrências de cicatrização em cada grupo de composições



Algumas considerações podem ser feitas em relação ao apresentado:

- a) nota-se, em diversas composições, que há presença importante de PBE e PBI, sendo essas as primeiras ocorrências de cicatrização. Em alguns casos, percebeu-se nesse estudo a evolução de PBE para CC, em outros, houve a estagnação com apenas a formação na parede das fissuras, o que pode decorrer da disponibilidade do produto de cicatrização, de fissuras de espessuras superiores ao potencial pelos métodos ou da disposição de água, entre outros. Destaca-se que o único conjunto de traços que não teve a PBE como ocorrência majoritário foi o de CC, que apresentou a cicatrização pontual como principal fato;
- b) ao longo dessa pesquisa, apenas uma amostra apresentou o evento classificado como CT, sendo essa pertencente ao grupo com a utilização de SQ;
- c) discorrendo sobre o formato com que o produto se manifestou, é possível perceber que nas amostras alusivas ao cimento e ao uso de pozolanas houve presença majoritária da soma CC+CP em relação à PBI+PBE. Nas amostras com as soluções químicas e bacterianas, no entanto, há uma inversão, tendo ocorrência predominante de PBI e PBE. Esse fato pode decorrer da disponibilidade dos agregados que atuem liberado o agente de cicatrização em mais de um ponto, permitindo assim a cicatrização e a formação em maior ocorrência na abertura da fissura. Ao observar o valor total, proporcionado pelos 4 mecanismos avaliados, tem-se 365 ocorrências nas paredes e 337 ao longo da fissura;

Considerando o que foi obtido, pode-se supor que as amostras com a utilização de cápsulas, sendo no presente estudo os agregados de PE, podem exigir um maior teor de utilização de modo que haja produto de cicatrização em quantidade suficiente (GUPTA; KUA, 2016; WU et al, 2012), permitindo que ocorra a cicatrização efetiva, o que de fato pode proporcionar maior durabilidade no concreto (GARDNER et al., 2018).

Não foi percebida relação entre a verificação de cicatrização apenas na borda ou de modo efetivo com a espessura da fissura, mesmo sendo esse ponto de grande relevância em algumas amostras (FAN; LI, 2015). Nota-se os dois fatores variáveis que parecem ter o maior impacto: distribuição da PE e espessura da fissura, ambos não controlados na presente pesquisa.

Cabe ser pontuada a hipótese sobre a idade em que cada formação de produto foi identificada, contemplando nesse estudo a idade de até 84 dias após fissuração (realizada aos 28 dias). Assim, as idades de análise foram de até 112 dias para amostras do grupo de referência, 140 dias para as expostas à névoa salina e de 168 dias para o grupo exposto à carbonatação, em decorrência de cada procedimento. Destaca-se que é pouco provável que após esse período algum produto se formaria (KHALIQ; EHSAN, 2016; MANOJ PRABAHAR et al., 2017; TZIVILOGLOU et al., 2016).

5.5.4 Análise das ocorrências em relação aos ambientes acelerados de exposição

Em relação ao apresentado na Tabela 85 destaca-se que foram percebidas 272 ocorrências de cicatrização no grupo de referência, sendo seguido por 248 no grupo submetido à névoa salina, e por fim, 200 no conjunto de amostras expostas à carbonatação acelerada. Ao analisar-se como a distribuição ocorreu em cada um dos mecanismos, é possível propor a Tabela 64 como síntese.

Tabela 64 – Percentual de ocorrências em cada tipo de exposição

Mecanismo avaliado	% das ocorrências em amostras expostas à névoa salina	% das ocorrências em amostras expostas à carbonatação acelerada	% das ocorrências em amostras do grupo de referência
CC	35,51	7,89	56,57
P	41,46	21,95	36,58
SQ	34,84	29,17	35,98
SB	31,88	33,22	34,90

Como é possível divisar pela referida Tabela, nas amostras referentes ao CC apenas 7,89% das ocorrências se deram em amostras submetidas à carbonatação acelerada. Sobre esse ponto, supõem-se que tenha ocorrido a carbonatação do CH formando CaCO_3 , não restando em teor suficiente para reagir e ainda, que não houve a reação para a formação de C-S-H secundário.

Ainda em relação à amostras com CC, pode-se citar que Palin, Jonkers e Wiktor (2013) submergiram amostras de argamassa em água salgada artificial e perceberam potencial de cicatrização de até 0,2mm, incluindo a redução de permeabilidade dos corpos de prova também. Percebeu-se então, assim como nesse estudo que a

presença de sal não afetou o desenvolvimento dos produtos de cicatrização, sendo responsáveis no presente estudo por 35,51% das ocorrências. Por mais que tenham havido registros nos grupos expostos à agentes de deterioração o percentual de ocorrência foi superior no grupo de referência.

Avaliando o grupo de amostras submetidas à carbonatação e considerando o uso de pozolanas percebe-se que o percentual se elevou, porém, sendo ainda o menor entre os três tipos de exposição. Em relação as pozolanas, Yildirim et al., (2018) avaliaram diferentes mecanismos de cura, incluindo a cura submersa e a cura ao ar, e ambas as possibilidades com concentração de CO₂. Os autores perceberam que a cicatrização foi mais efetiva na cura submersa contendo CO₂. Até 28 dias, nesse estudo, percebeu-se 0,458mm de cicatrização. Sobre as amostras com pozolanas cabe ainda pontuar que as ocorrências se concentraram majoritariamente nas amostras submetidas à névoa salina.

Uma distribuição mais uniforme entre as ocorrências nas três exposições foi percebida nas amostras contendo SQ e SB, tendo sido ligeiramente superior nas amostras do grupo de referência.

Ramachandran, Ramakrishnan, e Bang (2001) citam que ao analisar bactérias do tipo B Pausturi a presença de íons cloreto impactou para o desenvolvimento da resistência e da atividade microbiana, o que foi contraposto nesse estudo, ao terem sido percebidas 95 ocorrências em amostras com solução bacteriana exposta à névoa salina.

Outro ponto a ser destacado em relação aos mecanismos autogênicos, é que a exposição à carbonatação acelerada não prejudicou a formação de produtos de cicatrização, ocorrendo em maiores percentuais nesses últimos dois traços. Seifan et al., (2016) já haviam citado que o uso de soluções bacterianas apresenta comportamento satisfatório nos ambientes contendo CO₂ e Cl⁻. Lee e Park (2018) citam que a solução bacteriana se desenvolve bem em água salgada, o que foi percebido nesse estudo. Palin, Wiktor e Jonkers (2013) indicam a superioridade, por exemplo, ao curar-se amostras em água salgada. Em termos de CO₂, tem-se que a própria bactéria converte o material em calcita, proporcionando a formação dos cristais (SEIFAN et al., 2016).

Em uma amostra contendo SQ, submetida ao corte e exposta em câmara de névoa salina, houve formação densa de produto de cicatrização sendo uma das

hipóteses o depósito de cristais de NaCl, além da reação esperada pelo uso de Na_2SiO_3 (GIANNAROS; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016)

Além dos ensaios utilizados nesse estudo de aceleração da deterioração do concreto, estima-se que a própria matriz de concreto possa ser um ambiente agressivo para o desenvolvimento das bactérias, no entanto, não foram percebidas alterações na faixa de pH avaliada, que envolve amostras em névoa salina e amostras já carbonatadas, além da matriz convencional. Notou-se que a bactéria *B. Subtilis* AP 91 tem potencial de cicatrizar matrizes cimentícias nas condições abrangidas nesse programa experimental assim como nos demais estudos nacionais (SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018a, 2019; SCHWANTES-CEZARIO; NOGUEIRA; TORALLES, 2017).

5.5.5 Análise das ocorrências em relação aos procedimentos empregados de cura

De modo análogo ao apresentado para os diferentes tipos de exposição, sintetiza-se através da Tabela 65 a distribuição das ocorrências em relação ao tipo de cura empregada no estudo.

Tabela 65 – Distribuição percentual das ocorrências em relação ao tipo de cura

Mecanismo avaliado	Percentual de ocorrências %	
	CS	CU
CC	58%	42%
P	56%	44%
SQ	50%	50%
SB	53%	47%

Como aponta a Tabela 65, em todos os mecanismos avaliados a distribuição se deu de modo semelhante entre os dois tipos de cura empregados. Nas composições referentes ao CC e a P nota-se uma preponderância maior da CS. Concordando com o apresentando, Sahmaran et al., (2013), citam que em amostras contendo pozolanas, perceberam que há vantagem na exposição contínua à água, por submersão. Luo, Qian e Li (2015) também corroboram com o apresentando, afirmando que após a CS, a melhor opção seria de ciclos de molhagem secagem, e por fim, em termos de eficiência, seria a CU.

Em termos da utilização de SB, Tziviloglou et al., (2016) também citam a superioridade de eficácia quando utilizada CS, afirmando no entanto, que nas fases

secas dos ciclos de molhagem e secagem percebe-se aspecto favorável para o desenvolvimento das bactérias e a biomineralização. Zhang et al., (2016) complementam, informando que na CS tem-se o fornecimento contínuo de O₂, necessário para a atuação bacteriana.

Al- Tabbaa et al., (2019) alertam um possível dano relacionado à presença de água, que poderia atuar em superfície lavando os componentes formados pelos mecanismos de cicatrização. Sahmaran et al., (2014) indicam que sem a garantia da presença constante da água a ocorrência predominante pode ser apenas de PBE e PBI sem a hidratação necessária para viabilizar a cicatrização.

A cura úmida empregada nesse estudo é trazida como uma possibilidade de menor desempenho por autores como Luo, Qian e Li (2015), todavia, seu comportamento foi satisfatório no presente estudo. A cura ao ar não foi avaliada nessa pesquisa, por ser tratada na bibliografia como incapaz de produzir produtos de cicatrização. Şahmaran et al., (2014) falam que nessa condição a cicatrização poderia ser apenas de fissuras de até 0,01mm.

Complementando a análise realizada, cabe não apenas verificar o número de ocorrências totais, mas sim, perceber qual o nível com que ocorreram em cada tipo de cura. Assim sendo, a Tabela 66 apresenta essa diferenciação, avaliando apenas a cicatrização efetiva.

Tabela 66 – Distribuição das ocorrências de CC e CP nas curas CU e CS

Tipo de cura Tipo de cicatrização	CS		Nºtotal de ocorrências e %	CU		Nºtotal de ocorrências e %
	CC	CP		CC	CP	
CC	9	19	28 (52,8%)	13	12	25 (47,2%)
P	11	9	20 (46,5%)	17	6	23 (53,5%)
SQI	38	18	56 (47,9%)	49	12	61 (52,1%)
SBI	67	9	76 (63,3%)	35	9	44 (36,7%)

Em relação aos percentuais verificados, notou-se que avaliando todas as ocorrências (Tabela 65) tem-se o maior percentual atribuído a CS, nas composições avaliando o CC e P. Analisando apenas as cicatrizações (CC e CP, na Tabela 66), tem-se que no CC continua-se com a superioridade de CS, porém, nas amostras P tem-se registro ligeiramente superior na CU. Para o uso de SQ o percentual é semelhante, sendo também um bocado superior para CU. Considerando a utilização de SB, no entanto, é onde encontra-se a maior diferença percentual dessa pesquisa

em relação aos tipos de cura, tendo sido 63,3% verificado na CS, confirmando a expectativa trazida em bibliografia.

O resultado favorável obtido em relação à CU, é um indício positivo de que a cicatrização possa ser aplicada não apenas em estruturas submersas, e sim, naquelas em ambientes externos, o que pode depender da umidade relativa do ar e dos ciclos de molhagem e secagem promovidos pela presença da chuva. Cabe análise aprofundada relacionada a esse parâmetro, pois como citam Li e Herbet (2012) há complexidade em simular-se a exposição real das estruturas para análise de viabilidade dos mecanismos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentam-se nesse capítulo as conclusões possibilitadas pelo desenvolvimento dessa pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

As conclusões obtidas no presente estudo são apresentadas em relação ao objetivo específico correspondente, conforme segue:

- Em relação ao objetivo específico **A** de quantificar as fissuras cicatrizadas em cada método e tipo de ocorrência

Em termos de cicatrização média e da ocorrência de CC, percebeu-se em todas as composições analisadas a cicatrização superou a marca de 0,3 mm, estando a frente de diversos estudos, como citado ao longo desse trabalho. O grupo relacionado à composição que apresentou o menor desempenho em termos de cicatrização foi o com a utilização de pozolanas. O consumo de cimento, por sua vez, foi o grupo no qual as amostras apresentaram o maior desempenho, chegando a uma CP média de 0,8mm, no traço CC360. O maior valor de CC também pertence ao grupo referente ao cimento.

Entre as amostras com utilização de soluções químicas e bacterianas, nos diversos traços, cabe destacar que alcançou-se como maior valor de CC média valores próximos a 0,6mm. Ainda sobre tais corpos de prova, é pertinente apontar que apenas nas amostras de soluções químicas encapsuladas por imersão, houve relação linear entre a CP verificada e o teor empregado de PE impregnada.

Considerando os valores potenciais das ocorrências de CC e CP, verificou-se novamente um desempenho muito superior ao retratado em bibliografia nas amostras cimentícias, que apresentaram os maiores valores de CP. Em termos de maior cicatrização contínua, atribui-se esse valor a amostra SBI10, com CC superior a 1,6mm.

Em relação ao uso de pozolanas, que foi o conjunto que obteve o menor desempenho, vislumbrou-se valores de pelo menos 0,4 mm. Entre o uso de SA e CV, as amostras contendo SA foram superiores no que tange ao número de ocorrências de cicatrização, com 51 eventos contra 31 na CV. Em termos de espessura de

cicatrização do tipo CC, no entanto, a CV desempenhou valores potenciais superiores, chegando a 0,6mm.

Diante da utilização de SQ para a ocorrência de CP, tanto em amostras por imersão como à vácuo, percebeu-se relação linear entre o percentual de uso de PE e a cicatrização mensurada, o que não ocorreu em relação à CC.

Nos traços contendo SB o comportamento em termos de valores potenciais foi divergente em relação aos procedimentos de tratamento dos agregados. Nas amostras encapsuladas por imersão, percebeu-se relação inversamente proporcional entre o teor de uso de PE e a cicatrização verificada. Nas amostras com aplicação de vácuo, essa relação se deu de modo linear para a ocorrência de CC, e aleatória para ocorrência de CP. A Tabela 63 sintetizou os valores relacionados a cada mecanismo.

- O objetivo específico **B** visava a análise do mecanismo para a formação de fissura, sobre tal, percebeu-se que:

A formação de produto de cicatrização tem ocorrência dependente do aspecto da parede interna das fissuras, e assim, a grande maioria das amostras submetidas ao corte não obteve êxito na cicatrização. Foram pautadas ainda hipóteses referentes a maior espessura das fissuras (superiores a 1mm em todos os casos), envolvendo a dificuldade na permanência da água nessas aberturas (quando em CU). Além disso, a maior espessura pode não ter sido cicatrizada pela não disponibilidade de produtos de cicatrização em teor suficiente.

Considerando as amostras cuja fissura foi formada pelo ensaio de tração na flexão, percebeu-se que houve variação nas aberturas causadas, em decorrência da sensibilidade do ensaio, de alterações nas matrizes e da própria variação entre as amostras de uma mesma composição. No presente estudo, a análise foi conduzida nas FP e FS, permitindo avaliar diferentes dimensões em uma amostra de mesma composição.

Ainda em relação ao mecanismo de formação de fissura, é pertinente pontuar que pelo ensaio de tração na flexão as fissuras foram vistas nas 4 faces das amostras, e por vezes, uma mesma amostra apresentou cicatrização e outra não, o que pode corroborar com a hipótese da distribuição da PE nos traços contendo SQ e SB como ponto de fundamental importância para efetivação da cicatrização.

- No que tange ao objetivo específico **C**, referente a análise dos tipos diferentes de cura, verificou-se que:

Houve distribuição muito semelhante ao analisar o número de ocorrências em CS e CU. Nas amostras contendo SQ o número chegou a ser igual entre os dois métodos ao considerar-se todos os tipos de registros. Para as demais composições, houve uma leve superioridade nas amostras submetidas à CS. Cabe aqui destacar, que estão sendo analisadas todas as ocorrências nesse ponto.

Analisando apenas a ocorrência de CC e CP, a CU mostrou-se superior nos traços contendo P e SQ. A maior diferença em termos dos percentuais se deu nos traços contendo SB, quando o percentual foi de 63,3% das ocorrências em CS. A expectativa trazida pela bibliografia foi confirmada nesse ponto, uma vez que as SB dependem da presença constante de água e de oxigênio para seu desenvolvimento.

- Em relação ao objetivo específico **D**, que visava verificar a cicatrização após a exposição em câmaras de agressão, vislumbrou-se que:

Os traços contendo CC e P se mostraram mais sensíveis à agressão por carbonatação acelerada, tendo as amostras desse grupo experimental apresentado reduzido percentual de ocorrências de cicatrização. Atribui-se esse comportamento à reduzida disponibilidade de CH para formação de produtos secundários de hidratação, uma vez que estes podem ter sido consumidos para formação de CaCO_3 . Não pareceu haver qualquer tipo de dano quando da submissão das amostras de todos os traços em exposição à névoa salina. Houve amostras, inclusive, que apresentaram maior densidade aparente do produto de cicatrização após terem sido expostas à névoa. O menor dos teores desse grupo de amostras exposto à névoa salina em termos de ocorrências de cicatrização é o de SB tendo sido também, os concretos com o uso de *B subtilis* os que menos foram impactados pela ocorrência de carbonatação.

- O objetivo específico E era alusivo à realização de ensaios químicos para identificação dos produtos formados na cicatrização, e sobre isso cabe pontuar que:

Nas amostras contendo CC, observou-se pela técnica de DRX a presença de CaCO_3 , C-S-H e C-A-S-H. Em termos da verificação pela MEV, foram verificados cristais sobrepastos em formatos de lâminas.

Nas amostras contendo pozolanas, percebeu-se além dos produtos citados de CaCO_3 , C-S-H e C-A-S-H a ocorrência de produtos específicos de composição das pozolanas, tais como SiO_2 e Al_2O_3 . Na verificação microscópica dessas composições

foi notado o formato de sobreposição de cristais, de modo mais expressivo do que nas amostras contendo cimento.

Nas amostras contendo soluções químicas foi identificada a presença de CaCO_3 , C-S-H, SiO_2 e CaO. Vislumbrou-se ainda a presença de $\text{CaFe}_5\text{AlO}_9$ (óxido de ferro e cálcio) e metassilicato de cálcio (CaSiO_3).

Em termos do aspecto visual obtido na microscopia, as figuras apontaram para a distribuição de produtos de formato lamelar e acumulados sobre a superfície. Foi possível perceber sua concentração em pontos determinados da superfície avaliada, o que pode indicar concordância com a cicatrização pontual verificada em alguns trechos apenas.

Nos produtos formados pelas amostras contendo soluções bacterianas foi verificada a esperada presença de CaCO_3 , somada à presença de C-S-H e, SiO_2 , comum em todas matrizes cimentícias. Além disso, foram detectados dois componentes orgânicos, pertinentes em decorrência da presença dos microorganismos. O aspecto visual verificado notou-se novamente a sobreposição de lâminas, indicando a possível presença de calcita, mesclando-se com elementos de formato menos definido, que pode ser atribuído a presença de CaCO_3 e de C-S-H, verificados também nas demais técnicas.

Há concordância em todas as composições entre o percebido no DRX e no MEV, em relação aos elementos químicos diagnosticados pelo ensaio de FRX.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização dessa pesquisa e seu programa experimental, verificou-se oportunidades de melhoria e novas variáveis a serem analisadas, conforme se descreve:

- A) restringir a formação da fissura, de modo que diferentes composições possam ser analisadas mediante a mesma espessura de fissura, considerando, ainda, um mesmo aspecto de parede interna. Recomenda-se não utilizar a disposição de elementos no estado fresco ou corte, uma vez percebidos os danos causados por parede de aspecto liso, dificultando ou impedindo a fixação dos produtos de cicatrização;
- B) analisar a influência de ciclos de molhagem e secagem, uma vez que notou-se nesse estudo que há necessidade da presença de água, no entanto,

devendo ser considerados aspectos que aproximem a simulação em laboratório do verificado em campo. Pode ser analisada dessa forma a lacuna e a hipótese referente à fixação dos produtos depender do fluxo e da pressão de água incidindo na fissura;

- C) relacionando-se especificamente com o uso de soluções químicas e de soluções bacterianas, recomenda-se analisar o impacto e a viabilidade de aplicação quando inseridas diretamente na água de amassamento, minimizando os procedimentos necessários e retirando a influência do agregado leve nas propriedades do concreto e no que foi verificado em termos de disposição de produto;
- D) avaliar maiores teores de substituição dos agregados miúdos por agregados leves, verificando se em maiores teores haverá relação linear entre o percentual de uso e o potencial verificado de cicatrização e validando ainda, a teoria apresentada nesse estudo, sobre a disposição de PE e consequente viabilidade de cicatrização;
- E) analisar a utilização de outras soluções bacterianas verificando se há produção de calcita e produtos formados ao longo de fissuras;
- F) propor procedimentos comparativos de envoltória dos agregados leves, envolvendo outros materiais além do cimento, testando seu impacto na ocorrência da cicatrização;
- G) analisar comparativamente a utilização de lactato de cálcio e outros nutrientes para a solução bacteriana.

REFERÊNCIAS

- AAMER RAFIQUE BHUTTA, M. et al. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1243–1248, 2013.
- ABD ELATY, M. ABD ALLAH. Compressive strength prediction of Portland cement concrete with age using a new model. **HBRC Journal**, v. 10, n. 2, p. 145–155, 2014.
- ACHAL, V.; MUKERJEE, A.; SUDHAKARA REDDY, M. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1–5, 2013.
- ACHAL, V.; MUKHERJEE, A.; REDDY, M. S. Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 38, p. 1229–1234, 2011.
- ADAK, A. Self Healing Concrete. Jagannath University, Chaksu, Jaipur: 2015, 13p.
- AFIFUDIN, H. et al. Microbial participation in the formation of calcium silicate hydrated (CSH) from *Bacillus Subtilis*. **Procedia Engineering**, v. 20, p. 159–165, 2011.
- AGGARWAL, V. Concrete durability through High Volume Fly ash Concrete (HVFC) A Literature review. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v. 2, n. 9, p. 4473–4477, 2010.
- AHN, T.-H.; KISHI, T. Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 8, n. 2, p. 171–186, 2010.
- AL-GALAWI, N. M.; AL-TAMEEMI, A. A. H.; AL-JARRAH, S. H. Effect Of Age And Concrete Cover Thickness On Steel Reinforcement Corrosion At Splash Zone In Reinforced Concrete Hydraulic Structures. **International Journal of Scientific & Technology Research**, v. 5, n. 9, p. 129–133, 2016.
- AL-TABBAA, A. et al. First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 208, n. 2019, p. 669–685, 2019.
- ALAZHARI, M. et al. Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 610–619, 2018.
- ALGHAMRI, R.; KANELLOPOULOS, A.; AL-TABBAA, A. Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 910–921, 2016.
- ALSAYED, S. H.; AMJAD, M. A. Strength, Water Absorption and Porosity of Concrete Incorporating Natural and Crushed Aggregate. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 8, n. 1, p. 109–119, 1996.

ALSHALIF, A. F. et al. Isolation of Sulphate Reduction Bacteria (SRB) to Improve Compress Strength and Water Penetration of Bio-Concrete. **MATEC Web of Conferences**, v. 47, n. July, p. 01016, 2016.

ALYOUSIF, A. Self-Healing Capability of Engineered Cementitious Composites Incorporating Different Types of Pozzolanic Materials M.Sc., Eastern Mediterranean University, Northern Cyprus, Turkey 2010 B.Sc., Mosul University, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 533 R-11** - Guide for Precast Concrete Wall Panels- Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011. 52 p.

_____. **ACI 318-14**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014. 520 p.

_____. **ACI 224- 01**. Cracking of concrete members in direct tension. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2001, 46p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C618** (2012). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

AMMOUCHE, A. et al. Image analysis for the automated study of microcracks in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 2–3, p. 267–278, 2001.

ANJOS, M. A. S. et al. Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais. **Engenharia Civil**, v. 44, p. 41–58, 2012.

ANNEZA, L. H. et al. Identification of Bacteria and the Effect on Compressive Strength of Concrete. **MATEC Web of Conferences**, v. 47, n. July, p. 01008, 2016.

ARAÚJO, M. et al. Cross-linkable polyethers as healing/sealing agents for self-healing of cementitious materials. **Materials and Design**, v. 98, p. 215–222, 2016.

ARAÚJO, M. et al. Poly(methyl methacrylate) capsules as an alternative to the proof-of-concept” glass capsules used in self-healing concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 260–271, 2018.

ASOCRETO- Tecnología del Concreto- Materiales, Propiedades y diseño de mezclas. Vol 1- Chapter 3- Cemento Portland.p 19-46, Bogota, Colombia.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013. 71 p.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015. 9 p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. 238 p.

_____. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003. 6 p.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006. 8 p.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. 8 p.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3600**: Concrete structures. Sydney: Standards Australia Limited, 2009.

AZARSA, P.; GUPTA, R.; BIPARVA, A. Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, n. August 2018, p. 17–31, 2019.

BANG, S. S.; GALINAT, J. K.; RAMAKRISHNAN, V. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 28, p. 404–409, 2001.

BARBOSA, W.; PORTELLA, K. F. Síntese e caracterização das fases minerais C3S, C2S, C3A e C4AF para utilização em cimento tipo Portland. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, p. 54–62, 2019.

BARY, B.; SELIER, A. Coupled moisture - Carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 10, p. 1859–1872, 2004.

BEGLARIGALE, A. et al. Sodium silicate/polyurethane microcapsules used for self-healing in cementitious materials: Monomer optimization, characterization, and fracture behavior. **Construction and Building Materials**, v. 162, n. February, p. 57–64, 2018.

BENDIMERAD, A. Z.; ROZIÈRE, E.; LOUKILI, A. Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 733–745, 2016.

BHATT, A. et al. Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, p. e00263, 2019.

BOGAS, J. A.; MAURICIO, A.; PEREIRA, M. F. C. Microstructural analysis of iberian expanded clay aggregates. **Microscopy and Microanalysis**, v. 18, n. 5, p. 1190–1208, 2012.

BONIĆ, Z. et al. Damage of concrete and reinforcement of reinforced-concrete foundations caused by environmental effects. **Procedia Engineering**, v. 117, n. 1, p. 416–423, 2015.

BUREAU OF INDIAN STANDARD. IS 1343. Code of practice for prestressed concrete. May, 1980.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. IS 456: Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice. New Delhi: Bureau Of Indian Standards, 2000.

BUSBA, E. R. Effect of Localized Corrosion of Steel on Chloride- Induced Concrete Cover Cracking in Reinforced Concrete Structures. n. January, 2013.

CAPPELLESSO, V. Analysis of the crystalline waterproofing behavior in repairing analysis of the crystalline waterproofing behavior. In: 41st IAHS World Congress Sustainability and Innovation for the Future n. 2016.

CAPPELLESSO, V. et al. Self-healing approach on early age cracked concretes with smart admixture. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. September, p. 89–92, 2016.

CAPPELLESSO, V. G. et al. Self-Healing Phenomenon Evaluation in Cementitious Matrix with Different Water / Cement Ratios and Crack Opening Age. In: ICSHCCEA 2019: International Conference on Self-Healing Concrete in Civil Engineering Applications At: Tokyo, Japan v. 13, n. 3, p. 144–151, 2019.

CCAA (2002) Drying Shrinkage of Cement and Concrete. Cem Concr Aggregates Aust 1–6

Cemnet. Sítio eletrônico. World cement consumption rises by 2,8 in 2019. Disponível em: <https://www.cemnet.com/News/story/168163/world-cement-consumption-rises-by-2-8-in-2019.html>

CELADYN, W. Durability of Buildings and Sustainable Architecture. **Czasopismo Techniczne**, v. Architektu, n. 7 A (14), 2014.

CELADYN, W. Innovative Structural Systems. v. 1, n. International Scientific Workshops „Innovative Structural Systems in Architecture” (ISSA2016) November 3-5, 2016, Wrocław, Poland, 2016.

ÇELİK, B.; ÖZTURAN, T. Green Concrete Produced by Fly Ash and Silica Fume. **International Journal of Engineering Science and Application**, v. 1, n. 2, p. 1–6, 2017.

CHAHAL, N.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, A. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of concrete incorporating silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 645–651, 2012.

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

CHEMROUK, M. The deteriorations of reinforced concrete and the option of high performances reinforced concrete. In: The 5th international conference of Euro Asia Civil Engineering Forum- EACEF 5. Procedia Engineering 125, p 713-724, 2015.

- CHEN, C. et al. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 5, p. 478–485, 2010.
- CHOI, S. G. et al. Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation method. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 209–221, 2017.
- CHU, S. H. Effect of paste volume on fresh and hardened properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 284–294, 2019.
- CICLO VIVO- Natureza inspira soluções sustentáveis na construção civil- disponível em: <http://ciclovivo.com.br/arq-urb/arquitetura/natureza-inspira-solucoes-sustentaveis-na-construcao-civil/>, 2016, acessado em Maio de 2018.
- COELHO, N.A. Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa. Dissertação de Mestrado- Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2012.
- DANISH, A.; MOSABERPANAH, M. A.; SALIM, M. U. Past and present techniques of self-healing in cementitious materials: A critical review on efficiency of implemented treatments. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 6883–6899, 2020.
- DAVIES, R. et al. A Novel 2D Vascular Network in Cementitious Materials. **Concrete – Innovation and Design, fib Symposium, Copenhagen May 18-20, 2015 A**, p. 1–7, 2015.
- DE BELIE, N.; WANG, J. Bacteria-based repair and self-healing of concrete. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 5, n. 1, p. 35–56, 2015.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e preparação de amostras. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- DE KOSTER, S. A. L. et al. Geopolymer coating of bacteria-containing granules for use in self-healing concrete. **Procedia Engineering**, v. 102, p. 475–484, 2015.
- DE LARRARD, F. Concrete optimisation with regard to packing density and rheology. **3rd RILEM international symposium on rheology of cement suspensions such as fresh concrete**, p. 8, 2009.
- DE MUYNCK, W. et al. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p. 875–885, 2008.
- DEMBOVSKA, L. et al. Effect of Pozzolanic Additives on the Strength Development of High Performance Concrete. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 202–210, 2017a.
- DEMBOVSKA, L. et al. The use of different by-products in the production of lightweight alkali activated building materials. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 315–322, 2017b.

DEPAA, R. A. B.; FELIX KALA, T. Experimental Investigation of Self Healing Behavior of Concrete using Silica Fume and GGBFS as Mineral Admixtures. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 8, n. 36, 2015.

DI LUZIO, G.; FERRARA, L.; KRELANI, V. Numerical modeling of mechanical regain due to self-healing in cement based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 190–205, 2018.

DU, W. et al. Preparation and application of microcapsules containing toluene-di-isocyanate for self-healing of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 762–769, 2019.

EL-HAWARY, M.; NOUH, K. Properties and sustainability of concrete containing fillers*. **Australian Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 2, p. 96–105, 2018.

ERŞAN, Y. Ç.; DE BELIE, N.; BOON, N. Microbially induced CaCO_3 precipitation through denitrification: An optimization study in minimal nutrient environment. **Biochemical Engineering Journal**, v. 101, p. 108–118, 2015.

ESCOFFRES, P.; DESMETTRE, C.; CHARRON, J. P. Effect of a crystalline admixture on the self-healing capability of high-performance fiber reinforced concretes in service conditions. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 763–774, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1990: Eurocode - Basis of structural design. Brussels: European Committee For Standardization, 2000.

FAN, S.; LI, M. X-ray computed microtomography of threedimensional microcracks and self-healing in engineered cementitious composites. **Smart Materials and Structures**, v. 24, n. 1, 2015.

FEITEIRA, J. et al. Monitoring crack movement in polymer-based self-healing concrete through digital image correlation, acoustic emission analysis and SEM in-situ loading. **Materials and Design**, v. 115, p. 238–246, 2017.

FERRARA, L. et al. Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 115–142, 2018.

FORTIN D, FERRIS, FG, BEVERRIDGE TJ. Surface-mediated mineral development by bacteria. **Rev Mineral** 35, p.161–180, 1997,

FRANGOPOL, D.M; SABATINO, S; DONG, Y. (2016) Bridge life cycle performance and cost: analysis, prediction, optimization and decision making. In: Maintenance, monitoring- safety risk and resilience of bridges and bridge Networks. Bittencourt, Frangopol; Back. Taylor & Francis Group. London, ISBN 978-1-138-02851-7.

FRATZL, P. et al. Bio-inspiration from naturally healing tissues In: ICSHM 2013: Proceedings of the 4th International Conference on Self-Healing Materials, Ghent, Belgium, p8-10, June 2013.

Fédération internationale du béton, Bulletin 34 Model Code for Service Life Design ISBN 978-2-88394-074-1, (2006), 116p.

GIANNAROS, P.; KANELLOPOULOS, A.; AL-TABBAA, A. Sealing of cracks in cement using microencapsulated sodium silicate. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 8, 2016.

GOPI, V.; SHYAM CHAMBERLIN, K. Experimental investigation on strength and durability of concrete incorporated with silica fume and fly ash. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, v. 7, n. 6C2, p. 471–477, 2019.

GJØRV, Odd E. **Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2014

GRAEFF, Â. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. Title. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

GRUYAERT, E. et al. Activation of Pozzolanic and Latent-Hydraulic Reactions by Alkalis in Order to Repair Concrete Cracks. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, p. 04014208, 2014.

GUPTA; S; KUA, H.W. Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete. **J. Mater. Civ. Eng.**, 2016, 28(12): 1-15.

GUPTA, S.; PANG, S. D.; KUA, H. W. Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 419–428, 2017.

HAGER, M. D. et al. Self-healing materials. **Advanced Materials**, v. 22, n. 47, p. 5424–5430, 2010.

HAVLÁSEK, P. et al. Thermo-mechanical simulations of early-age concrete cracking with durability predictions. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 236, n. 1, 2017.

HE, J.; SHI, X. Developing an abiotic capsule-based self-healing system for cementitious materials: The state of knowledge. **Construction and Building Materials**, v. 156, n. September, p. 1096–1113, 2017.

HEARN, N. Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? **Materials and Structures**, v. 31, n. 8, p. 563–567, 1998.

HELENE, Paulo. **Os Principais Mecanismos de Deterioração que Prejudicam a Vida Útil da Estrutura**. Gramado: 55º Congresso Brasileiro do Concreto, 2013. Color.

HERBERT, E.; LI, V. Self-healing of engineered cementitious composites in the natural environment. ... **Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6**, p. 155–162, 2012.

HILLOULIN, B. et al. Monitoring of autogenous crack healing in cementitious materials by the nonlinear modulation of ultrasonic coda waves, 3D microscopy and X-ray microtomography. **Construction and Building Materials**, v. 123, n. February, p. 143–152, 2016a.

HILLOULIN, B. et al. Mechanical regains due to self-healing in cementitious materials: Experimental measurements and micro-mechanical model. **Cement and Concrete Research**, v. 80, p. 21–32, 2016b.

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

HU, Z. X. et al. Performance optimization of one-component polyurethane healing agent for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 151–159, 2018.

HUANG, H. et al. Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. **Materials and Design**, v. 92, p. 499–511, 2016.

HUANG, H.; YE, G. Simulation of self-healing by further hydration in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 460–467, 2012.

HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 71–81, 2013.

HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 60, p. 68–82, 2014.

HUNG, C. C.; SU, Y. F.; SU, Y. M. Mechanical properties and self-healing evaluation of strain-hardening cementitious composites with high volumes of hybrid pozzolan materials. **Composites Part B: Engineering**, v. 133, p. 15–25, 2018.

HUSEIEN, G. F.; SHAH, K. W.; SAM, A. R. M. Sustainability of nanomaterials based self-healing concrete: An all-inclusive insight. **Journal of Building Engineering**, v. 23, n. September 2018, p. 155–171, 2019.

IHEANYICHUKWU, C. G.; UMAR, S. A.; EKWUEME, P. C. A Review on Self-Healing Concrete Using Bacteria. **Sustainable Structures and Materials, An International Journal**, v. 1, n. 1, p. 12–20, 2018.

IMBABI, M. S.; CARRIGAN, C.; MCKENNA, S. Trends and developments in green cement and concrete technology. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 1, n. 2, p. 194–216, 2012.

IN, C. W. et al. Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound. **NDT and E International**, v. 57, n. July 2013, p. 36–44, 2013a.

IN, C. W. et al. Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound. **NDT and E International**, v. 57, p. 36–44, 2013b.

Ingenia. Self-healing concrete, 46 (2011), 3p.

INGRAHAM, J.L.; INGRAHAM, C.A. Introdução a microbiologia: uma abordagem baseada em estudos de caso. 3ª edição. Cengage Learning, São Paulo, 2010.

International Organization for Standardization ISO 1920-8. Testing of concrete — Part 8: Determination of drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory. Genebra, 2009.

JACOBSEN, S.; SELLEVOLD, E. J. Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 1, p. 55–62, 1996.

JEDIDI, M.; BENJEDDOU, O.; SOUSSI, C. Effect of expanded perlite aggregate dosage on properties of lightweight concrete. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 9, n. 3, p. 278–291, 2015.

JEFFERSON, A. et al. A new system for crack closure of cementitious materials using shrinkable polymers. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 5, p. 795–801, 2010.

JIANG, L. et al. Sugar-coated expanded perlite as a bacterial carrier for crack-healing concrete applications. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117222, 2020.

JONKERS, H. M. et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 2, p. 230–235, 2010.

JONKERS, H. M. Bacteria-based self-healing concrete. **Heron**, v. 56, n. 1–2, p. 5–16, 2011a.

JONKERS, H. M. Bacteria-based self-healing concrete. **Frankfurter Afrikanistische Blätter**, v. 8, n. 1, p. 49–79, 2011b.

JONKERS, H. M.; SCHLANGEN, E. Crack Repair By Concrete-Immobilized Bacteria. **Civil Engineering**, n. April, p. 1–7, 2007.

JONKERS, H. M.; THIJSEN, A. Bacteria Mediated Remediation of Concrete Structures. **2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure**, n. October, p. 833–840, 2010.

JONKERS, H.; SCHLANGEN, E. Development of a bacteria-based self healing concrete. **Tailor Made Concrete Structures**, p. 109–109, 2008.

JOSEPH, S.; SKIBSTED, J.; CIZER, Ö. A quantitative study of the C3A hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 115, n. June 2018, p. 145–159, 2019.

KALHORI, H.; BAGHERPOUR, R. Application of carbonate precipitating bacteria for improving properties and repairing cracks of shotcrete. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 249–260, 2017.

KHALIQ, W.; EHSAN, M. B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 349–357, 2016.

KHAN, M. U.; AHMAD, S.; AL-GAHTANI, H. J. Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete: An Overview on Chloride Diffusion and Prediction of Corrosion Initiation Time. **International Journal of Corrosion**, v. 2017, 2017.

KHOURY, G. A. Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. **Magazine of Concrete Research**, UK, v. 44, n. 161, p. 291-309, 1992.

KIM, M. J.; ANN, K. Y. Corrosion Risk of Reinforced Concrete Structure Arising from Internal and External Chloride. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, 2018.

KIM, S.-G.; WANG, K. Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement. **Civil engineering**, v. Master of, p. 125, 2010.

KISHIMOTO, I. Experimental Study on the Corrosion Condition of Steel Bars in Cracked Reinforced Concrete Specimen. In: International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants, Tokyo, 2010. **Proceedings of International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants**. Tokyo, 2010.

KLEMCZAK, B. A. Modeling thermal-shrinkage stresses in early age massive concrete structures - Comparative study of basic models. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 14, n. 4, p. 721–733, 2014.

KLEMCZAK, B.; KNOPPIK-WRÓBEL, A. Early Age Thermal and Shrinkage Cracks in Concrete Structures – Influence of Curing Conditions. v. c, n. June, p. 47–58, 2011.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B; PANARESE, W. C.; Design and Control of Concrete Mixtures, EB001, 14th edition, **Portland Cement Association**, Skokie, Illinois, USA, 2002, 358 pages.

KOUL et al. Effect of silica fumes on the compressive strength of concrete. In: International Journal of Engineering Research and management (IJERM), ISSN 2349-2058, Vol 5 (3), 2018

KRAMAR, D.; BINDIGANAVILE, V. Impact response of lightweight mortars containing expanded perlite. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, n. 1, p. 205–214, 2013.

KRISHNAPRIYA, S.; VENKATESH BABU, D. L.; G., P. A. Isolation and identification of bacteria to improve the strength of concrete. **Microbiological Research**, v. 174, p. 48–55, 2015.

KUMAR, B; TIKE, G.K; NANDA, P.K. Evaluation of properties of high-volume fly-ash concrete for pavements. *Journal of materials in civil engineering*, 2007, 19 (10): 906-911

KURIAKOSE, B.; RAO, B. N.; DODAGOUDAR, G. R. Early-age Temperature Distribution in a Massive Concrete Foundation. **Procedia Technology**, v. 25, n. Raerest, p. 107–114, 2016.

LACERDA, E. et al. Monitoring the carbonation front progress in a cementitious composite having its pore structure analyzed through μ -CT imaging. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. v. 10, n. 3, p. 653–668, 2017.

LAKSHIMI, S; ANUPRIYA, B. A comparative study of self healing concrete by using bacteria and silica fume. **International Journal of Engineering Research and Technology**, 2019, 7 (2): 1-11

LALA, R; HUSSAIN, A; AKHTAR, S. Self Healing Concrete. Rajiv Gandhi Technological University, India: 2014.

LANGAN, B. W.; WENG, K.; WARD, M. A. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 7, p. 1045–1051, 2002.

LEE, H. X. D.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. **Cement and Concrete Research**, v. 79, n. August 2010, p. 194–208, 2016.

LEE, Y. S.; PARK, W. Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 102, n. 7, p. 3059–3070, 2018.

LENG, F.; FENG, N.; LU, X. Experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 6, p. 989–992, 2000.

LEYTON-VERGARA, M. et al. Influence of granulometry on thermal and mechanical properties of cement mortars containing expanded perlite as a lightweight aggregate. **Materials**, v. 12, n. 23, 2019.

LI, G. et al. Activated chemicals of cementitious capillary crystalline waterproofing materials and their self-healing behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 36–45, 2019.

LI, G.; ZHAO, X. Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 3, p. 293–299, 2003.

LI, V. C.; HERBERT, E. Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 10, n. 6, p. 207–218, 2012.

Li V.C., Yang EH. (2007) Self Healing in Concrete Materials. In: van der Zwaag S. (eds) Self Healing Materials. **Springer Series in Materials Science**, vol 100. Springer, Dordrecht.

LI, V. C.; LIM, Y. M.; CHAN, Y.-W. Feasibility study of a passive smart self - healing cementitious composite. **Composites Part B: Engineering** v. 8368, p. 819–827, 1998.

- LING, H.; QIAN, C. Effects of self-healing cracks in bacterial concrete on the transmission of chloride during electromigration. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 406–411, 2017.
- LUO, M.; QIAN, C. X.; LI, R. Y. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 87, p. 1–7, 2015.
- LUO, Y. et al. Topology optimization of reinforced concrete structures considering control of shrinkage and strength failure. **Computers and Structures**, v. 157, p. 31–41, 2015.
- MACIEL, M. H. Influência do ligante pré-hidratado nas propriedades de suspensões de cimento Portland. 2017.
- MADIGAN, M. T. et al. **Microbiologia de Brock**. 14. ed. Porto Alegre: Grupo A Educação S.A., 2016.
- MAHEIRO, R. et al. Análise de sensibilidade dos parâmetros de um modelo para previsão da profundidade de carbonatação e sua aplicação em estruturas reais Universidade do Minho, Portugal, 2013.
- MALI, N.; MALI, A. A Review on Shape Memory Alloy and Its Application in Civil Engineering. **International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology**, v. 4, n. 8, p. 4395–4404, 2017.
- MANGULKAR, M.; JAMKAR, S. Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. **International Journal Of Scientific & Engineering Research**, v. 4, n. 5, p. 143–148, 2013.
- MANOJ PRABAHAR, A. et al. An experimental study of self healing of cracks in concrete using sodium silicate capsule. **Rasayan Journal of Chemistry**, v. 10, n. 2, p. 577–583, 2017.
- MANSUR, H.S. Técnicas de Caracterização de Materiais. In: ORÉFICE, R. (Ed.). **Biomateriais Fundamentos & Aplicações**. Rio de Janeiro: Cultura Médica, 44P, 2012.
- MEDEIROS JUNIOR, R. A. et al. Self-healing of self-compacting concretes made with blast furnace slag cements activated by crystalline admixture. **International Journal of Materials and Product Technology**, v. 56, n. 1/2, p. 169, 2018.
- MEDJIGBODO, S. et al. How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties? **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 72–86, 2018.
- MEHDIPOUR, I.; ZOUGHI, R.; KHAYAT, K. H. Feasibility of using near-field microwave reflectometry for monitoring autogenous crack healing in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 85, p. 161–173, 2018.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete-State-of-the-Art Report. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 10, n. 5, p. 170–184, 2012.

MILLA, J. et al. Measuring the crack-repair efficiency of steel fiber reinforced concrete beams with microencapsulated calcium nitrate. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 526–538, 2019.

MINNEBO, P. et al. A novel design of autonomously healed concrete: Towards a vascular healing network. **Materials**, v. 10, n. 1, p. 1–23, 2017.

MINNEBO, P.; HEMELRIJCK, D. VAN. Ideal material properties for capsules or vascular system used in cementitious self-healing materials. **International conference on self-healing materials**, p. 1–4, 2015.

MIRELEN, M. M. Efeito Do Aditivo Redutor De Permeabilidade Em Concretos Com Diferentes Tipos De Cimento Portland – Contribuição Aos Processos De Autocicatrização. n. m, p. 2002, 2016.

MOHAMED, H. A. Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 2, n. 2, p. 79–86, 2011.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. A Ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 32, n. 1, p. 47–55, 2011.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E. Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. **Thermochimica Acta**, v. 420, n. 1- 2 SPEC. ISS., p. 135–140, 2004.

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, [s.d.].

MUHAMMAD, L.; OUCIF, C. ScienceDirect Interaction between matrix crack and circular capsule under uniaxial tension in encapsulation-based self-healing concrete. **Underground Space**, 2018.

MUHAMMAD, N. Z. et al. Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 1123–1132, 2016.

MÜLLER, V.; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B. **Técnicas e Metodologias de Biomineralização na Cicatrização de Fissuras do Concreto**. Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...2019**

MÜLLERA, H. S. et al. Design and properties of sustainable concrete. **Procedia Engineering**, v. 95, n. Scescm, p. 290–304, 2014.

NAIN, N. et al. Enhancement in strength parameters of concrete by application of *Bacillus bacteria*. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 904–908, 2019.

NARDI, C. DE et al. Effect of age and level of damage on the autogenous healing of lime mortars. **Composites Part B**, v. 124, p. 144–157, 2017.

NEVERKOVICA, D.; KORJAKINS, A. Influence of Additives on Reinforced Concrete Durability. **Construction Science**, v. 16, n. 1, p. 21–26, 2014.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. 912 p.

NGUYEN, L. H. et al. Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 121–132, 2014.

NOCHAIYA, T.; WONGKEO, W.; CHAIPANICH, A. Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete. **Fuel**, v. 89, n. 3, p. 768–774, 2010.

NOORUL, M.; KHAN, H. Experimental Investigation of Strength and Durability Properties of Self-healing Concrete using Silica Fume and Metakaolin as Mineral Admixtures. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering** v. 4, n. 1, p. 16–19, 2017.

PACHECO, F. Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade. São Leopoldo, 2016, 195p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2016.

PALIN, D.; WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Bacteria-based self-healing concrete for application in the marine environment. **Icsh2013**, p. 244–247, 2013.

PANJEHPOUR, M. et al. a Review for Characterization of Silica Fume and. **International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology**, v. 2, n. 2, p. 1–7, 2011.

PARIDA, S. et al. Isolation and identification of pathogenic bacteria from brackish waters of Chilika lagoon, Odisha, India for pharmaceutical use. **Malaysian Journal of Microbiology**, v. 8, n. 3, p. 197–202, 2012.

PARK, S. J. et al. Calcite-forming bacteria for compressive strength improvement in mortar. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 20, n. 4, p. 782–788, 2010.

PARKS, J. et al. Effects of bulk water chemistry on autogenous healing of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 5, p. 515–524, 2010.

PATEL, P. Helping concrete heal itself. **ACS Central Science**, v. 1, n. 9, p. 470–472, 2015a.

PATEL, P. No Title. **American Chemical Society**, v. 1, p. 470–472, 2015b.

PELLIZZER, G. P. Análise mecânica e probabilística da corrosão de armaduras de estruturas de concreto armado submetidas à penetração de cloretos. **Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, p. 1–247, 2015.

PEREZ, G. et al. Synthesis and characterization of epoxy encapsulating silica microcapsules and amine functionalized silica nanoparticles for development of an innovative self-healing concrete. **Materials Chemistry and Physics**, v. 165, p. 39–48, 2015.

PEREIRA; E. L., CAMPOS, C. M. M; MOTERANI F. Efeitos do pH, acidez e alcalinidade na microbiota de um reator anaeróbio de Manta de Lodo (UASB) tratando efluentes de suinocultura. **Revista Ambiente & Água**, v. 4, p. 157-168, 2009.

POON, C.S; LAM, L; WONG, Y.L. Effects of fly ash and sílica fume on interfacial porosity of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1999, 11 (3): 197-205.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PUERTAS, F. et al. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, n. 12, p. 2043–2056, 2011.

QASRAWI, H.; SHALABI, F.; ASI, I. Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1118–1125, 2009.

QURESHI, T.; KANELLOPOULOS, A.; AL-TABBAA, A. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-II: Impact of age and the role of optimised expansive minerals in healing performance. **Construction and Building Materials**, v. 194, p. 266–275, 2019.

RAMACHANDRAN, S. K., RAMAKRISHNAN, V., & BANG, S. S. **Concrete remediation with B. pasteurii.pdf** *ACI Materials journal*, 2001.

RAMACHANDRAN, S. K.; RAMAKRISHNAN, V.; BANG, S. S. Remediation of Concrete Using Micro-Organisms. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 1, p. 3–9, 2001.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; MALHOTRA, V. M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. **Cement and Concrete Composites**, v. 17, n. 2, p. 125–133, 1995.

RASHAD, A. M. A synopsis about perlite as building material - A best practice guide for Civil Engineer. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 338–353, 2016.

RASHAD, A. M. Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 757–775, 2018.

RATNAYAKE, K. A. S. D.; NANAYAKKARA, S. M. A. Effect of fly ash on self-healing of cracks in concrete. **MERCon 2018 - 4th International Multidisciplinary Moratuwa Engineering Research Conference**, n. May, p. 264–269, 2018.

RAY, S.; KISHEN, J. M. C. Fatigue crack growth due to overloads in plain concrete using scaling laws. **Sadhana**, v. 37, n. 1, p. 107–124, 2012.

REBMANN, Markus Samuel. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

RIAZ, M. et al. Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 253–266, 2019.

RILEM TC 107-CSP: Creep and shrinkage prediction models: principles of their formation. **Materials and Structures**, Vol 31, 1998, p:507-512.

RILEM 221-SHC: Self-healing phenomena in cement-based materials (2013) **Materials and Structures**, Vol 1, 256p

RILEM TC 116-PCD. Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability. **Materials and Structures**, v. 32, p. 174–179, 1999.

RIPPER, THOMAZ; SOUZA, V. C. M. DE. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI, 2001.

RISSARDI, C.Z; SOUZA, C.F.N; PACHECO, F; CHRIST, R; SILVEIRA, L. Chloride attack evaluation on concrete compositions according to Brazilian standard ABNT NBR 6118 specification. **Journal of building pathology and rehabilitation**, v. 1, p. 1–19, 2016.

ROIG-FLORES, M. et al. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 1–11, 2015.

ROOIJ, M. et al. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee**. [s.l: s.n.].

ROSSEN, J. E.; SCRIVENER, K. L. Optimization of SEM-EDS to determine the C–A–S–H composition in matured cement paste samples. **Materials Characterization**, v. 123, n. October 2017, p. 294–306, 2017.

ROSSIGNOLO, João A. Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações. 1 ed. São Paulo: PINI, 2009

ŞAHMARAN, M. et al. Self-healing ability of cementitious composites: Effect of addition of pre-soaked expanded perlite. **Magazine of Concrete Research**, v. 66, n. 8, p. 409–419, 2014.

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

SALAS, D. A. et al. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 114–122, 2016.

SANGADJI, S. Can Self-healing Mechanism Helps Concrete Structures Sustainable? **Procedia Engineering**, v. 171, p. 238–249, 2017.

SANGADJI, S. et al. The Use of Alkaliphilic Bacteria-based Repair Solution for Porous Network Concrete Healing Mechanism. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 606–613, 2017.

SANKARANARAYANNAN, S. S.; JAGADESAN, J. R. Comparison of High Performance Fly Ash Concrete Using Nano Silica Fume on Different Mixes. **Circuits and Systems**, v. 07, n. 08, p. 1259–1267, 2016.

SCHIESSL, P. New approach to service life design of concrete structure. **Asian Journal of Civil Engineering (building and housing)**, v. 6, n. 5, p. 393–407, 2005.

SCHLAGEN, N., VAN BREUGEL, K. Crack healing of early age cracks in concrete. In: Konsta-Gdoutos M.S., editor. *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*. Springer; Alexandroupolis, Greece: 2006. pp. 273–284.

SCHLEGEL, H.G., 1993. **General Microbiology**, 7th edition. University Press, Cambridge

SCHWANTES-CEZARIO, N. et al. Bioprecipitation of calcium carbonate induced by *Bacillus subtilis* isolated in Brazil. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 123, p. 200–205, 2017.

SCHWANTES-CEZARIO, N. et al. Crack filling in concrete by addition of *bacillus subtilis* spores – Preliminary study. **DYNA (Colombia)**, v. 85, n. 205, p. 132–139, 2018b.

SCHWANTES-CEZARIO, N. et al. Effects of *Bacillus subtilis* biocementation on the mechanical properties of mortars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 1, p. 31–38, 2019.

SCHWANTES-CEZARIO, N.; NOGUEIRA, G. S. F.; TORALLES, B. M. Biocimentação de compósitos cimentícios mediante adição de esporos de *Bacillus subtilis* AP91. **Revista De Engenharia Civil IMED**, v. 4, n. 2, p. 142–158, 2017.

SEIFAN, M.; SAMANI, A. K.; BERENJIAN, A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, n. 6, p. 2591–2602, 2016.

SENGUL, O. et al. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 2–3, p. 671–676, 2011.

SHA, P. et al. A comparison study of the fresh and hardened properties of normal weight and lightweight aggregate concretes. v. 15, n. November 2017, p. 252–260, 2018.

SHAIKH, F. U. A. Effect of Cracking on Corrosion of Steel in Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 1, 2018.

SHANG, H. S.; CAO, W. Q.; WANG, B. Effect of fast freeze-thaw cycles on mechanical properties of ordinary-air-entrained concrete. **Scientific World Journal**, v. 2014, 2014.

SHANG, H.; YI, T. Freeze-Thaw Durability of Air-Entrained Concrete. v. 2013, 2013.

SHINDE, Gaurav Uttam; VALUNJKAR, S. S. An Experimental Study on Compressive Strength, Void Ratio and Infiltration Rate of Pervious Concrete. **International Journal of Engineering Research and Technology**, v. 4, n. 4, 2015.

SHIVAM, P. et al. A Review on Different Techniques of Image Processing. v. 1, n. 5, p. 1–7, 2017.

SIDDIQUE, R. et al. Effect of bacteria on strength, permeation characteristics and micro-structure of silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 92–100, 2017.

SIDIQ, A.; GRAVINA, R.; GIUSTOZZI, F. Is concrete healing really efficient? A review. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 257–273, 2019.

SISOMPHON, K., COPUROGLU, O., & FRAAIJ, A. Application of encapsulated lightweight aggregate impregnated with sodium monofluorophosphate as a self-healing agent in blast furnace slag mortar. **Heron**, v. 56, n. 1, p. 13–32, 2011.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; FRAAIJ, A. Application of encapsulated lightweight aggregate impregnated with sodium monofluorophosphate as a self-healing agent in blast furnace slag mortar. **Heron**, v. 56, n. 1–2, p. 17–36, 2011.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 566–574, 2012.

SNOECK, D. et al. X-ray computed microtomography to study autogenous healing of cementitious materials promoted by superabsorbent polymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 83–93, 2016.

SULEIMAN, A. R.; NEHDI, M. L. Effect of environmental exposure on autogenous self-healing of cracked cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 111, n. May, p. 197–208, 2018.

SWANSON, K. M. J.; PETRAN, R. L.; HANLIN, J. H. Culture Methods for Enumeration of Microorganisms. In: DOWNES, F. P.; ITO, K. (Eds.). . **Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods**. 4. ed. Washington: American Public Health Association (APHA), 2001. p. 53–62.

TAKAGI, E. M. Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino. Dissertação apresentada no Instituto tecnológico de aeronáutica. Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. p. 130, 2013.

TAKAGI, E.M; LIMA, M.G; HELENE, P.R.L. Contribuição para estudo do efeito da autocicatrização em concretos ativados por catalisadores cristalinos em estruturas de túneis submetidas à exposição contínua de água. In: 3º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas subterrâneas. São Paulo, 2012.

TALAEKHOZAN, A. et al. A Review of Self-healing Concrete Research Development . **Journal of Environmental Treatment Techniques** , n. February, 2014.

TAN, N. P. B. et al. Silica-based self-healing microcapsules for self-repair in concrete. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 12, p. 1–12, 2016.

TANG, S. W. et al. Recent durability studies on concrete structure. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 143–154, 2015.

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

TERMKHAJORNKIT, P. et al. Self-healing ability of fly ash-cement systems. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 3, p. 195–203, 2009.

TRASK, R. S.; WILLIAMS, H. R.; BOND, I. P. Self-healing polymer composites: Mimicking nature to enhance performance. **Bioinspiration and Biomimetics**, v. 2, n. 1, 2007.

TSANGOURI, E. A Decade of Research on Self-Healing Concrete. In: **Sustainable Construction and Building Materials**. [s.l.: s.n.]. v. ip. 13.

TSUJI, M.; SHITAMA, K.; ISOBE, D. Basic Studies on Simplified Curing Technique, and Prevention of Initial Cracking and Leakage of Water through Cracks of Concrete by Applying Superabsorbent Polymers as New Concrete Admixture. **Journal of the Society of Materials Science, Japan**, v. 48, n. 11, p. 1308–1315, 1999.

TURK, K.; KARATAS, M.; GONEN, T. Effect of Fly Ash and Silica Fume on compressive strength, sorptivity and carbonation of SCC. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 1, p. 202–209, 2013.

TZIVILOGLOU, E. et al. Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 118–125, 2016.

V.KRELANI. **Self-Healing Capacity of Cementitious**. [s.l.] Politecnico de Milano, 2015.

VAN BELLEGHEM, B. et al. Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar - A comparison between experimental study and finite element analysis. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 154–162, 2016.

VAN BREUGEL, K. Is there a market for self healing cement based materials? In: Proceedings of the first international conference on self healing materials, April, Netherlands, 2007.

VAN MULLEM, T. et al. Novel active crack width control technique to reduce the variation on water permeability results for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 541–551, 2019.

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. Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 125–137, 2016.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. **Self-healing in cementitious materials-a review**. [s.l.: s.n.]. v. 6

VARLAMOV, A. A.; SHAPOVALOV, E. L.; GAVRILOV, V. B. Estimating Durability of Reinforced Concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 262, p. 1–7, 2017.

VIECILI, M. J. C.; HASTENPFLUG, D.; GIRARDI, R. Comparativo entre o teste de Vicat e a calorimetria semi-adiabática para determinação do tempo de início e fim de pega em cimentos Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 2018.

VIJAY, K.; MURMU, M.; DEO, S. V. Bacteria based self healing concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1008–1014, 2017.

VILLENA, J.; TRICHÊS, G.; PRUDÊNCIO, L. R. Replacing the aggregate by rice husk ash in roller compacted concrete for composite pavements. **Geotechnical Special Publication**, v. 47623, n. 212 GSP, p. 19–27, 2011.

VINKLER, M.; VÍTEK, J. L. Drying shrinkage of concrete elements. **Structural Concrete**, v. 18, n. 1, p. 92–103, 2017.

WANG, J. et al. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 532–540, 2012.

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

WANG, J. et al. *Bacillus sphaericus* LMG 22257 is physiologically suitable for self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 101, n. 12, p. 5101–5114, 2017.

WANG, J. Y. et al. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 139–152, 2014b.

WANG, J. Y. et al. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 110–119, 2014c.

WANG, W. et al. Research Status of Self-healing Concrete. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 218, n. 1, 2019.

WASSERMANN, R.; KATZ, A.; BENTUR, A. Minimum cement content requirements: a must or a myth? *Materials and Structures*, v. 42. n 7, pp.973-982, 2009.

WERLE, Ana Paula. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto com ênfase na carbonatação**. 2010. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

WHITE, S. R. et al. Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, v. 409, n. 6822, p. 794–797, 2001.

WHITTIER, S.; OLYNIEC, J.; MCGLOHN, R. Minimizing Temperature Differentials in Mass Concrete. n. December, p. 42–45, 2004.

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 7, p. 763–770, 2011.

WILLIAMS, S. L.; KIRISITS, M. J.; FERRON, R. D. Influence of concrete-related environmental stressors on biomineralizing bacteria used in self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, v. 139, p. 611–618, 2017.

WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, v. 28, n. 1, p. 571–583, 2012.

XU, H. et al. Self-Healing Concrete Using Rubber Particles to. *Materials*, 2019.

XU, J.; WANG, X. Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material. *Construction and Building Materials*, v. 167, p. 1–14, 2018.

YAP, S. P. et al. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 181, p. 155–165, 2018.

YILDIRIM, G. et al. Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 87, p. 172–186, 2018.

YOW, H.N. and F.A. Routh, Formation of liquid core-polymer shell microcapsules. *Soft Matter*, 2006. 2: p. 940-949.

YOUSUF, S.; SANCHEZ, L. F. M.; SHAMMEH, S. A. The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry. *Journal of Building Engineering*, v. 25, n. May, p. 100815, 2019.

ZAI, S. A. K.; MURTHY, M. K. Self-healing concrete. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, v. 2, n. 27–33, 2015.

ZEMANN, M.; HERRMANN, N.; DEHN, F. Calcite formation on steamed concrete surfaces and its potential for sealing cracks. *Construction and Building Materials*, v. 203, p. 1–8, 2019.

ZEMSKOV, S. V.; JONKERS, H. M.; VERMOLEN, F. J. Two analytical models for the probability characteristics of a crack hitting encapsulated particles: Application to self-healing materials. **Computational Materials Science**, v. 50, n. 12, p. 3323–3333, dez. 2011.

ZEMSKOV, S. V.; COPUROGLU, O.; VERMOLEN, F. J. Interactive Mathematical Model of Self-Healing in Carbonated Cementitious Materials. **ICSHM 2013: Proceedings of the 4th International Conference on Self-Healing Materials**, p. 134–137, 2013.

ZHANG, H. L.; DAVIE, C. T. A numerical investigation of the influence of pore pressures and thermally induced stresses for spalling of concrete exposed to elevated temperatures. **Fire Safety Journal**, v. 59, p. 102–110, 2013.

ZHANG, J. et al. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 610–617, 2017.

ZHANG, J. L. et al. Screening of bacteria for self-healing of concrete cracks and optimization of the microbial calcium precipitation process. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, n. 15, p. 6661–6670, 2016a.

ZHANG, J. L. et al. A binary concrete crack self-healing system containing oxygen-releasing tablet and bacteria and its Ca²⁺-precipitation performance. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, n. 24, p. 10295–10306, 2016b.

ZHANG, H.L.; DAVIE, C.T. A numerical investigation of the influence of pore pressures and thermally induced stresses for spalling of concrete exposed to elevated temperatures. **Fire safety journal**, 2013, 59, p-102-110.

ZWAAG, S van der. Self-healing materials: na alternative approach to 20 Centuries of Materials Science- Springer **Series in Materials Science**, Vol 100, 2007.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTOS REFERENTES ÀS SOLUÇÕES BACTERIANAS

A.1 Traçado da curva da solução bacteriana

Para uso, as bactérias foram dispostas em placas de hágar, contendo o meio de cultivo LB (Luria Bertani), marca Kasvi. O pó para preparo do meio foi dissolvido em água deionizada e tratado em autoclave. A composição química do produto em gramas por litro (g/L) é 10g/L de Triptona, 5 g/L de levedura e 5,0 g/L de cloreto de sódio, com pH de $7,0 \pm 0,2$. Conforme Schwantes-Cezario, Nogueira; e Toralles (2017), esse meio de cultura é adequado para o crescimento de bactéria do gênero *Bacillus*.

Para avaliação do crescimento da bactéria seguiu-se as seguintes etapas:

- foram feitas soluções de controle não inoculadas (meio LB puro) e soluções de LB com inóculo da *B subtilis*. Tanto as soluções inoculadas como as não inoculadas foram levadas ao agitador orbital do tipo *Shaker*, em condições de 37°C e 165rpm, sendo essa uma condição adequada para seu crescimento;
- após, foram mantidas em um *shaker* com velocidade de rotação de 32rpm, com temperatura de 35°C;
- do shaker, a solução foi retirada para leitura em intervalos diversos. Em cada retirada do equipamento, foi utilizado um pequeno volume para utilização da solução e realizada a leitura de OD (absorbância¹) com espectrofotômetro por absorção no infravermelho, com comprimento de onda de 600nm, usual para soluções bacterianas. O modelo do espectrofotômetro é Vis, da fabricante Kasuaki e pertence ao laboratório de Toxicologia e Biologia Molecular da UNISINOS;
- simultaneamente à medição da absorbância de cada amostra, retirou-se um volume conhecido, do qual foram feitas diluições em série em solução salina², em que, para cada diluição, a concentração de células correspondesse a um décimo da diluição anterior (Figura). Essa abordagem permite o controle da diluição, de modo que se torna viável a contagem macroscópica das unidades formadoras de colônia (UFC) por unidade de volume, mesmo em soluções muito concentradas. Tal plaqueamento é chamado *pour plate* ou plaqueamento por profundidade;
- para manipulação das soluções bacterianas, operou-se em uma capela, com bico de Bünsen para garantia da esterilização dos equipamentos;
- para o plaqueamento, foi adicionado ágar ao meio de cultivo, visando a consistência sólida necessária para imobilização das bactérias possibilitando sua contagem, mantendo-as afastadas na solução;

¹ A absorbância é uma taxa entre a luz emitida pelo espectrofotômetro e a luz recebida na outra extremidade do equipamento, sendo então uma medida da quantidade de luz absorvida pelo líquido ou solução em análise.

² Utiliza-se solução salina para manter o equilíbrio osmótico entre a célula e a solução, evitando o dessecamento ou a ruptura do microrganismo.

- após o plaqueamento da solução no meio LB, essas foram mantidas em estufa, com temperatura constante de 36°C pelo período de 2 dias, sempre trabalhando com diluições diversas para uma mesma amostra, e em duplicata, para verificar qual leitura se enquadraria no método;

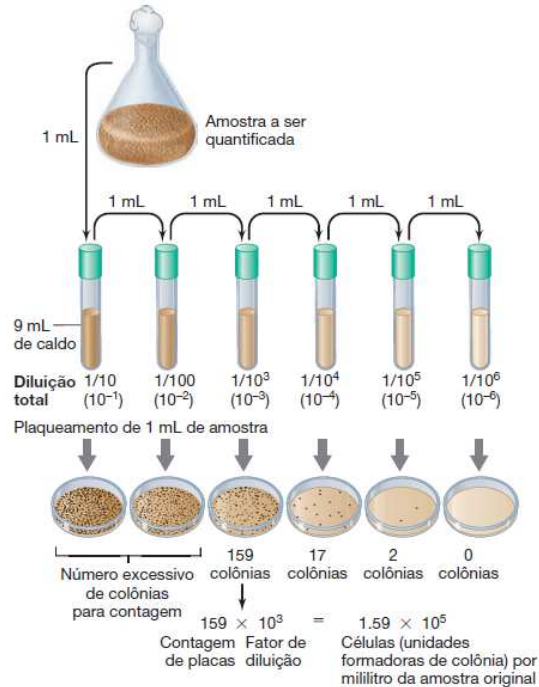


Figura A.1- Procedimento para contagem de UFCs, utilizando diluições em série e plaqueamento *pour plate*

Fonte: Madigan et al., (2016, p. 156).

- na sequência, após cerca de 48h, foi feita a contagem do número de bactérias viáveis, as bactérias que formaram colônia, também chamadas de UFC realizada sempre com uso de lupa. Admite-se que uma colônia que pode ser vista macroscopicamente corresponde a uma UFC, de acordo com Madigan et al., (2016);

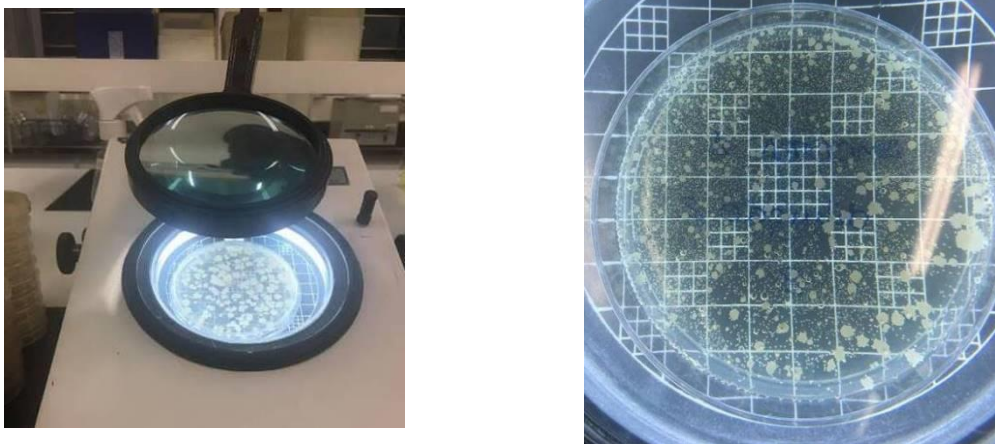


Figura A.2 - Contagem das bactérias após cultivo- utilização de lupa

- para cada uma das amostras, foi selecionada a diluição que apresentava entre 30 e 300 bactérias viáveis em uma leitura intermediária;

- para realização da contagem, teve-se cuidado para que não fossem contadas UFCs sobrepostas, assim como, que fossem evitadas as bolhas de ar que são comuns no processo;
- após, para verificação do número de bactérias viáveis, tem-se que analisar:
 - a) qual diluição foi utilizada na contagem;
 - b) qual a concentração base de utilização da solução bacteriana.

Para fins de entendimento da consideração anterior, tem-se:

- se foi obtido na contagem 30 bactérias viáveis, com diluição de 10^{-4} , tem-se que o número verificado é de 30×10^4 UFC/ μ L;
- considerando tal número, tem-se que a concentração da solução bacteriana é de 30×10^5 UFC/mL, por ser um volume mais comum de trabalho;
- dessa forma, a leitura de 30 UFC representa na realidade 3×10^6 UFC/mL.

A.2 Preparo da solução para uso

Para preparação da solução bacteriana foi preparada como base uma solução tampão fosfato³, de composição conforme a Tabela A.1.

Tabela A.1- Composição da solução tampão fosfato.

Solvente	Soluto	Concentração	Fabricante
Água deionizada	Fosfato de sódio (bibásico-anidro)	1,05 g/L	Neon
	Fosfato de sódio (monobásico hidratado)	0,36 g/L	Nuclear
	Cloreto e sódio	8,17 g/L	Êxodo científica

Fonte: Schwantes-Cezario; Nogueira; Toralles, adaptado pela autora

Para posterior diluição na solução tampão, as bactérias foram dispersas no meio LB e colocadas no *shaker* por dois dias para crescimento, em procedimento análogo ao realizado para o traçado da curva no estudo Piloto B. Após, as amostras foram centrifugadas por 3min, com velocidade de 4000rpm, para separação das bactérias do meio de cultura. Para tal, foi empregado equipamento do tipo centrífuga, modelo 5430 R, da Eppendorf AG, pertencente ao Laboratório de Toxicologia e biologia molecular da UNISINOS.

Após a separação, as células foram lavadas por 4x. A lavagem envolveu a diluição em solução fosfato já citada. A lavagem é realizada para separação da matéria orgânica do meio líquido da solução bacteriana. A Figura ilustra a evolução do processo. Tanto a solução tampão como o procedimento de lavagem seguiram os procedimentos descritos por Schwantes-Cezario et al., (2017).

Após a lavagem, as soluções foram diluídas em tampão fosfato, sendo realizada a medição da absorbância de modo análogo ao realizado no item 3.2.1. Considerando que se conhece através dessa leitura a absorbância do ponto e a curva já apresentada no item 3.2.2, sabe-se a concentração da solução. Com a concentração medida e a concentração escolhida para adoção, calculam-se os respectivos volumes. Finalizado o preparo da solução, a solução foi disposta em câmara fria por 2 dias em 8°C, para esporulação das bactérias. Cabe destacar que esse resfriamento não proporciona as

³ A solução tampão fosfato visa fornecer equilíbrio osmótico entre o meio e as células.

condições iniciais para reprodução bacteriana e assim garante-se que se mantém a concentração arbitrada.

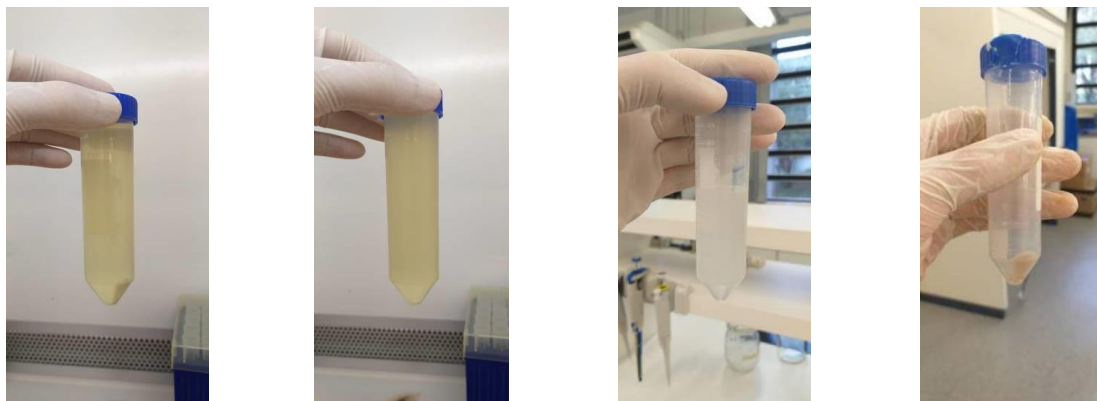


Figura A.3- Procedimento de lavagem com uso da solução tampão

O procedimento de encapsulamento descrito no item 3.1.2.1 foi alterado para o uso da solução bacteriana, dados os requisitos específicos para sua proteção no meio alcalino do concreto.

Para esse encapsulamento, adotou-se os procedimentos descritos a seguir:

- a) as perlitas foram imersas na solução bacteriana por um período de 3h;
- b) após, foi utilizado o procedimento de vácuo, por um período de 30 minutos. Esse período levou em consideração os estudos de Sisomphon, Copuroglu e Fraaij, (2011) e Alghamri, Kanellopoulos e Al-tabbaa (2016), que concluíram que após esse período não havia grande variação na absorção;
- c) após a aplicação de vácuo, drenou-se a solução bacteriana e as perlitas foram mantidas por 2 dias em estufa à 45°C;
- d) transcorrido tal período foi aspergida uma solução de lactato de cálcio⁴, de composição conforme Tabela . As perlitas foram novamente condicionadas em estufa por um período de 48h em temperatura de 45°C;

Tabela A.2- Composição da solução de lactato de cálcio

Solvente	Soluto	Concentração	Fabricante
Água deionizada	Lactato de cálcio	8g/L	Himedia
	Extrato de levedura	1g/L	Synth

Fonte: adaptado de Zhang et al., (2017)

- e) por fim, cobriu-se com cimento CP-II-F40 na superfície das perlitas, contando novamente com a aspersão do lactato de cálcio. Esse procedimento não baseou-se em pesquisas, porém percebeu-se a necessidade de um líquido para promover a hidratação do cimento na perlita que apresentava sua superfície seca após a estufa.

⁴ A utilização de lactato de cálcio visa enriquecer a superfície das perlitas com um nutriente promotor da biomineralização, como citado no item 2.2.1.2.4.

APÊNDICE B – TABELAS VERIFICADAS NOS TRAÇOS REFERENTES AO CONSUMO DE CIMENTO

Tabela B.1 – Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de CC, submetidas ao corte, traço CC260

Amostra analisada	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				C	Observação
		7	28	56	84		
CC260.N.CS.2	1,800	0	0	0	100	CP	Formação de lâmina
CC260.N.CU.4	1,200	0	100	100	100	CP	Formação de lâmina
CC260.R.CS.7	1,303	0	0	0	0	PBI	
CC260.R.CS.8	1,275	0	0	0	0	PBE	Formato de lâmina
CC260.R.CU.10	1,482	0	0	0	0	PBE	
CC260.R.CU.12	1,467	0	0	0	0	PBI	

Tabela B. - traço 2- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de CC, submetidas ao ensaio de tração na flexão CC260

CP	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
CC260.N.CS.1a	0,520	0	82	82	82		X	CC	Espessura de 0,43 mm
CC260.N.CS.1b	0,483	0	100	100	100		X	CP	Espessura de 0,48 mm
CC260.N.CS.2a	1,048	0	0	0	0			PBE	
CC260.N.CS.3a	0,573	91	91	91	91	X		CP	Espessura de 0,52 mm
CC260.N.CS.3d	0,654	0	0	0	0			PBE	
CC260.N.CU.4d	0,679	28	28	28	0	X		CC	Espessura de 0,193
CC260.R.CS.7d	0,760	0	0	0	0			PBE	
CC260.R.CS.8b	0,457	0	0	0	0			PBE	
CC260.R.CS.8d	0,594	60	84	84	84	X		CC	Espessura de 0,50 mm
CC260.R.CS.9b	0,785	0	52	52	52			CP	Espessura de 0,41 mm
CC260.R.CS.9c	0,352	0	0	0	94		X	CP	Espessura de 0,33 mm
CC260.R.CS.9d	0,294	0	0	0	105		X	CP	Formação de 0,308 mm
CC260.R.CU.10a	0,932	0	0	0	86		X	CP	Espessura de 0,80 mm
CC260.R.CU.10b	0,831	0	0	0	94		X	CC	Espessura de 0,78 mm
CC260.R.CU.10c	0,691	61	61	61	107	X	X	CC	
CC260.R.CU.11b	0,936	0	64	64	64		X	CP	Espessura de 0,59 mm
CC260.C.CS.14b	1,119	0	0	0	0			PBE	
CC260.C.CS.15b	0,942	0	0	0	0			PBI	

Tabela B.3- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de CC, submetidas ao corte- traço CC300

CP	e (mm)	% cicatrização nas idades (dias)				C	Observação
		7	28	56	84		
CC300.N.CS.2	1,385	0	100	100	100	CP	Formato de lâminas, 1,385 mm
CC300.N.CU.4	1,534	0	83	83	83	CP	Espessura de 1,27 mm
CC300.N.CU.5	1,550	0	51	55	55	CP	Espessura de 0,85 mm
CC300.R.CS.7	1,541	0	0	100	100	CP	Espessura total, 1,541 mm
CC300.R.CU.10	1,861	0	0	0	0	PBE	
CC300.R.CU.12	1,412	0	100	0	0	CC	Após 28dias, produto lixiviou
CC300.C.CU.18	1,597	0	0	0	100	CP	Espessura total, 1,597 mm

Tabela B.4- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de CC, submetidas ao ensaio de tração na flexão- traço CC300

CP	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
CC300.N.CS.1a	0,393	0	0	0	100		X	CP	Espessura de 0,393 mm
CC300.N.CS.1c	0,374	0	74	74	74	X		CP	0,275 mm cicatrizado
CC300.N.CS.1d	0,478	0	0	0	44	X		CP	Espessura de 0,209 mm
CC300.N.CS.2b	0,630	0	0	91	91	X		CP	Espessura de 0,573 mm
CC300.N.CS.3c	0,528	0	0	0	0			PBE	
CC300.N.CU.5b	0,984	0	0	68	68	X		CC	Espessura de 0,669 mm
CC300.R.CS.7a	0,688	0	58	107	116	X		CC	Espessura de 0,798 mm
CC300.R.CS.8b	0,792	0	0	0	0			PBE	
CC300.R.CS.8d	0,587	0	0	100	100	X	X	CP	Espessura de 0,587 mm
CC300.R.CS.9b	0,649	0	80	95	95		X	CP	Espessura de 0,616 mm
CC300.R.CS.9c	1,000	0	0	0	0		X	PBE	
CC300.R.CU.10d	0,446	0	100	100	100	X		CC	Espessura de 0,446 mm
CC300.R.CU.11b	0,532	0	0	154	154	X		CC	Espessura de 0,823 mm
CC300.R.CU.12a	0,773	0	0	0	0		X	CP	CP em irregularidade- da amostra- 1,2 mm
CC300.R.CU.12b	0,895	0	90	90	90		X	CP	Espessura de 0,83 mm
CC300.C.CS.14d	0,749	0	0	76	76		X	CP	Espessura de 0,569 mm

Tabela B.5- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de CC, submetidas ao corte- traço CC360

CP	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				C	Observação
		7	28	56	84		
CC360.S.CS.1	1,448	0	100	0	0	CP	Produto foi lixiviado
CC360.N.CS.7	2,120	0	0	0	0	PBE	

Tabela B.6- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de CC, submetidas ao ensaio de tração na flexão- traço CC360

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
CC360.N.CS.1b	0,875	0	93	93	93		X	CC	Espessura de 0,81 mm
CC360.N.CS.1c	1,217	0	42	42	42		X	CC	Espessura de 0,50 mm
CC360.N.CS.1d	0,750	0	0	0	0			PBE	
CC360.N.CS.2b	0,873	0	100	100	100		X	CP	Espessura de 0,87 mm
CC360.N.CS.3a	0,817	0	0	0	0		X	PBE	
CC360.N.CU.4b	0,885	0	0	100	100		X	CP	Espessura de 0,88 mm
CC360.N.CU.4d	0,714	0	0	0	0		X	CP	irregularidade da amostra de 1,52 mm
CC360.N.CU.5d	0,708	0	0	44	50	X		CC	Espessura de 0,35 mm
CC360.N.CU.6d	0,540	0	0	0	0			PBE	
CC360.R.CS.7c	0,444	0	0	0	0			PBE	
CC360.R.CS.7d	0,721	0	62	97	121		X	CC	Espessura de 0,87 mm
CC360.R.CS.8a	0,533	0	0	103	103	X		CC	Espessura de 0,55 mm
CC360.R.CS.8b	0,624	0	0	100	100		X	CP	Espessura de 0,60 mm
CC360.R.CS.8d	0,719	0	0	83	83	X		CC	Espessura de 0,60 mm
CC360.R.CS.9a	0,890	39	42	47	47		X	CC	Espessura de 0,42 mm
CC360.R.CS.9c	0,679	0	0	0	70		X	CC	Espessura de 0,47 mm

CC360.R.CU.10b	0,381	0	0	0	0	X	PBE	
CC360.R.CU.10c	0,461	0	60	106	130	X	CC	Produto de até 1,0 mm
CC360.R.CU.10d	0,561	0	0	0	0	X	CP	Espessura de 0,52 mm
CC360.R.CU.11b	0,639	48	48	100	100	X	CC	CC de 0,8 mm e PBE em irregularidade de 0,8 mm
CC360.R.CU.11c	0,891	0	0	0	0		PBE	
CC360.R.CU.11d	0,741	0	0	0	100	X	CP	Espessura de 0,74 mm
CC360.R.CU.12a	0,687	0	0	35	35	X	CC	Espessura de 0,24 mm
CC360.R.CU.12b	0,701	0	50	105	105	X	CC	Espessura de 0,73 mm
CC360.R.CU.12c	0,627	0	0	90	117	X	CC	Espessura de 0,73 mm
CC360.C.CS.15c	0,366	0	0	0	100		CP	Espessura de 0,37 mm
CC360.C.CU.17b	0,424	0	0	0	0		PBE	

APÊNDICE C – TABELAS VERIFICADAS NOS TRAÇOS REFERENTES AO USO DE POZOLANAS

Tabela C.1- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável P, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço PC15

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				Ponto verificado		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
PC15.N.CS.1a	1,401	0	0	0	0	X		PBE	
PC15.N.CS.1b	1,303	0	0	0	0	X		PBE	Lixiviado após 28 dias
PC15.N.CS.2d	1,090	0	0	0	0	X		PBE	
PC15.N.CS.3c	0,682	0	0	0	0	X		PBE	
PC15.N.CU.4d	0,874	0	0	23	23	X		CC	Espessura de 0,20 mm
PC15.N.CU.5c	0,486	0	100	100	100		X	CP	Espessura de 0,49 mm
PC15.N.CU.6a	1,230	0	0	0	0		X	PBE	
PC15.N.CU.6b	1,055	0	0	0	0		X	PBE	
PC15.N.CU.6c	0,821	0	0	0	0		X	PBE	
PC15.N.CU.6d	0,998	0	0	0	0		X	PBE	
PC15.R.CS.7c	0,399	0	0	100	100		X	CP	PBE e CP de 0,399 mm
PC15.R.CS.7d	0,473	0	0	100	100		X	CP	PBE e CP de 0,473 mm
PC15.R.CS.8d	0,932	0	0	30	30	X		CC	Espessura de 0,3 mm
PC15.R.CU.10d	1,105	0	0	58	58	X		CC	Espessura de 0,64 mm
PC15.R.CU.11a	0,914	0	0	0	0		X	PBE	
PC15.R.CU.11d	0,696	0	0	46	46	X		CC	Espessura de 0,32 mm
PC15.R.CU.12a	0,446	0	87	97,7	100	X		CC	CC de até 0,45 mm
PC15.R.CU.12b	0,259	0	0	0	0	X		PBI	
PC15.R.CU.12c	0,274	0	0	0	0		X	PBE	
PC15.R.CU.12d	0,379	0	0	93	93		X	CC	Espessura de 0,35 mm

Tabela C.2 - Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável P, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço PC30

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades de análise (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
PC30.N.CS.1a	1,193	0	0	0	0		X	PBE	
PC30.N.CS.2a	1,118	0	0	0	0		X	PBE	
PC30.N.CS.3c	0,831	0	0	0	0	X		PBE	
PC30.R.CS.7a	0,796	0	0	0	0		X	PBE	
PC30.R.CS.8a	1,080	0	0	0	0		X	PBE	
PC30.R.CS.9c	0,884	0	0	0	0		X	PBE	
PC30.R.CU.10b	1,382	0	0	0	0		X	PBE	
PC30.R.CU.12b	1,391	0	0	43	43	X		CC	espessura de 0,6 mm
PC30.R.CU.12d	1,697	0	0	27	27	X		CC	espessura de 0,45 mm
PC30.C.CS.14a	1,090	0	0	0	0		X	PBE	

Tabela C.3 - Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável P, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço PS 7.5

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
PS7.5.N.CS.1c	1,404	0	0	0	0	X		PBE	
PS7.5.N.CS.2c	1,540	0	0	0	25	X		CP	Espessura de 0,38 mm
PS7.5.N.CS.3c	2,040	0	29	29	29	X		CP	Espessura de 0,59 mm
PS7.5.N.CU.4c	1,845	0	14	14	14	X		CP	Espessura de 0,25 mm
PS7.5.N.CU.6c	1,190	0	29	29	29	X		CC	Espessura de 0,34 mm
PS7.5.R.CS.7d	1,689	0	19	19	19	X		PBE	Espessura de 0,329 mm
PS7.5.R.CS.8a	2,129	0	0	0	0	X		PBE	
PS7.5.R.CS.8d	1,474	0	0	0	18	X		CP	Espessura de 0,26 mm
PS7.5.R.CS.9b	1,642	0	0	0	0	X		CP	CP- irregularidade da fissura
PS7.5.R.CS.9d	1,789	0	23	23	23	X		CC	Espessura de 0,42 mm
PS7.5.R.CU.10d	1,228	0	52	52	52		X	CP	Espessura de 0,643 mm
PS7.5.R.CU.11a	1,798	0	278	50	50	X	X	CP	Placa com espessura de 5 mm
PS7.5.R.CU.12b	2,227	0	0	0	0		X	PBE	
PS7.5.R.CU.12d	2,050	0	0	22	22	X		CC	Espessura de 0,44 mm

Tabela C.4 - Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável P, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço PS 15

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
PS15.N.CS.1a	0,414	0	0	72	72		X	CP	Espessura de até 0,298 mm
PS15.N.CS.1b	0,498	0	0	65	65		X	CP	Espessura de até 0,324mm
PS15.N.CS.1c	0,440	0	0	0	0		X	PBE	
PS15.N.CS.2a	0,279	0	0	99	99		X	CP	Espessura de 0,276 mm
PS15.N.CS.2c	0,322	0	0	0	0		X	PBE	
PS15.N.CS.3a	0,427	0	0	97	97		X	CC	Espessura de 0,413 mm
PS15.N.CS.3c	0,478	0	0	41	41	X	X	CC e CP	CC de 0,198 mm e CP de até 4 mm (irregularidade)
PS15.N.CU.4a	0,485	0	0	47	47		X	CC	CC de produto incolor em espessura de até 0,226 mm
PS15.N.CU.4c	0,302	0	0	122	122		X	CC	CC superior a L (0,369 mm)
PS15.N.CU.4d	0,539	0	0	77	77		X	CC	Espessura de 0,415 mm
PS15.N.CU.5a	0,559	0	0	63	63			CP	CP na irregularidade da FP com espessura de 0,35 mm
PS15.N.CU.5c	0,648	0	0	0	33		X	CP	Espessura de 0,217 mm
PS15.N.CU.5d	0,711	0	0	0	20		X	CC	Espessura de 0,14 mm
PS15.N.CU.6c	0,238	0	0	84	84		X	CC	Espessura de 0,20 mm, em cerca de 80% da amostra
PS15.N.CU.6d	0,359	0	0	72	72		X	CC	CC transparente em espessura de 0,257 mm
PS15.R.CS.7c	0,380	0	0	0	0		X	PBE	
PS15.R.CS.7d	0,396	0	100	101	101		X	CP	Espessura de 0,4 mm
PS15.R.CS.8a	0,560	0	0	0	0		X	PBE	
PS15.R.CS.8b	0,588	0	0	0	0		X	PBE	
PS15.R.CS.8c	0,504	0	0	0	0		X	PBE	
PS15.R.CS.8d	0,447	0	0	0	0		X	PBE	
PS15.R.CS.9a	0,804	0	0	0	0		X	PBE	

PS15.R.CS.9b	0,394	0	0	0	0		X	PBE	
PS15.R.CS.9c	0,493	0	0	0	0		X	PBE	
PS15.R.CS.9d	0,540	0	0	0	0		X	PBE	
PS15.R.CS.10b	0,473	0	0	106	106		X	CC e CP	CC de 0,5 mm e CP de 0,4 mm
PS15.R.CU.10c	0,405	C	0	123	123		X	CC	Espessura de 0,50 mm
PS15.R.CU.11a	0,225	0	0	0	0			PBE	
PS15.R.CU.11c	0,342	0	0	0	0			PBE	
PS15.R.CU.12c	0,469	0	100	149	149			CP	Espessura de 0,70 mm
PS15.C.CS.13a	0,404	0	0	0	99			CP	Espessura de 0,40 mm
PS15.C.CS.13b	0,334	0	0	0	120			CP	Espessura de 0,40 mm
PS15.C.CS.14c	0,332	0	0	0	54	X		CC	Espessura de 0,18 mm
PS15.C.CS.15a	0,370	0	0	0	70		X	CP	Espessura de 0,26 mm
PS15.C.CS.15d	0,451	0	0	0	0		X	PBE	Em irregularidade na amostra
PS15.C.CU.16c	0,344	0	0	99	99		X	CC	Espessura de 0,34 mm
PS15.C.CU.18b	0,486	0	0	0	0		X	PBE	

APÊNDICE D – TABELAS VERIFICADAS NOS TRAÇOS REFERENTES AO USO DE SQ

Tabela D.1 - Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável SQI, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SQI10

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
		SQI10.N.CS.1a	0,491	0	0	100	102		
SQI10.N.CS.1b	0,687	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.N.CS.1c	0,469	0	0	74	74		X	CP	Espessura de 0,345 mm
SQI10.N.CS.2a	0,358	0	0	78	78		X	CP	Espessura de 0,279 mm (lâmina)
SQI10.N.CS.2b	0,476	0	0	0	0		X	CP	Na irregularidade (0,247 mm)
SQI10.N.CS.2c	0,335	0	0	97	97		X	CP	Espessura de 0,325 mm
SQI10.N.CS.3a	1,170	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.N.CS.3b	1,009	0	0	0	0		X	PBE	Apenas aos 28 dias
SQI10.N.CS.3c	1,167	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.N.CU.4a	0,436	0	0	123	123		X	CC	Espessura de 0,537 mm
SQI10.N.CU.4b	0,602	0	0	98	98		X	CC	Espessura de 0,59 mm
SQI10.N.CU.4c	0,447	0	0	71	71		X	CP	Espessura de 0,348 mm
SQI10.N.CU.5b	0,424	0	0	0	0		X	PBE	Progressão entre 28 e os 84 dias
SQI10.N.CU.5c	0,428	0	0	0	0		X	PBE	Apenas aos 28 dias
SQI10.N.CU.6c	0,529	0	0	0	0		x	PBE	
SQI10.N.CU.6d	0,669	0	0	0	0		x	PBE	Apenas aos 28 dias
SQI10.R.CS.7a	0,535	0	0	207	207		X	CC	Espessura de 1,119 mm
SQI10.R.CS.7b	0,881	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.R.CS.7c	0,352	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.R.CS.8b	0,371	0	0	74	74		X	CC	Espessura de 0,273 mm
SQI10.R.CS.8c	0,365	0	0	0	98		X	CC	Espessura de 0,358 mm + PBE
SQI10.R.CS.9a	0,240	0	0	0	108		X	CC	Espessura de 0,261 mm
SQI10.R.CS.9b	0,353	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.R.CS.9c	0,297	0	0	0	104		X	CC	Espessura de 0,309 mm + PBE
SQI10.R.CU.10a	0,602	0	0	112	112		X	CC	Espessura de 0,68 mm
SQI10.R.CU.10b	0,825	0	0	125	125		X	CC	Espessura de 1,033 mm
SQI10.R.CU.10c	0,407	0	0	122	122		X	CC	Espessura de 0,5 mm
SQI10.R.CU.11a	0,377	0	0	131	131		X	CC	Espessura de 0,493 mm
SQI10.R.CU.11b	0,452	0	0	113	113		X	CC	Espessura de 0,511 mm
SQI10.R.CU.11c	0,287	0	0	117	117		X	CC	Espessura de 0,337 mm
SQI10.R.CU.12a	0,318	0	0	118	118		X	CC	Espessura de 0,374 mm
SQI10.R.CU.12b	0,563	0	0	110	110		X	CC	Espessura de 0,62 mm
SQI10.R.CU.12c	0,426	0	0	130	130		X	CC	Espessura de 0,552 mm
SQI10.C.CS.13b	0,624	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.C.CS.13c	0,476	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.C.CS.14b	0,542	0	0	0	0		X	PBE	Em irregularidade superficial
SQI10.C.CS.15b	0,421	0	0	0	0		X	PBE	Produto próximo a espessura total
SQI10.C.CS.15c	0,455	0	0	0	0		X	PBE	Produto próximo a espessura total
SQI10.C.CU.16b	0,579	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.C.CU.16c	0,527	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.C.CU.17a	0,389	0	0	67	67		X	CC	CC de até 0,262 mm, incolor
SQI10.C.CU.17b	0,602	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.C.CU.17c	0,450	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.C.CU.18a	0,303	0	0	0	100		X	PBE	Cristais em trecho de 0,147 mm
SQI10.C.CU.18b	0,415	0	0	0	0		X	PBE	
SQI10.C.CU.18c	0,304	0	0	0	52		X	CC	Espessura de 0,157 mm

Tabela D.2 - Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável SQI, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SQI20

Amostras	e (mm)	% de cicatrização nas idades de análise (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SQI20.N.CS.1a	0,519	0	0	0	106		X	CP	Espessura de 0,549mm e PBE
SQI20.N.CS.1b	0,614	0	0	0	58		X	CP	Espessura de 0,358mm
SQI20.N.CS.1c	0,621	0	0	0	97		X	CC	Produto incolor de 0,6mm
SQI20.N.CS.2a	0,43	0	0	0	26		X	CC	Espessura de 0,113mm
SQI20.N.CS.2b	0,537	0	0	0	0	X	X	PBE	
SQI20.N.CS.2c	0,424	0	0	0	87		X	CC	Espessura de 0,369mm e PBE
SQI20.N.CS.3a	0,283	0	100	100	100		X	CP	Espessura de 0,288mm
SQI20.N.CU.4a	0,482	0	0	58	58		X	CC	Espessura de 0,280mm
SQI20.N.CU.4b	0,517	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CU.4c	0,482	0	0	0	65		X	CC	Espessura de 0,313mm
SQI20.N.CU.5a	0,330	0	0	0	67		X	CC	Espessura de 0,221mm,
SQI20.N.CU.5b	0,430	0	98	98	98		X	CC	Espessura de 0,422mm
SQI20.N.CU.6a	0,555	0	65	65	65		X	CP	Formação de produto na irregularidade com 0,36mm
SQI20.N.CU.6b	0,658	0	45	45	45		X	CC	Formação de produto incolor, espessura de 0,3mm
SQI20.N.CU.6c	0,575	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.R.CS.7a	1,024	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.R.CS.7b	0,750	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.R.CS.7d	0,986	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.R.CS.8a	1,229	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.R.CS.8b	1,095	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.R.CS.9b	0,387	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.R.CS.9c	0,228	0	100	100	100		X	CC	Espessura de 0,227mm
SQI20.R.CU.10b	0,516	0	100	100	100		X	CC	Espessura de 0,5mm
SQI20.R.CU.11a	0,311	0	100	143	143		X	CC	Espessura de 0,447mm
SQI20.R.CU.11b	0,308	0	65	65	65	X		CC	Espessura de 0,2mm
SQI20.R.CU.12a	0,413	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.R.CU.12b	0,479	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.R.CU.12c	0,475	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CS.13a	0,301	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CS.13b	0,532	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CS.13c	0,345	0	0	83	83		X	CP	Espessura de 0,286mm
SQI20.N.CS.14b	0,593	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CS.14c	0,577	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CS.14d	0,569	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CS.15a	0,502	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CS.15b	0,654	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CS.15c	0,58	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CU.16b	0,557	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CU.16c	0,281	0	0	0	0			PBE	
SQI20.N.CU.17b	0,980	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CU.17c	0,642	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CU.18a	0,474	0	0	58	58		X	CC	Espessura de 0,273mm
SQI20.N.CU.18c	0,367	0	0	0	0		X	PBE	
SQI20.N.CU.18d	0,479	0	0	0	0		X	PBE	

Tabela D.3- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável SQI, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SQI30

Amostra	e(mm)	% de cicatrização nas idades de análise (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SQI30.N.CS.1a	0,417	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.N.CS.1b	0,548	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.N.CS.1c	0,458	0	0	0	79		X	CC	Espessura de 0,364mm
SQI30.N.CS.2a	0,341	0	0	0	53		X	CC	Espessura de 0,182mm
SQI30.N.CS.2c	0,388	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.N.CS.3a	0,539	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.N.CS.3b	0,805	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.N.CU.4a	0,603	0	0	0	54		X	CC	Espessura de 0,325mm
SQI30.N.CU.4b	0,682	0	0	0	88		X	CP	Espessura de 0,6mm
SQI30.N.CU.4c	0,587	0	0	0	31		X	CP	Espessura de 0,184mm
SQI30.N.CU.5a	0,444	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.N.CU.5b	0,386	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.N.CU.6a	0,534	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.N.CU.6b	0,457	0	0	0	0		X	PBE	Próximo de CC
SQI30.N.CU.6c	0,603	0	0	0	26	X		CC	Espessura de 0,159mm
SQI30.R.CS.7a	0,636	0	0	120	120		X	CC	Espessura de 0,766mm
SQI30.R.CS.7b	0,682	0	0	118	118		X	CC	Espessura de 0,806mm
SQI30.R.CS.7c	0,587	0	0	93	93		X	CC	Espessura de 0,543mm
SQI30.R.CS.8a	0,406	0	0	134	134		X	CC	Espessura de 0,543mm
SQI30.R.CS.8b	0,618	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.R.CS.8c	0,415	0	0	131	131		X	CC	Espessura de 0,543mm
SQI30.R.CS.9a	0,299	0	0	87	87		X	CC	Espessura de 0,259mm
SQI30.R.CS.9b	0,570	0	0	88	88	X		CC	Espessura de 0,504
SQI30.R.CS.9c	0,365	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.R.CU.10a	0,428	0	0	169	169		X	CP	Espessura de 0,724mm
SQI30.R.CU.10b	0,551	0	0	61	61		X	CP	Espessura de 0,337mm
SQI30.R.CU.10c	0,394	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.R.CU.11a	0,514	0	0	119	119		X	CC	Espessura de 0,611mm
SQI30.R.CU.11b	0,498	0	0	152	152		X	CC	Espessura de 0,755mm
SQI30.R.CU.11c	0,432	0	0	78	78		X	CC	Espessura de 0,339mm
SQI30.R.CU.12a	0,454	0	0	0	0		X	PBE	Material na superfície
SQI30.R.CU.12b	0,441	0	0	123	123		X	CC	Espessura de 0,543mm
SQI30.R.CU.12c	0,413	0	0	90	90		X	CC	Espessura de 0,371mm
SQI30.C.CS.13b	0,407	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CS.13d	0,344	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CS.14b	0,499	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CS.14c	0,309	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CS.15b	0,313	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CS.15c	0,425	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.16a	0,270	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.16b	0,579	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.16c	0,478	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.17a	0,511	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.17b	0,453	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.17c	0,828	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.17d	0,610	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.18a	0,476	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.18b	0,326	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.18c	0,451	0	0	0	0		X	PBE	
SQI30.C.CU.18d	0,369	0	0	0	0		X	PBE	

Tabela D.4 - Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável SQV, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SQV10

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SQV10.N.CS.1a	0,410	0	0	80	123		x	CC	Espessura de 0,505mm
SQV10.N.CS.1b	0,507	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.N.CS.1c	0,391	0	0	0	122		X	CC	Espessura de 0,476mm
SQV10.N.CS.2a	0,392	0	0	109	109		X	CC	Espessura de 0,429mm
SQV10.N.CS.2b	0,791	0	0	83	83		X	CP	Espessura de 0,659mm
SQV10.N.CS.2c	0,591	0	0	107	107		X	CC	Espessura de 0,634mm
SQV10.N.CS.3a	0,367	0	0	149	149		X	CC	Espessura de 0,586mm
SQV10.N.CS.3b	0,497	0	0	159	159		X	CC	Espessura de 0,568mm
SQV10.N.CS.3c	0,421	0	0	67	67		X	CC	Espessura de 0,284mm
SQV10.N.CU.4a	0,275	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.N.CU.4b	0,499	0	0	108	108		X	CC	Espessura de 0,541mm
SQV10.N.CU.4c	1,250	0	0	63	63		X	CP	Espessura de 0,541mm
SQV10.N.CU.5b	0,485	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.N.CU.5c	0,565	0	0	135	135			CC	90% da amostra, espessura de 0,76mm
SQV10.N.CU.6a	0,440	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.N.CU.6c	0,729	0	0	73	73		X	CC	Espessura de 0,529mm
SQV10.R.CS.7b	0,258	0	0	171	171		X	CC	Espessura de 0,442mm
SQV10.R.CS.7c	0,343	0	0	124	124		X	CC	Espessura de 0,426mm
SQV10.R.CS.8a	0,329	0	0	144	144		X	CC	Espessura de 0,475mm
SQV10.R.CS.8b	0,369	0	208	208	208		X	CC	Espessura de 0,77mm
SQV10.R.CS.8c	0,451	0	0	92	92		X	CP	Espessura de 0,413mm
SQV10.R.CS.9b	0,561	0	0	129	129		X	CT	Espessura de 0,724mm
SQV10.R.CS.9c	0,333	0	0	136	136		X	CP	Espessura de 0,455mm
SQV10.R.CU.10a	0,661	0	0	110	110		X	CC	Espessura de 0,73mm
SQV10.R.CU.10b	0,708	0	0	73	73		X	CC	Espessura de 0,519mm
SQV10.R.CU.10c	0,469	0	0	130	130		X	CP	Espessura de 0,611mm
SQV10.R.CU.11b	0,425	0	0	231	231		X	CC	90% da amostra, espessura de 0,983mm,
SQV10.R.CU.11c	0,677	0	0	109	109		X	CC	Espessura de 0,74mm
SQV10.R.CU.12b	0,402	0	0	207	207		X	CC	Espessura de 0,835mm
SQV10.C.CS.13c	0,439	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.C.CS.14b	0,823	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.C.CS.15c	0,576	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.C.CS.15d	0,406	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.C.CU.16d	0,960	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.C.CU.17a	0,427	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.C.CU.17b	0,539	0	0	0	0		X	PBE	
SQV10.C.CU.17c	0,431	0	0	0	0		X	PBE	

Tabela D.5- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de SQV, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SQV20

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades de análise (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SQV20.N.CS.1a	0,384	0	0	57	57		X	CP	Espessura de 0,22mm
SQV20.N.CS.1b	0,426	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.N.CS.1c	0,516	0	0	69	69		X	CP	Espessura de 0,357mm
SQV20.N.CS.2a	0,27	0	0	76	76		X	CP	Espessura de 0,204mm

SQV20.N.CS.2c	0,333	0	0	110	110		X	CP	Espessura de 0,365mm
SQV20.N.CS.3a	0,641	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.N.CS.3b	0,819	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.N.CS.3c	0,618	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.N.CU.4a	0,526	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.N.CU.4b	0,442	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.N.CU.4c	0,397	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.N.CU.4d	0,442	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.N.CU.5b	0,248	0	0	156	156		X	CP	Espessura de 0,388mm
SQV20.N.CU.5c	0,407	0	0	68	68		X	CP	Espessura de 0,278mm
SQV20.N.CU.6a	0,64	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.N.CU.6b	0,564	0	0	151	151		X	CC	Espessura de 0,854mm
SQV20.N.CU.6c	0,451	0	0	129	129		X	CC	Espessura de 0,583mm
SQV20.R.CS.7a	0,479	0	148	148	148		X	CC	Espessura de 0,711mm
SQV20.R.CS.7b	0,397	0	140	140	140		X	CC	Espessura de 0,558mm
SQV20.R.CS.7c	0,277	0	164	164	164		X	CP	Espessura de 0,456mm
SQV20.R.CS.8a	0,297	0	112	112	112		X	CC	Espessura de até 0,332mm
SQV20.R.CS.8b	0,394	0	150	150	150		X	CC	Espessura de até 0,591mm
SQV20.R.CS.8c	0,341	0	146	146	146		X	CC	Espessura de até 0,498mm
SQV20.R.CS.9a	0,398	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.R.CS.9b	0,347	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.R.CS.9c	0,601	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.R.CS.9d	0,631	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.R.CU.10a	0,396	0	144	144	144		X	CP	Espessura de 0,571mm
SQV20.R.CU.10b	0,552	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.R.CU.10c	0,371	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.R.CU.11a	0,508	0	108	108	108		X	CC	Espessura de 0,549mm
SQV20.R.CU.11b	0,647	0	101	101	101		X	CC	Espessura de 0,651mm
SQV20.R.CU.11c	0,534	0	122	122	122		X	CC	Espessura de 0,654mm
SQV20.R.CU.12a	0,508	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.R.CU.12b	0,554	0	65	65	65	X		CC	Espessura de 0,361mm
SQV20.R.CU.12c	0,721	0	0	0	0		X	PBI	
SQV20.C.CS.13a	0,345	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.C.CS.13b	0,373	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.C.CS.15a	0,308	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.C.CS.15d	0,321	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.C.CU.16d	0,707	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.C.CU.17a	0,481	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.C.CU.17b	0,382	0	0	0	0		X	PBI	
SQV20.C.CU.17c	0,35	0	0	0	0		X	PBE	
SQV20.C.CU.18a	0,304	0	0	100	100		X	CC	Espessura de 0,304mm
SQV20.C.CU.18b	0,401	0	0	0	0		X	PBE	

Tabela D.6 - Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável SQV, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SQV30

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades de análise (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SQV30.N.CS.1b	0,482	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.N.CS.2b	0,801	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.N.CS.2c	0,723	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.N.CS.3a	0,556	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.N.CS.3b	0,871	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.N.CS.3c	0,628	0	32	32	32		X	CC	Espessura de 0,201mm

SQV30.N.CU.4a	0,610	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.N.CU.4b	0,838	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.N.CU.4c	0,595	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.N.CU.5a	0,550	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.N.CU.5d	0,594	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.N.CU.6a	0,274	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.R.CS.8a	0,575	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.R.CS.8b	0,651	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.R.CS.8c	0,666	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.R.CS.9a	0,396	0	0	120	120		X	CC	Espessura de 0,477mm
SQV30.R.CS.9b	0,653	0	0	178	178		X	CC	Espessura de 1,162mm
SQV30.R.CS.9c	0,510	0	0	141	141		X	CP	Espessura de 0,719mm
SQV30.R.CU.10a	0,844	0	0	0	0		X	PBI	
SQV30.R.CU.11a	0,435	0	56	56	56		X	CC	Espessura de 0,243mm
SQV30.R.CU.11b	0,602	0	114	125	125		X	CC	Espessura de 0,755mm
SQV30.R.CU.11c	0,535	0	89	89	89		X	CC	Espessura de 0,476mm
SQV30.R.CU.12a	0,434	0	108	108	108		X	CC	Espessura de 0,469mm
SQV30.R.CU.12b	0,789	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.R.CU.12c	0,535	0	63	63	63		X	CC	Espessura de 0,338mm
SQV30.C.CS.13a	0,684	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CS.13b	0,540	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CS.13c	0,587	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CS.13d	0,592	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CS.14a	0,826	0	0	0	22	X		CC	Espessura de 0,181mm
SQV30.C.CS.14b	0,458	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CS.14c	0,917	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CS.14d	0,776	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CS.15a	0,467	0	0	0	0		X	PBI	
SQV30.C.CS.15b	0,328	0	0	0	0		X	PBI	
SQV30.C.CS.15d	0,545	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CU.16a	0,745	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CU.16b	0,616	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CU.16c	0,691	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CU.16d	0,795	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CU.17a	0,856	0	0	0	0		X	PBE	
SQV30.C.CU.17b	1,165	0	0	0	28	X		CP	Espessura de 0,331mm
SQV30.C.CU.18b	0,898	0	0	0	0		X	PBI	
SQV30.C.CU.18d	0,874	0	0	0	0		X	PBE	

APÊNDICE E – TABELAS VERIFICADAS NOS TRAÇOS REFERENTES AO USO DE SB

Tabela E.1- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de SBI, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SBI10

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades de análise (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SBI10.N.CS.1a	0,328	0	94	94	94		X	CC	Espessura de 0,307mm
SBI10.N.CS.1b	0,282	0	174	174	174		X	CC	Espessura de 0,492mm
SBI10.N.CS.1c	0,276	0	162	162	162		X	CP	Espessura de 0,445mm
SBI10.N.CS.2a	0,401	0	62	62	62		X	CP	Espessura de 0,249mm
SBI10.N.CS.2b	0,399	0	118	118	118		X	CC	Espessura de 0,469mm
SBI10.N.CS.2c	0,327	0	78	78	78		X	CC	Espessura de 0,256mm
SBI10.N.CS.3a	0,499	0	99	99	99		X	CC	Espessura de 0,496mm
SBI10.N.CS.3b	0,793	0	69	69	69		X	CC	Espessura de 0,522mm
SBI10.N.CS.3c	0,618	0	61	61	61		X	CC	Espessura de 0,378mm
SBI10.N.CU.4b	0,675	0	0	0	0		X	PBE	
SBI10.N.CU.4c	0,53	0	53	53	53		X	CC	Espessura de 0,28mm
SBI10.N.CU.5b	0,717	0	0	0	0		X	PBE	
SBI10.N.CU.6a	0,578	0	0	0	0		X	PBI	
SBI10.N.CU.6b	0,673	0	248	248	248		X	CC	Espessura de 1,67mm
SBI10.N.CU.6c	0,478	0	71	71	71		X	CC	Espessura de 0,34mm
SBI10.R.CS.7a	0,403	0	124	124	124		X	CC	Espessura de 0,5mm
SBI10.R.CS.7b	0,431	0	255	255	255		X	CC	Espessura de 1,1mm
SBI10.R.CS.7c	0,31	0	187	187	187		X	CC	Espessura de 0,58mm
SBI10.R.CS.8a	0,658	0	0	0	0		X	PBE	
SBI10.R.CS.8b	0,611	0	0	0	0		X	PBE	
SBI10.R.CS.9a	0,491	0	187	187	187		X	CC	Espessura de 0,92mm
SBI10.R.CS.9b	0,482	0	240	240	240		X	CC	Espessura de 1,16mm
SBI10.R.CS.9c	0,3	0	250	250	250		X	CC	Espessura de 0,75mm
SBI10.R.CS.9d	0,47	0	0	0	0		X	PBI	
SBI10.R.CU.10a	0,358	0	0	0	0		X	PBI	
SBI10.R.CU.10b	0,517	0	135	135	135		X	CC	Espessura de 0,7mm
SBI10.R.CU.10c	0,44	0	218	218	218		X	CC	Espessura de 0,96mm
SBI10.R.CU.11a	0,452	0	130	130	130		X	CC	Espessura de 0,59mm
SBI10.R.CU.11b	0,554	0	125	125	125		X	CP	Espessura de 0,69mm
SBI10.R.CU.11c	0,394	0	94	94	94		X	CP	Espessura de 0,37mm
SBI10.R.CU.12a	0,16	0	33	33	33			CC	Espessura de 0,052mm
SBI10.R.CU.12b	0,52	0	117	117	117			CC	Espessura de 0,61mm
SBI10.R.CU.12c	0,429	0	84	84	84		X	CC	Espessura de 0,36mm
SBI10.C.CS.13a	0,433	0	48	48	48		X	CC	Espessura de 0,210mm
SBI10.C.CS.13b	0,47	0	0	0	0		X	PBE	
SBI10.C.CS.13c	0,32	0	131	131	131		X	CP	Espessura de 0,42mm
SBI10.C.CS.14a	0,33	0	0	0	0		X	PBE	
SBI10.C.CS.14b	0,29	0	0	0	0		X	PBI	
SBI10.C.CS.14c	0,423	0	0	0	0		X	PBE	
SBI10.C.CS.14d	0,3	0	0	0	0		X	PBE	Formato de placa
SBI10.C.CS.15a	0,463	0	82	82	82		X	CC	Espessura de 0,38mm
SBI10.C.CS.15b	0,493	0	168	168	168		X	CC	Espessura de 0,83mm
SBI10.C.CS.15c	0,243	0	136	136	136		X	CC	Espessura de 0,33mm
SBI10.C.CU.16a	0,293	0	174	174	174		X	CC	Espessura de 0,51mm

SBI10.C.CU.16b	0,306	0	100	140	140	X	CC	Espessura de 0,43 mm, de CP para CC
SBI10.C.CU.16c	0,25	0	112	112	112	X	CC	Espessura de 0,28mm
SBI10.C.CU.17b	0,33	0	0	100	100	X	CC	Espessura de 0,33mm
SBI10.C.CU.17c	0,193	0	0	200	200	X	CC	Espessura de 0,39mm
SBI10.C.CU.18a	0,696	0	0	0	0	X	PBI	
SBI10.C.CU.18b	0,63	0	0	0	0	X	PBI	
SBI10.C.CU.18c	0,873	0	0	0	0	X	PBI	
SBI10.C.CU.18d	0,643	0	0	0	0	X	PBI	

Tabela E.2- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de SBI, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SBI20

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades de análise (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SBI20.N.CS.1a	0,856	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.N.CS.1b	0,579	0	84	84	84		X	CC	Espessura de 0,489mm
SBI20.N.CS.2b	0,749	0	41	41	41	X		CC	Espessura de 0,308mm
SBI20.N.CS.2c	0,889	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.N.CS.2d	0,792	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.N.CS.3b	0,751	0	17	17	17	X		CC	Espessura de 0,126 mm
SBI20.N.CS.3c	0,911	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.N.CU.4b	0,671	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.N.CU.4c	0,704	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.N.CU.4d	0,712	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.N.CU.5a	0,662	0	0	0	0		X	PBI	
SBI20.N.CU.5d	0,520	0	0	0	0		X	PBI	
SBI20.N.CU.6a	0,645	0	0	0	0		X	PBI	
SBI20.N.CU.6b	0,784	0	70	70	70		X	CP	Espessura de 0,546mm
SBI20.N.CU.6c	0,711	0	0	0	0		X	PBI	
SBI20.N.CU.7a	0,487	146	146	146	146		X	CC	Espessura de 0,713mm
SBI20.R.CS.7b	0,686	0	120	120	120		X	CC	Espessura de 0,826mm
SBI20.R.CS.7c	0,511	0	128	128	128		X	CC	Espessura de 0,656mm
SBI20.R.CS.8a	0,518	0	88	88	88		X	CP	Espessura de 0,455mm
SBI20.R.CS.8b	0,509	0	162	162	162		X	CC	Espessura de 0,824mm
SBI20.R.CS.8c	0,337	0	223	223	223		X	CC	Espessura de 0,754mm
SBI20.R.CS.9a	0,823	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.R.CS.9b	0,708	0	128	128	128		X	CC	Espessura de 0,907mm
SBI20.R.CS.9c	0,972	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.R.CS.9d	0,956	0	44	44	44		X	CP	Espessura de 0,42mm
SBI20.R.CU.10a	0,867	0	0	0	0		X	PBI	
SBI20.R.CU.10b	0,849	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.R.CU.10c	1,005	0	0	0	0		X	PBI	
SBI20.R.CU.11a	0,831	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.R.CU.11b	0,733	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.R.CU.12a	0,638	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.R.CU.12b	0,448	0	163	163	163		X	CC	Espessura de 0,732mm
SBI20.R.CU.12c	0,791	0	42	42	42		X	CC	Espessura de 0,331mm
SBI20.R.CU.12d	0,718	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.C.CS.13a	0,456	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.C.CS.13b	0,631	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.C.CS.13c	0,432	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.C.CS.13d	0,491	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.C.CS.14a	0,242	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.C.CS.14b	0,512	0	0	0	0		X	PBE	
SBI20.C.CS.14c	0,315	0	135	135	135		X	CC	Espessura de 0,426mm
SBI20.C.CS.15b	0,579	0	59	59	59	X		CC	Espessura de 0,465mm

SBI20.C.CS.15c	0,569	0	0	0	0	X	PBI
SBI20.C.CS.15d	0,483	0	0	0	0	X	PBE
SBI20.C.CU.16a	0,559	0	0	0	0	X	PBE
SBI20.C.CU.16b	0,755	0	0	0	0	X	PBE
SBI20.C.CU.16c	0,647	0	0	0	0	X	PBI
SBI20.C.CU.16d	0,599	0	0	0	0	X	PBE
SBI20.C.CU.17a	0,779	0	0	0	0	X	PBE
SBI20.C.CU.17b	0,855	0	0	0	0	X	PBE
SBI20.C.CU.17d	0,792	0	0	0	0	X	PBI

Tabela E.3 - Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de SBI, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SBI30

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades de análise (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SBI30.N.CS.1a	0,4036	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.N.CS.1c	0,6766	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.N.CS.1d	0,429	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.N.CS.2a	0,475	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.N.CS.2b	0,393	0	39	39	39		X	CC Espessura de 0,154mm	
SBI30.N.CS.2d	0,343	0	133	133	133		X	CC Espessura de 0,459mm	
SBI30.N.CS.3a	0,523	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.N.CS.3b	0,348	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.N.CS.3c	0,34	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.N.CS.3d	0,352	0	77	77	77		X	CC Espessura de 0,272mm	
SBI30.N.CU.5b	0,290	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.N.CU.5c	0,467	0	101	101	101		X	CC Espessura de 0,471mm	
SBI30.N.CU.6a	0,488	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.N.CU.6b	0,356	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.N.CU.6d	0,472	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.N.CU.7b	0,500	105	105	105	105		X	CC Espessura de 0,527mm	
SBI30.R.CS.7c	0,854	51	51	51	51		X	CC Espessura de 0,435mm	
SBI30.R.CS.7d	0,487	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.R.CS.8a	0,432	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.R.CS.8b	0,471	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.R.CS.8c	0,636	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.R.CS.9b	0,460	130	130	130	130		X	CC Espessura de 0,596mm	
SBI30.R.CS.9c	0,634	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.R.CS.9d	0,610	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.R.CU.10a	0,319	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.R.CU.10b	0,409	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.R.CU.10c	0,458	94	94	94	94		X	CP Espessura de 0,429mm	
SBI30.R.CU.11a	0,225	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.R.CU.11b	0,394	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.R.CU.11c	0,573	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.R.CU.12a	0,757	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.R.CU.12b	0,449	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.R.CU.12c	0,592	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.C.CS.13b	0,249	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.C.CS.13c	0,414	0	102	102	102		X	CC Espessura de 0,424mm	
SBI30.C.CS.13d	0,314	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.C.CS.14a	0,316	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.C.CS.14b	0,467	0	142	142	142		X	CC Espessura de 0,661mm	
SBI30.C.CS.14c	0,674	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.C.CS.14d	0,779	0	0	0	0		X	PBE Formato de placa	
SBI30.C.CS.15a	0,415	0	87	87	87		X	CC Espessura de 0,363mm	

SBI30.C.CS.15b	0,518	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.C.CS.15c	0,445	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.C.CS.15d	0,203	0	179	179	179				Espessura de 0,364mm
SBI30.C.CU.16a	0,456	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.C.CU.16b	0,286	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.C.CU.16c	0,349	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.C.CU.16d	0,462	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.C.CU.17a	0,405	0	86	86	86		X	CC	Espessura de 0,349mm
SBI30.C.CU.17b	0,349	0	0	0	0		X	PBE	Formato de placa
SBI30.C.CU.17c	0,390	0	0	0	0		X	PBE	Formato de placa
SBI30.C.CU.18a	0,277	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.C.CU.18b	0,293	0	0	0	0		X	PBE	
SBI30.C.CU.18c	0,410	0	0	0	0		X	PBI	
SBI30.C.CU.18d	0,390	0	0	0	0		X	PBE	

Tabela E.4- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de SBV, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SBV10

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SBV10.N.CS.1a	0,506	0	0	0	36		X	CC	Espessura de 0,182mm
SBV10.N.CS.1d	0,534	0	0	0	125	X	X	CC	Espessura de 0,67mm
SBV10.N.CS.2a	0,450	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.N.CS.2b	0,493	0	0	113	113		X	CC	Espessura de 0,559mm
SBV10.N.CS.2c	0,419	0	0	43	43		X	CC	Espessura de 0,18mm
SBV10.N.CS.3b	0,419	0	85	85	85		X	CC	Espessura de 0,358mm
SBV10.N.CU.4a	0,488	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.N.CU.4b	0,560	0	0	49	49		X	CP	Espessura de 0,274mm
SBV10.N.CU.4d	0,551	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.N.CU.5a	0,506	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.N.CU.5b	0,348	0	158	158	158		X	CC	Espessura de 0,551mm
SBV10.N.CU.5c	0,589	0	51	51	51	X		CC	Espessura de 0,3mm
SBV10.N.CU.6a	0,570	0	0	56	56		X	CP	Espessura de 0,321mm
SBV10.N.CU.6b	0,602	0	0	40	40		X	CP	Espessura de 0,242mm
SBV10.R.CS.7a	0,556	0	0	135	135		X	CC	Espessura de 0,748mm, escorrimento na superfície
SBV10.R.CS.7b	0,809	0	0	71	71	X		CC	Espessura de 0,574mm
SBV10.R.CS.7c	0,450	0	0	87	87		X	CC	Espessura de 0,392mm
SBV10.R.CS.8a	0,498	0	0	84	84		X	CP	Espessura de 0,42mm. CP em diversos pontos
SBV10.R.CS.8d	0,524	0	129	129	129		X	CC	Espessura de 0,675mm
SBV10.R.CS.9a	0,581	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.R.CS.9b	0,547	0	0	92	92		X	CC	Espessura de 0,503mm
SBV10.R.CS.9c	0,357	0	0	105	105		X	CC	Espessura de 0,375mm
SBV10.R.CU.11a	0,404	0	0	129	129	X		CP	Espessura de 0,52mm, formato de placa
SBV10.R.CU.11c	0,372	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.R.CU.11d	0,498	0	0	92	92		X	CP	Espessura de 0,46mm
SBV10.C.CS.13b	0,326	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.C.CS.14a	0,375	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.C.CS.14b	0,418	0	0	135	135		X	CC	Espessura de 0,565mm
SBV10.C.CS.15a	0,352	0	0	0	0		X	CP	Espessura de 0,358mm
SBV10.C.CS.15c	0,420	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.C.CS.15d	0,704	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.C.CU.16b	0,301	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.C.CU.16c	0,444	0	0	0	0	X		PBE	
SBV10.C.CU.17a	0,366	0	0	0	0		X	PBE	
SBV10.C.CU.17b	0,360	0	0	123	123		X	CC	Espessura de 0,444mm.
SBV10.C.CU.18b	0,340	0	0	0	0		X	PBE	

Tabela E.5- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de SBV, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SBV20

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades de análise (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SBV20.N.CS.1b	0,615	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.N.CS.1d	0,584	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.N.CS.2b	0,476	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.N.CS.2c	0,488	0	0	0	0		X	PBI	
SBV20.N.CS.2d	0,511	0	0	0	0		X	PBI	
SBV20.N.CS.3a	0,639	0	0	0	72		X	CC	Espessura de 0,457mm
SBV20.N.CS.3b	0,421	0	0	62	62		X	CP	Espessura de 0,259mm
SBV20.N.CS.3d	0,41	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.N.CU.4a	0,551	0	0	0	0		X	PBI	
SBV20.N.CU.4d	0,755	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.N.CU.5d	0,791	0	0	0	0		X	PBI	
SBV20.N.CU.6a	0,526	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.N.CU.6c	0,51	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.N.CU.6d	0,566	0	0	151	151		X	CC	Espessura de 0,854mm,
SBV20.R.CS.7a	0,541	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20. R.CS.7b	0,648	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20. R.CS.7d	0,448	0	0	125	125	X	X	CC	Espessura de 0,561mm
SBV20.R.CS.8a	0,407	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.R.CS.8b	0,872	0	0	87	87		X	CC	Espessura de 0,762mm
SBV20.R.CS.8c	0,473	0	0	127	127		X	CC	Espessura de 0,599mm
SBV20.R.CS.9a	0,501	0	0	126	126		X	CC	Espessura de 0,634mm
SBV20.R.CS.9b	0,59	0	0	136	136		X	CC	Espessura de 0,803mm
SBV20.R.CS.9c	0,525	0	0	0	64		X	CC	Espessura de 0,336mm
SBV20.R.CU.10a	0,325	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.R.CU.10b	0,469	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.R.CU.10c	0,4	0	0	0	110		X	CC	Espessura de 0,439mm
SBV20.R.CU.10d	0,388	0	0	89	89			CC	Espessura de 0,345mm
SBV20.R.CU.11b	0,41	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.R.CU.11c	0,422	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.R.CU.12a	0,601	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.R.CU.12b	0,512	0	0	107	107		X	CC	Espessura de 0,55mm
SBV20.R.CU.12d	0,463	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.C.CS.13d	0,368	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.C.CS.14a	0,555	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.C.CS.14d	0,494	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.C.CU.16b	0,543	0	0	0	0		X	PBE	Formato de placa
SBV20.C.CU.17b	0,448	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.C.CU.18a	0,392	0	0	0	0		X	PBE	
SBV20.C.CU.18b	0,489	0	0	106	106		X	CC	Espessura de 0,518mm

Tabela E.6- Ocorrências relacionadas a produtos de cicatrização em amostras com variável de SBV, submetidas ao ensaio de tração na flexão- Traço SBV20

Amostra	e (mm)	% de cicatrização nas idades (dias)				Ponto de verificação		C	Observação
		7	28	56	84	FS	FP		
SBV30.N.CS.1a	0,296	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.N.CS.1b	0,27	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.N.CS.1c	0,327	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.N.CS.1d	0,253	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.N.CS.2a	0,478	0	84	84	84		X	CC	Espessura de 0,4mm
SBV30.N.CS.2b	0,399	0	0	0	0		X	PBE	

SBV30.N.CS.2d	0,611	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.N.CS.3a	0,366	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.N.CS.3b	0,379	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.N.CS.3c	0,433	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.N.CS.3d	0,435	0	0	0	0	X		PBE	
SBV30.N.CU.4a	0,592	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.N.CU.4b	0,396	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.N.CU.4c	SF	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.N.CU.4d	0,439	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.N.CU.5b	0,308	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.N.CU.5c	0,335	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.N.CU.5d	0,446	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.N.CU.6b	0,321	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.N.CU.6d	0,279	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.R.CS.7a	0,339	123	123	123	123		X	CC	Espessura de 0,418mm
SBV30.R.CS.7b	0,320	146	146	146	146		X	CC	Espessura de 0,466mm
SBV30.R.CS.7c	0,240	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.R.CS.7d	0,344	162	162	162	162		X	CC	Espessura de 0,556mm
SBV30.R.CS.8a	0,485	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.R.CS.8b	0,432	136	136	136	136		X	CC	Espessura de 0,589mm
SBV30.R.CS.8c	0,358	293	293	293	293		X	CC	Espessura de 1,049mm
SBV30.R.CS.8d	0,350	149	149	149	149		X	CC	Espessura de 0,5217mm
SBV30.R.CS.9a	0,765	74	74	74	74		X	CC	Espessura de 0,565mm
SBV30.R.CS.9b	0,742	65	65	65	65		X	CC	Espessura de 0,486mm
SBV30.R.CS.9c	0,312	185	185	185	185		X	CC	Espessura de 0,576mm
SBV30.R.CS.9d	0,736	92	92	92	92		X	CC	Espessura de 0,674mm
SBV30.R.CU.10a	0,632	34	34	34	34		X	CC	Espessura de 0,212mm
SBV30.R.CU.10b	0,412	71	71	71	71		X	CC	Espessura de 0,291mm
SBV30.R.CU.10c	0,641	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.R.CU.10d	0,687	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.R.CU.11a	0,540	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.R.CU.11b	0,467	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.R.CU.11c	0,365	158	158	158	158		X	CC	Espessura de 0,575mm
SBV30.R.CU.11d	0,503	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.R.CU.12a	0,466	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.R.CU.12b	0,355	89	89	89	89		X	CC	Espessura de 0,315mm
SBV30.C.CS.13a	0,513	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CS.13b	0,346	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CS.13c	0,382	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CS.14a	0,415	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CS.14b	0,318	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CS.14c	0,528	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CS.14d	0,459	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CS.15a	0,517	0	109	109	109		X	CC	Espessura de 0,565mm
SBV30.C.CS.15b	0,416	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CS.15c	0,362	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CS.15d	0,281	0	137	137	137		X	CC	Espessura de 0,386mm
SBV30.C.CU.16a	0,360	0	120	120	120			CC	Espessura de 0,432mm
SBV30.C.CU.16b	0,326	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CU.16c	0,504	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.C.CU.16d	0,516	0	150	150	150		X	CC	Espessura de 0,776mm
SBV30.C.CU.17a	0,427	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CU.17b	0,384	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CU.18a	0,398	0	144	144	144			CC	Espessura de 0,573mm
SBV30.C.CU.18b	0,582	0	0	0	0		X	PBE	
SBV30.C.CU.18c	0,650	0	0	0	0		X	PBI	
SBV30.C.CU.18d	0,799	0	0	0	0		X	PBE	