

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, na área de Infraestrutura Aeroportuária.

Emilio Minoru Takagi

**CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES COM CIMENTOS BRASILEIROS
DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO ATIVADOS POR CATALISADOR
CRISTALINO**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:


Prof. Dra. Maryangela Geimba de Lima
Orientadora

Prof. Dr. Celso Massaki Hirata
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Takagi, Emilio Minoru
Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino / Emilio Minoru Takagi.
São José dos Campos, 2013.
130 f.

Dissertação de mestrado – Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013. Orientadora: Profa. Dra. Maryangela Geimba de Lima.

1. Concretos. 2. Catalisadores. 3. Alto-forno.
I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Emilio Minoru Takagi

TÍTULO DO TRABALHO: Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativado por catalisador cristalino

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2013

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização

Emilio Minoru Takagi

Rua Dr. Mário de Moura e Albuquerque, 400 apto 64 A – Vila Sônia, São Paulo / SP

etakagi@ita.br

Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino

Emilio Minoru Takagi

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr.	Emmanuel Antônio dos Santos	Presidente – ITA
Profa. Dra.	Maryangela Geimba de Lima	Orientadora – ITA
Prof. Dr.	Paulo Roberto do Lago Helene	Membro externo – EPUSP
Prof. Dr.	Leonel Tula Sanabria	Membro externo – JHSF
Prof. Dr.	Paulo Ivo Braga de Queiroz	Membro interno – ITA

ITA

Dedicatória

À minha esposa Tsukie 月江,
aos meus filhos Daiki 大基 e Naoki 直基
e à família Takagi 高木

月 (Tsuki-lua)	江 (e-lago)	=	<i>lua refletida no lago</i>
大 (Dai-grande)	基 (ki-fundação)	=	<i>grande fundação</i>
直 (Nao-perpendicular)	基 (ki-fundação)	=	<i>fundação retilínea</i>
高 (Takai-alto)	木 (ki-árvore)	=	<i>árvore alta</i>

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Dr^a. Maryangela G. Lima pela amizade, pela compreensão e, também, pela orientação competente. A Dr^a. Julia W. Lencioni, pela paciência e compreensão dedicada nas relatorias. Suas orientações foram fundamentais para tornar este trabalho uma realidade.

Aos professores do ITA, em especial aqueles que ministraram disciplinas de pós-graduação: Dr. Marcelo De Julio, Dr. Régis Martins, Dr. Cláudio Jorge (CJ), Dr. Eliseu Lucena, Dr. Emmanuel dos Santos, Dr. Paulo Ivo (π) e Dr. Carlos Müller. Aos amigos da pós-graduação com quem convivi no ITA: Ronaldo Medeiros Jr., Carlos T. Balestra, Silvio Rodrigues e Thiago Nykiel.

Aos Dr. Paulo R. L. Helene e Dr. Selmo C. Kuperman pelo incentivo à produção científica desde a época de minha graduação, e pela inspiração e motivação contínua à pesquisa científica. Aos Dr. Leonel T. Sanabria, Dr. Ênio P. Figueiredo, Dr. Paulo F. A. Silva e Dr^a. M. Andréia Sarmiento pela escolha do tema concreto autocicatrizante ativado por catalisador cristalino para a pesquisa desta dissertação. Aos Eng^o. Paulo Helene, Eng^o. Carlos Britez, Eng^o. Bruno Contarini e Eng^o. Wanderley G. Corrêa e o Eng. Ivan Ramalho pela confiança em utilizar, em suas obras, o concreto autocicatrizante desenvolvido neste estudo.

A empresa MC-Bauchemie Brasil pelo suporte a este programa de pós-graduação desenvolvido no ITA, nas pessoas de Jaques Pinto, Nicolaus M. Müller, José R. Saleme Jr., Shingiro Tokudome e Juan C. Silvano, e ao Dr. Patrick F. McGrath da Xypex Chemical Corporation pelos conselhos fornecidos para execução dos ensaios deste estudo.

A toda minha família, em especial a minha esposa Tsukie e meus filhos Daiki e Naoki, aos meus pais e meus sogros, as minhas irmãs e cunhados que sempre acreditaram no meu sucesso e criaram todas as condições para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Por fim, um trabalho de pesquisa é sempre uma atividade coletiva. As referências bibliográficas são o vestígio mais evidente deste esforço coletivo. Porém dificilmente conseguem reconhecer a participação de todos os envolvidos. Portanto, para todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para poder realizar este meu mestrado, meu muito obrigado.

*“Innovation, you can’t make something out of nothing.
Deals are closed between people, not between companies”*

Heinrich W. Müller

RESUMO:

Em 1994, C. Dry foi a primeira pesquisadora a propor a introdução intencional de propriedades autocicatrizantes no concreto. A partir da criação do comitê técnico SHC 221 da RILEM em 2005, diferentes abordagens vêm sendo desenvolvidas para o estudo de um novo tipo de concreto que possua a capacidade de reparar suas próprias fissuras. Dentre estas abordagens, a cicatrização autógena se baseia em melhorar o mecanismo de colmatação natural do concreto. Neste estudo, a própria ocorrência da fissura é um dos mecanismos de gatilho, pois permite a penetração da água que ativa o catalisador cristalino, e expõe nas faces internas destas fissuras uma nova superfície formada por cimentos sub-hidratados e por escórias não ativadas. Este catalisador cristalino eleva a alcalinidade da água, dentro das fissuras, que favorecem a formação de produtos hidratados estáveis nas faces internas de fissuras estáticas com abertura de até 0,4 mm. Para a investigação deste mecanismo de gatilho, amostras de concreto foram moldadas utilizando a adição de catalisador cristalino, fibras de vidro e também três tipos de cimentos comerciais CP III RS, CP II-E e CP V ARI com percentuais distintos de escória de alto forno nas faixas de 55%, 34% e 0% respectivamente. Posteriormente, estes corpos de prova foram colocados na prensa e carregados com 90% da carga de ruptura, o que gerou fissuras no interior destes corpos de prova. Em seguida, foram mergulhados em água para disparar o mecanismo de autocicatrização, para então serem submetidos à ensaios de laboratório após 28 dias, 56 dias e 84 dias. Os resultados dos ensaios, tais como, de recuperação das propriedades mecânicas e da estanqueidade mostram uma maior autocicatrização nas amostras com cimento CP III, CP V e CP II respectivamente. Portanto, se existe a tendência para uma autocicatrização mais lenta nas amostras com escória de alto forno (cimento CPIII e CP II) nas idades mais jovens comparados com as amostras com 100% de cimento Portland (cimento CP V), o comportamento hidráulico latente da escória de alto forno nas amostras é essencial para a sua autocicatrização em longo prazo.

Palavras-Chave: concreto autocicatrizante; concreto autoadensável; catalisador cristalino; escória de alto-forno.

ABSTRACT:

In 1994, C. Dry was the first researcher to propose the intentional introduction of self-healing properties in concrete. From the creation of the technical committee SHC 221 of RILEM in 2005, different approaches have been developed for the study of a new type of concrete that has the ability to repair their own cracks. Among these approaches, autogenous healing is based on improving the mechanism of natural healing of the concrete. In this study, the actual occurrence of the crack is one of the trigger mechanism, since it allows the penetration of water to activate the crystalline catalysts, and exposes the inner surfaces of these cracks a new surface formed by the sub-hydrated cement and non-activated slag. These catalysts crystalline raise the alkalinity of the water in the cracks, which favor the formation of stable hydrated products on the internal faces of static cracks with a width up to 0.4 mm. For the investigation of the trigger mechanism, have been molded test samples using specific crystalline catalysts, AR glass fiber and also three types of commercial cements CP III RS, CP II-E and CP V ARI with distinct percentages of blast furnace slag in the range of 55%, 34% and 0% respectively. Subsequently, these specimens were placed in the press and loaded with 90% of the failure load, which caused cracks within these specimens. Then, they were immersed in water to trigger the self-healing mechanism, to then be subjected to laboratory tests after 28 days, 56 days and 84 days. The results of tests such as the recovery of the mechanical properties and watertightness show a higher self-healing in the samples with CP III RS, CP V ARI and CP II-E cement respectively. So if there is a tendency for a slower self-healing in samples with blast furnace slag (CP III and CP II slag cement) in an early age than compared with the samples with 100% Portland cement (CP V cement), the latent hydraulic behavior of blast furnace slag is critical to its self-healing in long term.

Keywords: *self-healing concrete; self-compacting concrete; crystalline catalyst; blastfurnace slag.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura 1 – Evolução da quantidade de artigos técnicos publicados sobre materiais autocicatrizantes (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2183).....</i>	<i>1</i>
<i>Figura 2 - Imagem do domo “Opus Caementicium” do Panteão de Roma (Imagem de Eugen Kleen) (VAN TITTELBOOM, DE BELIE, et al., 2012, p. 333).</i>	<i>2</i>
<i>Figura 3 – Concreto autocicatrizante da laje de subpressão do Museu da Imagem e do Som M.I.S. – RJ (Foto do PhD Engenharia).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 4 – Concreto autocicatrizante da cobertura fluida do Museu de Arte do Rio - M.A.R. - RJ (Foto do autor).</i>	<i>7</i>
<i>Figura 5 – Fotografia do preenchimento da fissura com o adesivo de reparo incorporado no concreto do pavimento de ponte (DRY, 2000, p. 1975)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 6 – Esquema de circuitos impressos eletrônicos autocicatrizantes de White (KRAMER, BLAISZIK, et al., 2011).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 7 - Cicatrização autônoma baseada em cápsulas ou nos sistemas vasculares com agentes cicatrizantes bicomponentes (Adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2188 e 2191).</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8 – Abordagens de cicatrização autógenas. (A) restrição da abertura de fissura, (B) o fornecimento de água, e (C) hidratação contínua e a cristalização (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2185).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9 - Diferentes causas que podem levar à colmatação natural de uma fissura (RILEM, 2013, p. 65)</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10 - Micrografias da pasta carbonatada com escória de alto-forno altamente porosa (esquerda) e da microestrutura mais densa incorporando monofluorofosfato de sódio (direita)....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11 – Formação de cristais de C-S-H devido a capacidade de troca de cátions do catalisador cristalino (Adaptado de TAKAGI, KURAMOTO e SHIMIZU, 1996, p. 98).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 12 – Representação simplificada da precipitação de CaCO₃ induzida por bactérias ureolíticas (DE MUYNCK, DE BELIE e VERSTRAETE, 2010, p. 126).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 13 – Fissuramento intenso visto pelo lado inferior do pavimento em concreto com aberturas entre 0,1 a 0,2 mm (MORI, KURAMOTO, et al., 1996, p. 344).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 14 - Amostras para o ensaio de resistência à compressão axial e ensaio de permeabilidade (Fotos do autor).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 15 – A tendência à diminuição do volume de água passante das amostras tratadas evidencia a sua capacidade de autocicatrização (MORI, KURAMOTO, et al., 1996, p. 345)</i>	<i>34</i>
<i>Figura 16 - Amostras para o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Fotos do autor).....</i>	<i>35</i>

<i>Figura 17 – Micrografias de cristais nas fissuras tratadas com o catalisador cristalino (A) e apenas a parede do gel nas amostras não tratadas (B) (MORI, KURAMOTO, et al., 1996, p. 345).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 18 – Aspecto do aditivo catalisador cristalino fornecido na forma de pó.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 19 – Concreto sem aditivos químicos com consistência coesa e seca (abatimento de 0 cm).</i>	<i>56</i>
<i>Figura 20 – – Concreto com aditivo superplastificante polifuncional com abatimento 8 cm.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 21 - – Concreto com superplastificante de policarboxilato com espalhamento > 700 mm..</i>	<i>57</i>
<i>Figura 22 – Detalhe das bordas do espalhamento do concreto sem exsudação</i>	<i>58</i>
<i>Figura 23 - Diagrama esquemático do teste absorção por capilaridade (SAHMARAN, KESKIN, et al., 2008, p. 875).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 24 - Arranjo experimental da célula de ensaio de difusão de cloretos (Adaptado de MEDEIROS, FILHO e HELENE, 2009, p. 131).....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 25 – Comportamento da resistência à compressão devido a fissuração e ao efeito autocicatrizante das microfissuras</i>	<i>68</i>
<i>Figura 26 – Comparativo das propriedades mecânicas de perda por fissuração e recuperação por cicatrização entre os 3 tipos de cimentos.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 27 - Comparação da taxa de absorção de água dos amostras fissuradas (F) e fissuradas/cicatrizadas (F/C) para os cimentos CP III 40 RS, CP II- E 40 e CP V ARI plus.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 28 – Comparativo da taxa de absorção entre os 3 tipos de cimentos.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 29 – Redução percentual da difusão de cloretos comparando os 3 cimentos.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 30 - Vista lateral e vista por cima da configuração da fissuração por compressão diametral (RILEM, 2013, p. 30)</i>	<i>99</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Visão geral dos mecanismos que podem disparar a autocicatrização de fissuras (Adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2202).</i>	15
<i>Tabela 2 - Visão geral dos agentes cicatrizantes que têm sido relatados na literatura (Adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2193).</i>	16
<i>Tabela 3 - Técnicas utilizadas para avaliação da eficiência da autocicatrização (Adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2205).</i>	32
<i>Tabela 4 – Comparativo dos estudos de Sahmaran et al.</i>	36
<i>Tabela 5 – Normas de especificação dos cimentos utilizados</i>	40
<i>Tabela 6 – Composições básicas das matérias-primas dos cimentos</i>	41
<i>Tabela 7 - Relatório dos ensaios físicos do cimento CP V ARI plus utilizado.</i>	41
<i>Tabela 8 - Relatório dos ensaios físicos do cimento CP II E 40 utilizado.</i>	42
<i>Tabela 9 - Relatório dos ensaios físicos do cimento CP III 40 RS utilizado</i>	42
<i>Tabela 10 - Relatório dos ensaios químicos do CP V ARI plus</i>	43
<i>Tabela 11 - Relatório dos ensaios químicos do CP II E 40.</i>	43
<i>Tabela 12 - Relatório dos ensaios químicos do CP III 40 RS.</i>	44
<i>Tabela 13 - Relatório dos ensaios químicos do catalisador cristalino.</i>	44
<i>Tabela 14 - Características dos agregados miúdos</i>	45
<i>Tabela 15 - Características do agregado graúdo</i>	46
<i>Tabela 16 – Tipo e quantidades de corpos de prova para o ensaio exploratório.</i>	47
<i>Tabela 17 – Dosagens utilizadas do catalisador cristalino no ensaio simplificado</i>	47
<i>Tabela 18 Composição padrão do concreto simples (kg/m³).</i>	48
<i>Tabela 19 – Traço consolidado com consumo de água e cimento fixos.</i>	48
<i>Tabela 20 – Quantidade de materiais necessários para o ensaio simplificado.</i>	48
<i>Tabela 21 – Plano do ensaio exploratório simplificado</i>	49
<i>Tabela 22 – Comparativo entre os estudos de Sahmaran et al de 2008 e 2013.</i>	50
<i>Tabela 23 – Plano de ensaios específicos do programa experimental.</i>	51
<i>Tabela 24 – Tipo e quantidades de corpos de prova por ensaio.</i>	52
<i>Tabela 25 – Quantidade de materiais necessários para este estudo.</i>	52

<i>Tabela 26 – Dosagens utilizadas do catalisador cristalino e das fibras de vidro</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 27 – Dosagens dos aditivos químicos utilizados no concreto autoadensável</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 28 – Composição padrão da dosagem ajustada do concreto utilizado (kg/m³).....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 29 – Traço consolidado com consumo de água e cimento fixos.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 30 – Plano de ensaio de resistência à compressão axial</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 31 – Cronograma de ensaio de resistência à compressão axial</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 32 - Ensaio de determinação da velocidade de propagação ultrassônica.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 33 - Ensaio de absorção por capilaridade</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 34 - Plano de ensaios de difusão de íons cloreto</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 35 - Classificação da permeabilidade do concreto quanto aos cloretos baseada na carga passante. Traduzido de ASTM C1202 (2005).....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 36 – Resultados dos ensaios de penetração de água sob pressão</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 37. Propriedades no estado fresco dos traços de concretos utilizados.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 38 – Propriedades da resistência à compressão do concreto (MPa)</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 39 – Comportamento da resistência à compressão a fissuração e ao efeito autocicatrizante.</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 40 – Propriedades da velocidade de propagação de onda ultrassônica (m/s)</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 41. Taxa de absorção de água das amostras ensaiadas logo após a fissuração (F).....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 42. Taxa de absorção das amostras fissuradas aos 28 dias e cicatrizadas até 56 dias (FC).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 43. Taxa de absorção de água das amostras ensaiadas logo após a fissuração (F).....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 44. Taxa de absorção das amostras fissuradas aos 28 dias e cicatrizadas até 56 dias (FC).....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 45. Taxa de absorção de água das amostras ensaiadas logo após a fissuração (F).....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 46. Taxa de absorção das amostras fissuradas aos 28 dias e cicatrizadas até 56 dias (FC).....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 47 – Resumo das taxas de absorção dos cimento CP III fissurados (F) e cicatrizados (FC)</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 48 - Difusão de íons cloretos em amostras ensaiadas logo após o fissuramento.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 49 – Difusão de íons cloretos após 28 dias de cicatrização.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 50 – Redução percentual da difusão de íons cloreto nos concretos após 28 dias de cicatrização</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 51 – Propriedades dos corpos de prova fissurados não cicatrizados.....</i>	<i>83</i>

<i>Tabela 52 – Propriedades dos corpos de prova fissurados e cicatrizados.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 53 - Recuperação da resistência à compressão.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 54 – Velocidade de propagação ultrassônica.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 55 – Redução da taxa de absorção de água</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 56 – Redução da carga de difusão de cloretos</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 57 – Considerações sobre os ensaios simplificado e específicos quanto a autocicatrização</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 58 – Parâmetros de ensaios para continuação dos trabalhos.....</i>	<i>100</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo geral	4
1.2	Justificativa e relevância do tema.....	4
1.3	Centro de pesquisas e pesquisadores	7
1.4	Estrutura da dissertação.....	10
2	FENÔMENO DE AUTOCICATRIZAÇÃO NO CONCRETO	11
2.1	Abordagens para a autocicatrização	14
2.2	Diferentes tipos de mecanismos de gatilho da cicatrização.....	15
2.3	Eficiência de diferentes tipos de agentes cicatrizantes	16
2.4	Autocicatrização autógena do concreto	17
2.4.1	Colmatação natural do concreto.....	18
2.4.2	Cimentos com escória de alto forno como agentes cicatrizantes.....	19
2.4.3	Catalisador cristalino como agente cicatrizante	21
2.4.4	Restrição por fibras como agente cicatrizante.....	24
2.4.5	Exposição à água como agente cicatrizante	25
2.4.6	Esporos de bactérias e seus nutrientes como agente cicatrizante	26
2.5	Mecanismos da cicatrização autógena	29
2.5.1	Mecanismo de cicatrização por hidratação contínua	29
2.5.2	Mecanismo de cicatrização química.....	30
2.5.3	Mecanismo de cicatrização microbiológica	31
2.6	Técnicas para a avaliação da autocicatrização	31
2.6.1	Estudo do catalisador cristalino em concretos autocicatrizantes.....	33
2.6.2	Estudo das adições minerais nos concretos autocicatrizantes	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1	Programa experimental.....	38

3.2	<i>Materiais utilizados</i>	39
3.3	<i>Caracterização dos materiais</i>	40
3.3.1	<i>Cimentos comerciais</i>	40
3.3.2	<i>Catalisador cristalino</i>	44
3.3.3	<i>Fibras</i>	45
3.3.4	<i>Água</i>	45
3.3.5	<i>Agregados</i>	45
3.4	<i>Ensaio simplificado para o concreto aut cicatrizante</i>	47
3.4.1	<i>Definição dos traços</i>	47
3.4.2	<i>Ensaio de penetração de água sob pressão</i>	49
3.5	<i>Ensaio específico para o concreto aut cicatrizante</i>	50
3.5.1	<i>Definição dos traços</i>	52
3.5.2	<i>Sequência de mistura na betoneira</i>	55
3.5.3	<i>Ensaio de controle da reologia do concreto autoadensável</i>	58
3.5.4	<i>Ensaio de resistência à compressão axial (RCA)</i>	59
3.5.5	<i>Ensaio de determinação da velocidade de propagação ultrassônica</i>	60
3.5.6	<i>Ensaio de absorção por capilaridade</i>	60
3.5.7	<i>Ensaio de difusão de íons cloretos</i>	62
4	<i>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</i>	64
4.1	<i>Ensaio simplificado para o concreto aut cicatrizante</i>	64
4.1.1	<i>Resultados dos ensaios de penetração de água sob pressão</i>	64
4.2	<i>Ensaio específico para o concreto aut cicatrizante autoadensável</i>	65
4.2.1	<i>Resultados dos ensaios de reologia do concreto autoadensável</i>	65
4.2.2	<i>Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial (RCA)</i>	66
4.2.3	<i>Resultados dos ensaios de velocidade de propagação ultrassônica</i>	69
4.2.4	<i>Resultados dos ensaios de absorção por capilaridade</i>	70
4.2.5	<i>Resultados dos ensaios de difusão de íons cloretos</i>	80
4.3	<i>Discussão dos resultados</i>	83

4.3.1	<i>Corpos de prova fissurados e não cicatrizados</i>	83
4.3.2	<i>Efeitos da autocicatrização</i>	85
5	<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	91
5.1	<i>Conclusões</i>	95
5.2	<i>Sugestões para continuação dos trabalhos</i>	98
6	<i>REFERÊNCIAS</i>	101
	<i>ANEXO Pesquisadores no campo dos Concretos Autocicatrizantes.</i>	108

1 INTRODUÇÃO

Em 1994, a pesquisadora Dra. Carolyn M. Dry (*apud* VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2182) da Universidade de Illinois foi a primeira a propor a introdução intencional de propriedades autocicatrizantes no concreto.

Dry começou a trabalhar em um concreto autocicatrizante que pudesse ser melhorado com a adição de fibras ocas de polipropileno preenchidas com adesivo de metil metacrilato, como agente cicatrizante, e conforme uma fissura se propaga, as fibras se rompem e liberam o adesivo que cicatriza esta fissura de modo ativo (DRY, 1994, p. 118).

Mas foi apenas em 2001, quando o pesquisador Dr. Scott R. White (*apud* VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2183) do Departamento de Engenharia Aeroespacial da Universidade de Illinois, publicou seus resultados na revista **Nature** sobre o fenômeno da autocicatrização em materiais poliméricos, que o interesse da comunidade acadêmica pelo tema dos materiais autocicatrizantes aumentou rapidamente (Figura 1 - Slide mostrado por White durante a Conferência Internacional sobre Materiais Autocicatrizantes ICSHM 2011 em Bath (Reino Unido)).

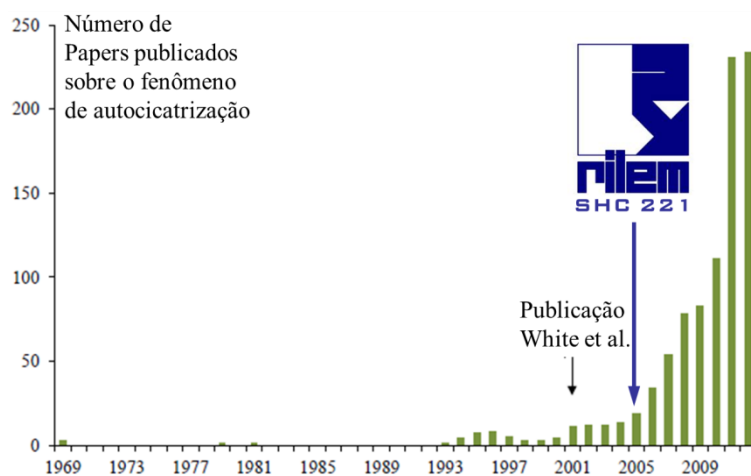


Figura 1 – Evolução da quantidade de artigos técnicos publicados sobre materiais autocicatrizantes (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2183).

Em 2005, foi criado pela RILEM um comitê técnico para o estudo dos “Fenômenos de autocicatrização em materiais de base cimentícia”, inspirados nas antigas estruturas centenárias que tem sobrevivido por séculos, devido à capacidade de colmatação natural dos aglomerantes utilizados para cimentar os blocos destas construções (Figura 2) (RILEM, 2005).

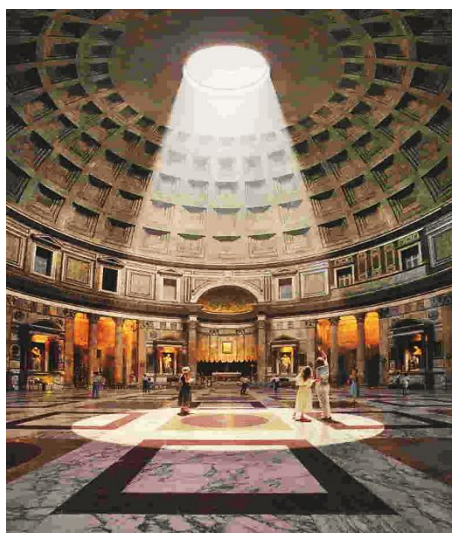


Figura 2 - Imagem do domo “Opus Caementicium” do Panteão de Roma (Imagem de Eugen Kleen) (VAN TITTELBOOM, DE BELIE, *et al.*, 2012, p. 333).

A partir da criação do comitê técnico SHC 221 da RILEM, diferentes abordagens vêm sendo desenvolvidas para o estudo de um novo tipo de concreto que possua a capacidade de reparar suas próprias fissuras. A autocicatrização em materiais cimentícios pode ser classificada em geral em dois grupos: a autocicatrização autógena e a autocicatrização autônoma (VAN TITTELBOOM, SNOECK, *et al.*, 2013, p. 406).

A autocicatrização autógena refere-se a uma capacidade curativa, onde a cicatrização é intrínseca, ou seja, provocada por componentes do material cimentício que também podem estar presentes quando o concreto não é dosado especificamente para a autocicatrização. A cicatrização autônoma são aquelas baseadas em microcápsulas preenchidas com agentes cicatrizantes ou na vascularização de tubos ocos que bombeiam os agentes cicatrizantes para as fissuras (VAN TITTELBOOM, DE BELIE, *et al.*, 2011, p. 504).

Embora, as perspectivas futuras mais interessantes para o concreto autocicatrizante sejam as pesquisas que sugeriram foco na abordagem pela cicatrização autônoma com agentes cicatrizantes bicomponentes em cápsulas ou sistemas vasculares (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2207). A abordagem que está mais perto da aplicação prática ainda é a autocicatrização autógena.

Existem alguns mecanismos para que ocorra a autocicatrização autógena no concreto. Por exemplo, a colmatação natural do concreto, com o preenchimento e selamento de fissuras em função de reações químicas inerentes ao concreto (ex. hidratação residual e carbonatação) ou bloqueio mecânico da face interna da fissura (EDVARSEN, 1999, p. 449).

A cicatrização de fissuras devido às adições minerais na dosagem do concreto, sendo que entre os componentes mais conhecidos estão as escórias de alto-forno (SAHMARAN, YILDIRIM e ERDEM, 2013, p. 90), as cinzas volantes (SAHMARAN, KESKIN, *et al.*, 2008, p. 873), as microssílicas (ELHAKAM, MOHAMED e AWAD, 2012, p. 422) e os metacaulins. Para controle de abertura de fissuras são misturadas fibras sintéticas de aço, de polietileno (PE) (HOMMA, MIHASHI e NISHIWAKI, 2009, p. 218), de polipropileno (PP) (DRY, 2000, p. 1970) e de vidro resistente a álcalis (TAKAGI, LIMA e HELENE, 2012, p. 173).

Aparentemente, os mecanismos com uma maior capacidade de cicatrização dependem de componentes especiais como: o catalisador cristalino (TAKEBE, SHIMOOKA, *et al.*, 1989, p. 3), aditivos expansores a base de sulfoaluminato de cálcio (AHN e KISHI, 2010, p. 173), as fibras de resina de álcool de polivinila (PVA) (KONG, BIKE e LI, 2003, p. 333), as fibras superelásticas de ligas metálicas com memória de forma (KUANG e OU, 2008, p. 3), as microfibras de carbono (YANG, HOLLAR, *et al.*, 2010, p. 10) os hidrogéis de polímeros superabsorventes (KIM e SCHLANGEN, 2011, p. 28), e os esporos de bactérias e seus nutrientes (DE MUYNCK, DE BELIE e VERSTRAETE, 2010, p. 130)

A formulação de concretos autocicatrizantes pela abordagem autógena é uma evolução tecnológica que converge também para a tecnologia do concreto autoadensável (CAA) (SAHMARAN, KESKIN, *et al.*, 2008, p. 872), que é fruto da pesquisa aplicada ao uso de aditivos superplastificantes e aditivo modificador de viscosidade, combinados com alto teor de finos, sejam, adições minerais, fillers ou mesmo cimentos comerciais compostos com adições minerais.

A fim de contribuir para o conhecimento dos concretos autocicatrizantes foi escolhida a abordagem pela cicatrização autógena para o programa experimental desta dissertação. Este estudo comparativo de concreto autocicatrizantes autoadensáveis utilizando cimentos comerciais com diferentes teores de escórias de alto-forno, catalisador cristalino, fibras de vidro e aditivos químicos, e visa caracterizar possível potencial de cicatrização autógena de fissuras destes concretos, analisando suas características reológicas, de resistência e de estanqueidade.

1.1 Objetivo geral

Este estudo visa comparar a influência de cimentos disponíveis no mercado nacional com percentuais distintos de escória de alto forno visando caracterizar possível potencial de cicatrização autógena de fissuras no concreto considerando uma aplicação mais próxima da prática em obras.

1.2 Justificativa e relevância do tema

O concreto é muito sensível à formação de fissuras. Quanto maior a abertura da fissura, maior é o comprometimento da sua durabilidade, sendo necessário o seu reparo. No entanto, as tecnologias convencionais de tratamento de fissuras com injeção de resinas aumentam o custo do ciclo de vida deste concreto.

A introdução intencional de propriedades autocicatrizantes no concreto poderia ser altamente benéfica, pois representa uma economia de custos diretos de produtos e mão de obra dos serviços de reparo, e também de custos indiretos porque estas estruturas necessitariam ficar em desuso durante o seu reparo e manutenção.

A relevância desta de pesquisa é apresentar o desenvolvimento da tecnologia de concreto autocicatrizantes pela abordagem autógena, buscando dentre os cimentos comerciais, com maior potencial de autocicatrização para estudos de dosagem de concreto autocicatrizantes. A tecnologia dos concretos autocicatrizantes deste estudo foi utilizada recentemente nas concretagens da laje de subpressão do Museu da Imagem e do Som (M.I.S.) na região de Copacabana e da Cobertura Fluida do Museu de Arte do Rio (M.A.R.) no centro da cidade do Rio de Janeiro.

BRITEZ, HELENE, *et al.* (2013, p. 5) apresentaram um estudo de caso sobre os desafios envolvidos para concretagem da laje de subpressão em concreto armado da nova sede do M.I.S., com 1m de espessura e volume de 1200m³, situada a 50m da orla marítima. O traço do concreto com propriedades autocicatrizantes possuía relação água/aglomerante = 0,35 (vinculado a classe de agressividade) e, com consumo por m³ de 448 kg de cimento CP III-40 RS, adição de 30 kg sílica ativa e 4,5 kg de aditivo impermeabilizante por cristalização integral concentrado.

Os resultados demonstraram que a composição do concreto, o plano de concretagem e os procedimentos executivos empregados foram decisivos para promover uma estrutura íntegra e com propriedades estanques, dispensando, nesse caso, alternativas tradicionais e convencionais de impermeabilização., bem como algumas engenhosidades empregadas na construção dessa laje do M.I.S. (Figura 3).



Figura 3 – Concreto autocatrizante da laje de subpressão do Museu da Imagem e do Som M.I.S. – RJ (Foto do PhD Engenharia).

Para o traço do concreto da cobertura fluida do M.A.R., ALMEIDA (2013, p.104) especificou uma composição com relação água/aglomerante 0,45 (189 litros) e com consumo por m^3 de 391 kg de cimento CP III-40 RS, adição de 30 kg sílica ativa e 8,0 kg de agente cristalizante. A Figura 4 mostra esta cobertura, com 66 metros de comprimento e 25 m de largura ($1700 m^2$), que possui a forma de uma onda com desníveis de até 1,75 m e gera uma impressão de fluidez com diferentes espessuras predominantemente de 15 cm, e “flutua” a cerca de 30m de altura apoiada em 37 tubos de aço galvanizado. O maior desafio foi a preparação da fôrma desta cobertura fluida que foi moldada com peças de isopor EPS, com 6 m por 8m em média e em torno de 800 kg, pelo responsável pela Festa do Boi Garantido em Parintins – AM (WERNECK, 2010).

A concretagem da laje foi executada em apenas um dia, com uma concretagem ininterrupta de 13 horas, para evitar que a cobertura apresentasse junta de concretagem. Na concretagem dos $320 m^3$ de concreto, parte da água foi substituída por gelo, todos os concretos dos caminhões foram lançados em temperaturas entre $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, com a trabalhabilidade necessária e retardando a pega, garantindo para evitar ao máximo a fissuração. A laje foi calculada com uma taxa de armadura muito alta de $310\text{ kg}/m^2$ para apresentar um comportamento estrutural como casca de concreto (ALMEIDA, 2013 p. 103).



Figura 4 – Concreto autocicatrizante da cobertura fluida do Museu de Arte do Rio - M.A.R. - RJ (Foto do autor).

1.3 Centro de pesquisas e pesquisadores

A principal pesquisadora ativa, no tocante ao campo de concretos autocicatrizantes, é a Dra. Nele DE BELIE, chefe do Laboratório Magnel de Pesquisa do Concreto da Universidade de Ghent (Bélgica). Ela é membra ativa da comissão técnica SHC 221 da RILEM e coeditora do relatório de estado da arte “Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials” (RILEM, 2013), publicado no último congresso ICSHM 2013 em Ghent (Bélgica), onde foi uma das presidentes junto com o Dr. Sybrand VAN DER ZWAAG da Universidade de Tecnologia de Delft (Holanda).

No grupo de pesquisas da **Magnel** atuam: a Dra. Kim VAN TITTELBOOM, coeditora da publicação “Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials” (RILEM, 2013), e pesquisadora sobre a avaliação da eficiência da autocicatrização através de técnicas de tomografia computadorizada, da análise de emissão acústica e da radiografia por nêutrons. Como agentes cicatrizantes, utiliza adições minerais de escória de alto-forno e cinzas volantes, cápsulas tubulares preenchidas com poliuretano e bactérias ureolíticas como as *Bacillus sphaericus*. O Dr. Willem DE MUYNCK com estudos sobre a influência da dosagem de ureia e cálcio sobre a efetividade da

biodeposição de carbonatos induzidas por bactérias na superfície de materiais cimentícios para aumentar a sua durabilidade. A Dra. Jianyun WANG com estudos sobre o uso de gel de sílica e poliuretano, indicando que o poliuretano possui maior potencial para ser utilizado como um suporte de bactérias *Bacillus pasteurii* imobilizadas.

No comitê técnico SHC 221, atua como presidente o Dr. Erik SCHLANGEN e como secretário o Dr. Mario DE ROOIJ, ambos os coeditores da publicação do relatório do estado da arte “Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials” (RILEM, 2013). SCHLANGEN é chefe do grupo de pesquisa **Microlab** da Universidade de Delft (Holanda), suas áreas de pesquisa incluem o desenvolvimento de concreto autocicatrizante baseado no uso de um grupo específico de esporos de bactérias alcali-resistentes do gênero *Bacillus*, e de um concreto autocicatrizante que mimetiza o processo de cicatrização óssea colocando um núcleo poroso preenchido com agentes cicatrizantes internamente ao concreto.

No grupo de pesquisas da **Microlab** atuam: o Dr. Oguzhan ÇOPUROĞLU com os Dr. Klaas VAN BREUGEL e Dr. Guang YE que lideram estudos sobre a hidratação e a microestrutura do concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) e investigações sobre o potencial de bactérias e de aditivos cristalinos atuarem como agentes cicatrizantes no concreto, todos são membros ativos do comitê técnico SHC 221. O Dr. Henk JONKERS que desenvolve um bioconcreto autocicatrizante baseado em um sistema bicomponente com o uso de esporos de bactérias alcalifílicas encapsuladas em partículas porosas de argila expandida e de lactato de cálcio como nutriente.

O Dr. Victor C. LI da Universidade de Michigan (EUA) e seus colaboradores foram os primeiros a propor o uso dos compósitos cimentícios com endurecimento por deformação (CCED) reforçados com fibras hidrofílicas de PVA para restringir a largura da fissura e, assim, promover a cicatrização autógena. Concebido para atingir alta tolerância a danos em condições de intenso carregamento, e alta durabilidade em condições normais de serviço, o CCED demonstra uma

capacidade de deformação na flexão 300 – 500 vezes maior do que um concreto normal e, apresentam uma capacidade de deformação de até de 3% na tração direta de modo muito semelhante a um metal dúctil.

No grupo de pesquisas de LI atuam: o Dr. Shunzhi QIAN da Universidade Tecnológica de Nanyang (Singapura) sobre estudos sobre a otimização da distribuição de fibra de PVA ajustando a sequência de mistura do CCED e a biodeposição de calcita por bactérias. O Dr. Mustafa SAHMARAN da Universidade de Gaziantep (Turquia) sobre estudos de durabilidade do CCED microfissurado contendo grandes volumes de cinzas volantes (baixo e alto teor de cal) e escória de alto-forno.

No grupo de pesquisadores japoneses Dr. Hirozo MIHASHI e Dr. Tomoya NISHIWAKI da Universidade de Tohoku que são membros ativos do SHC 221, e desenvolvem estudos sobre a durabilidade de compósitos CCED reforçados com fibras. Os Dr. Toshiharu KISHI e Dr. Tae-Ho AHN da Universidade de Tóquio que possuem pesquisas sobre o efeito da incorporação de geomateriais, do aditivo expansivo à base de cálcio sulfoaluminato, do aditivo catalisador cristalino e de várias adições minerais no comportamento cicatrizante autógeno de concrete fissurados.

No Brasil, a Dra. Márcia A. SHIRAKAWA que faz parte do grupo de pesquisa da Escola Politécnica da USP em São Paulo. SHIRAKAWA possui estudos sobre a biocalcificação de materiais cimentícios com o uso de cianobactérias e bactérias ureolíticas da Coleção de Culturas do Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde (INCQS). Onde a bactéria *Pseudomonas putida* INQCS 113 deu a precipitação de carbonato de cálcio mais alta, consumindo em média 96% de ions de cálcio seguidas pela *Lysinibacillus sphaericus* INQCS 414 com 74%.

Dr. Eduardus A. B. KOENDERS do grupo de pesquisa de ÇOPUROĞLU da Universidade de Delft atua como professor visitante na UFRJ do Rio de Janeiro. KOENDERS desenvolve estudos

sobre o potencial de autocicatrização de compósitos CCED, incorporando grande quantidade de fibras de PVA, aditivo expansivo à base de cálcio sulfoaluminato e o catalisador cristalino. Os resultados da análise química mostram que os produtos da cicatrização são compostos por CaCO_3 , C-S-H e etringita.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação esta estruturada em seis capítulos, onde no capítulo 1 – *Introdução* tem o objetivo de expor de maneira clara e ordenada todos os passos desta pesquisa. O capítulo 6 apresenta as *Referências* da dissertação.

Desta forma, o capítulo 2 – *Fenômeno de autocicatrização no concreto* descreve os tipos de abordagens, os mecanismos de gatilho e os agentes cicatrizantes de fissuras no concreto.

O capítulo 3 – *Materiais e Métodos* apresenta os materiais e as metodologias empregadas no trabalho.

O capítulo 4 – *Apresentação e Análise dos Resultados* compara os resultados obtidos e a análise dos mesmos. Apresentando os resultados de reologia, da recuperação de resistência e da recuperação da estanqueidade.

Por fim, o capítulo 5. – *Considerações Finais* apresenta as *Conclusões* dos resultados dos ensaios, seguida por *Sugestões para Trabalhos Futuros*.

2 FENÔMENO DE AUTOCICATRIZAÇÃO NO CONCRETO

Embora os pesquisadores japoneses OHAMA, DEMURA e ENDO já tenham mencionado um concreto modificado com polímero epóxi sem o componente endurecedor, onde foi notado um efeito autocicatrizante das fissuras, a verdadeira pioneira na pesquisa em concreto autocicatrizante foi a Dra. Carolyn M. DRY (*apud* VAN TITTELBOOM, SNOECK, *et al.*, 2013, p. 406) da Universidade de Illinois. A primeira vez que ela propôs o uso de polímeros encapsulados para obter o concreto autocicatrizante foi em 1994, e continuou ativa dentro deste campo até 2003 (VAN TITTELBOOM, SNOECK, *et al.*, 2013, p. 406).

Dry mostra numa aplicação prática em obras de pavimentos de ponte, onde um concreto pudesse ser melhorado com adição de fibras ocas preenchidas com adesivos e conforme uma fissura se propaga, as fibras se rompem e liberam os adesivos que cicatrizam estas fissuras (Figura 5), Estes adesivos tiveram uma sobrevida por mais um ano, em condições de campo na região central de Illinois que vão desde temperaturas abaixo de zero até temperaturas para mais de 38 ° C (DRY, 2000, p. 1976)



Figura 5 – Fotografia do preenchimento da fissura com o adesivo de reparo incorporado no concreto do pavimento de ponte (DRY, 2000, p. 1975)

Dry conduziu um comparativo sobre a penetrabilidade de diferentes adesivos entre o reparo convencional e a autocicatrização autônoma de fissuras sobre o efeito do módulo de elasticidade considerando fatores como a capacidade de transferência de esforços, a variação da abertura da fissura, e a umidade no substrato. Seu estudo mostrou uma eficácia da autocicatrização autônoma, com os tubos ocos preenchidos com o adesivo, equivalente a injeção manual de resinas em fissuras no concreto (DRY, CORSAW e BAYER, 2003, p. 79).

Neste período, Dr. Victor LI (*apud* VAN TITTELBOOM, SNOECK, *et al.*, 2013, p. 406) iniciou suas pesquisas sobre concretos autocicatrizantes CCED reforçados com fibras na Universidade de Michigan.

A partir de 2000, os seguintes pesquisadores (*apud* VAN TITTELBOOM, SNOECK, *et al.*, 2013, p. 406): como os Dr. Hirozo MIHASHI e Dr. Tomoya NISHIWAKI *et al.* no Japão; os Dr. Ahmed LOUKILI e Dr. Sébastien GRANGER *et al.* na França; o Dr. C. JOSEPH *et al.* no Reino Unido e a Dra. Nynke TER HEIDE e Dr. Erik SCHLANGEN *et al.* na Holanda começaram suas pesquisas sobre os materiais autocicatrizantes cimentícios.

Em 2001, o experimento de White relata um compósito polimérico estrutural com a capacidade de cicatrizar fissuras de modo autônomo. O material incorpora um agente cicatrizante microencapsulado que é liberado após a intrusão da fissura. A polimerização do agente cicatrizante é então desencadeada pelo contato com um catalisador incorporado, resultando na adesão das faces internas da fissura e na recuperação média da resistência do material polimérico estrutural em 75% (WHITE, SOTTOS, *et al.*, 2001, p. 794).

Em experimentos subsequentes sobre circuitos impressos eletrônicos autocicatrizantes onde: (1) Microcápsulas cheios de metal líquido são dispersas no topo da película de ouro de um circuito impresso. (2) Quando o circuito é rompido, também provoca a ruptura das microcápsulas, (3) o metal líquido preenche a fissura (4) restaurando o circuito (Figura 6: Imagem de Scott R. White). Os resultados mostram que a condutividade elétrica foi restaurada em 90% das amostras e a capacidade de condução elétrica foi recuperada em 99% com uma solução de metal líquido, com nanopartículas de índio e gálio, que preencheu as fissuras nos circuitos eletrônicos impressos (KRAMER, BLAISZIK, *et al.*, 2011).

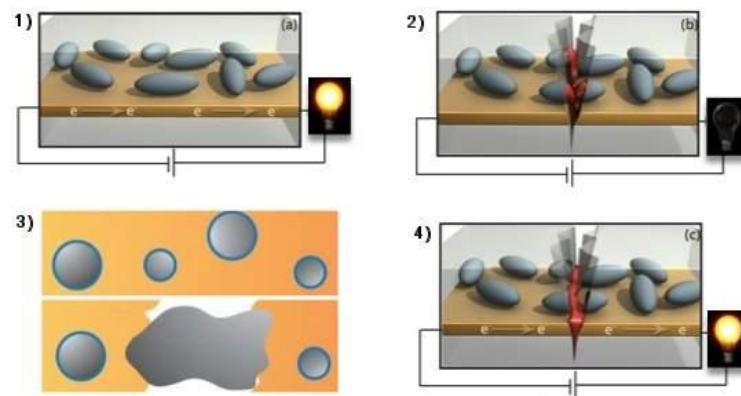


Figura 6 – Esquema de circuitos impressos eletrônicos autocicatrizantes de White (KRAMER, BLAISZIK, *et al.*, 2011).

As pesquisas de White geraram uma maior confiabilidade nos materiais autocicatrizantes, e foi resultado de uma iniciativa lançada pela NASA entre os institutos de ensino superior selecionados nos EUA em 1996, com investigações relacionados à autocicatrização também em outros campos da ciência dos materiais, e desde então, este campo tem se desenvolvido rapidamente.

2.1 Abordagens para a autocicatrização

A autocicatrização em materiais cimentícios pode ser classificada basicamente em dois grupos: autocicatrização autógena (autocicatrização intrínseca) e autocicatrização autônoma (baseada em cápsulas e autocicatrização vascular) semelhante às abordagens estabelecidas por White oriundas de seus estudos sobre a autocicatrização de polímeros (BLAISZIK, KRAMER, *et al.*, 2010).

No passado, uma grande quantidade de pesquisas foi dedicada à cicatrização autógena. Sendo que a abordagem pela cicatrização autógena até o momento ainda tem sido considerada como algo secundário. A primeira razão é que a cicatrização autógena permanecerá sempre limitada a pequenas fissuras estáticas, e a segunda razão é de que a confiabilidade de cicatrização autógena é menor, uma vez que sempre depende das possíveis reações de hidratação, no momento da formação da fissura (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2206).

As perspectivas futuras mais interessantes para o concreto autocicatrizante apontam para as pesquisas que sugiram foco na abordagem pela cicatrização autônoma baseada em cápsulas com agentes cicatrizantes que reajam com um segundo componente disperso na matriz do concreto (Figura 7 A), em cápsulas adicionais preenchidos com um segundo componente (Figura 7 B) ou nos sistemas vasculares como mostra a Figura 7 C (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2207).

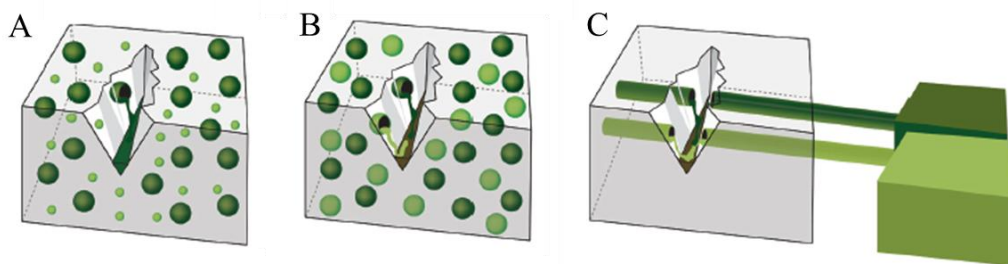


Figura 7 - Cicatrização autônoma baseada em cápsulas ou nos sistemas vasculares com agentes cicatrizantes bicomponentes (Adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2188 e 2191).

2.2 Diferentes tipos de mecanismos de gatilho da cicatrização

Para obter a cicatrização de fissuras, é necessário um mecanismo de gatilho para disparar a ação de cicatrização. Foram relatados na literatura até o momento, as que são disparadas por infiltração de líquidos ou gases, pelo fornecimento de calor ou pela formação de fissuras (Tabela 1).

Tabela 1 – Visão geral dos mecanismos que podem disparar a autocicatrização de fissuras (Adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2202)

Mecanismo de gatilho		Resultado
Ingresso de líquidos e gases	água + CO ₂	Cristalização por catalisador com precipitação de fases fibrosas de calcita
	água	Cicatrização autógena por hidratação contínua
	água + CO ₂	Cicatrização autógena por precipitação de CaCO ₃
	água	Expansão, intumescência e precipitação de aditivos
	água	Intumescência de polímeros superabsorventes e cicatrização autógena
	umidade relativa alta	Intumescência de polímeros superabsorventes e cicatrização autógena
	solução de cloretos	Degradação do revestimento de tubos porosos de PP e liberação de Ca(NO ₂) ₂ através dos poros
	água + O ₂	Ativação de esporos e precipitação bacteriana de CaCO ₃
	água	Precipitação bacteriana de CaCO ₃
	CO ₂	Degradação do revestimento envolto em partículas de argilas expandidas e liberação de Na ₂ PFO ₃
Fornecimento de calor	90 °C + água	Fechamento de fissuras por fitas retráteis de polietileno de tereftalato (PET) seguido pela cicatrização autógena
	100 °C	Derretimento do revestimento de cera envolto em cápsulas porosas de PP e liberação de Metil Metacrilato
	150 °C	Derretimento de partículas de copolímeros de acetato de vinil-etileno VAE
	48 °C	Derretimento do revestimento de parafina e agentes retardadores de hidratação
	93 °C	Derretimento de filmes de copolímeros de VAE ao redor de arames espiraladas e liberação de resinas epóxi
Formação de fissuras	+ água	Fechamento de fissuras por as fibras superelásticas de ligas metálicas com memória de forma seguido pela cicatrização autógena
	+ água	Rompimento das cápsulas e liberação de agentes cicatrizantes
	+ água	Delaminação de fibras vegetais e liberação de agentes cicatrizantes
	+ água	Atuação do bombeamento e injeção de agentes cicatrizantes para dentro de camada de concreto poroso

2.3 Eficiência de diferentes tipos de agentes cicatrizantes

Diferentes tipos de agentes cicatrizantes têm sido propostos para reforçar a capacidade de autocicatrização do concreto, é dado um resumo na Tabela 2, onde para cada agente, as propriedades mais importantes são mencionadas para verificar a sua eficiência.

Tabela 2 - Visão geral dos agentes cicatrizantes que têm sido relatados na literatura (Adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2193)

Agente cicatrizante	Número de componentes		Viscosidade (mPa.s)	Agente de cura	Tempo de cura	Expansivo		Resistência (MPa)
	1	> 2				Sim	Não	
Catalisador cristalino	√		-	Umidade + CO ₂	21 dias	√		-
Cianoacrilato	√		< 10	Umidade	segundos		√	20
Epóxi	√		250-500	umidade e ar	< 100 min.		√	25
Epóxi		√	80-360	Contato	30 min-1 h		√	45
Metil Metacrilato	√		-	Calor	-		√	-
Metil Metacrilato		√	1-34	Contato	30 min-1 h		√	50-75
Silicone	√		-	Ar	-		√	-
Poliuretano	√		7200	Umidade	40-80 min	√	-	-
Poliuretano		√	600	Contato	50-300 s	√		-
Poliacrilato		√	7	Contato	40 s		√	-
Óleo de tungue	√		-	Ar	-		√	-
Solução alcalina de sílica	√		-	Ar	-		√	-
Solução de Ca(OH) ₂	√		-	CO ₂ do ar	-		√	-
Solução de NaSiO ₃	√		-	Ca(OH) ₂	-		√	-
Solução de NaFPO ₃	√		-	Hidratação	28 dias		√	-
Solução de Ca(NO ₂) ₂	√		-	Matriz	-		√	-
Poliuretano + bactérias		√	600	Contato	-	√		-
Solução bacteriana	√		-	água + O ₂	100 dias		√	-
Solução bacteriana		√	-	Água			√	-

2.4 Autocicatrização autógena do concreto

O termo “fenômeno de autocicatrização” tem intrigado pesquisadores há mais de cem anos. Na maioria dos estudos a aparente diminuição da permeabilidade é incorretamente atribuída ao efeito autocicatrizante. Este erro é especialmente comum em investigações onde é medida apenas a penetração da água, e o fluxo através da amostra permanece desconhecido. Este último é de primordial importância, pois o fenômeno de autocicatrização não é o resultado de um ensaio em particular, mas resulta da interação entre a microestrutura e o fluido que a permeia (EDVARSEN, 1999, p. 448).

O fenômeno de autocicatrização, que é largamente atribuído à dissolução e a deposição de hidratos induzida por catalisadores ativos, deve ser diferenciado do fenômeno da colmatação autógena, que é devido à hidratação contínua de materiais não hidratados com a nucleação de calcita CaCO_3 e subsequente crescimento de cristais.

Duas diferenças principais são: (a) o efeito autocicatrizante é observado mesmo em um sistema fechado de CO_2 , onde não é possível a carbonatação do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 dissolvido no concreto, e (b) o fenômeno de autocicatrização torna-se significativo após intensa microfissuração, geralmente causada por retração por secagem e/ou carregamento cíclico durante a vida útil de uma estrutura de concreto. Ambas são dependentes da exposição à água, enquanto que o fenômeno da hidratação contínua pode prosseguir em condições latentes (HEARN, 1998, p. 564).

Torna-se claro que a colmatação natural pode ser melhorada, sendo mais eficaz quando as larguras das fissuras são restritas ou pode ser provocado o fechamento da fissura (Figura 8 A). Como a água é sempre necessária para ocorrer a colmatação autógena, a retenção de água pode ser outro fator de melhoria (Figura 8 B). Melhorando a possibilidade de hidratação ou cristalização

contínua (Figura 8 C) promovemos a melhoria da colmatção autógena. Concluindo, podemos então chamar este processo de cicatrização autógena (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2184).

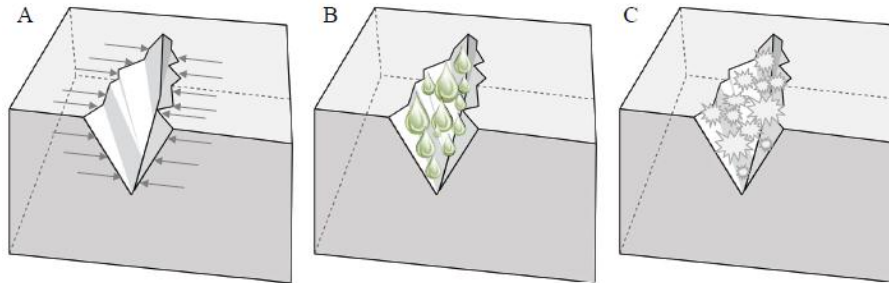


Figura 8 – Abordagens de cicatrização autógenas. (A) restrição da abertura de fissura, (B) o fornecimento de água, e (C) hidratação contínua e a cristalização (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2185).

2.4.1 Colmatção natural do concreto

Devido à colmatção natural do concreto, uma infiltração de água através das fissuras diminui gradativamente com o tempo, e, em alguns casos, as fissuras podem ser seladas completamente. No passado, não houve uma investigação técnica séria sobre a colmatção natural, porque muito pouco se sabia sobre o fenômeno em si e sobre os processos físico-químicos envolvidos (EDVARSEN, 1999, p. 449).

Todas as investigações químicas e mineralógicas nas superfícies de fratura de fissuras colmatadas mostraram formações cristalinas de CaCO_3 , praticamente como uma causa exclusiva de colmatção autógena (EDVARSEN, 1999, p. 451). Embora existam opiniões diferentes sobre os principais mecanismos que causam a colmatção autógena (Figura 9), os pesquisadores concordam que, para quaisquer um dos mecanismos, a presença da água seja essencial.

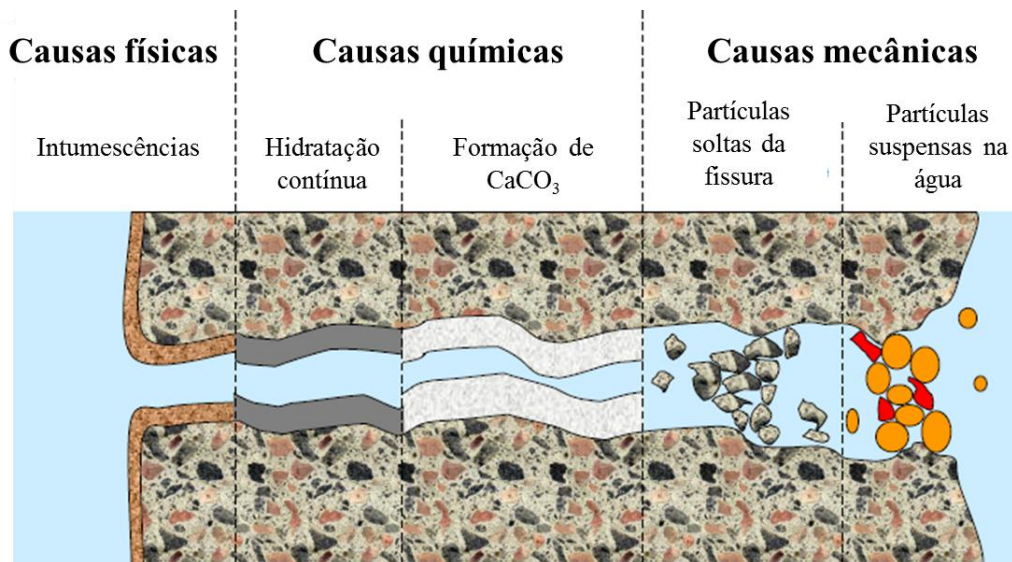


Figura 9 - Diferentes causas que podem levar à colmatação natural de uma fissura (RILEM, 2013, p. 65)

2.4.2 Cimentos com escória de alto forno como agentes cicatrizantes

Focando na sustentabilidade, o uso de subprodutos industriais como as escórias de alto-forno na composição do cimento tem se tornado uma tendência cada vez mais comum. aumentar os níveis de substituição, sem afetar negativamente e até mesmo com o objetivo de melhorar algumas das propriedades do concreto.

Embora, deva ser considerado o efeito positivo da hidratação contínua das partículas da escória nos concretos autocicatrizantes com escórias de alto forno. A vulnerabilidade à carbonatação dos concretos com cimentos de escórias de alto forno pode ser atribuída a sua alta permeabilidade ao gás carbônico (CO_2) e ao baixo teor de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Entretanto, o baixo teor de Ca(OH)_2 e uma estrutura de poros mais refinada do concreto com escória de alto forno pode contribuir para uma maior resistência química destes concretos (DE BELIE, VERSELDER, *et al.*, 1996, p. 1718).

No estudo de GRUYAERT, HEEDE e DE BELIE (2013, p. 47) com ensaios acelerados de carbonatação em concretos contendo diferentes teores de escória de alto forno (50%, 70% e 85%), onde considerou o efeito da hidratação contínua da escória, foi estimado uma profundidade de carbonatação para uma vida útil de 50 anos. Os ensaios revelaram que, embora o concreto de escória de alto forno tenha uma resistência à carbonatação mais baixa que o cimento Portland comum, a estimativa da profundidade de carbonatação no final da vida útil de 50 anos deste concreto pode ainda ser aceitável em ambientes normais.

A aspersão de uma solução concentrada de monofluorofosfato de sódio (Na_2FPO_3) em ciclos alternados de úmido/seco pode prevenir e reduzir significativamente a corrosão do aço em concretos carbonatados (ALONSO, ANDRADE, *et al.*, 1996, p. 415). SISOMPHON, COPUROGLU e FRAAIJ (2011, p. 14) descobriram que o uso do Na_2FPO_3 encapsulados como um agente autocicatrizante em pastas de cimento de escória de alto forno melhora significativamente a qualidade da interface da zona de transição em argamassas sujeitas à retração por carbonatação. Na presença de umidade, a solução de Na_2FPO_3 difunde-se no interior da matriz degradada para formar íons fosfato e fluoreto. Estes íons reagem com os produtos de hidratação e carbonatação para estabilizar as formações amorfas análogas à apatita (CaF_2), resultando em uma matriz mais forte e mais densa com uma melhoria da durabilidade da matriz carbonatadas de escória de alto-forno (RILEM, 2013, p. 81).

Em estudos de autocicatrização, a técnica de microscopia de fluorescência ajuda a medir corretamente as características dimensionais e a frequência das fissuras. Os autores Ter Heide *et al.* e Copuroglu e Sisomphon (*apud* RILEM, 2013, p. 24) utilizaram com sucesso a microscopia de fluorescência, a fim de observar a cicatrização de fissuras. Qualquer alteração da porosidade do material de autocicatrização também pode ser facilmente controlada pela fotomicrografia de microscopia de fluorescência. Copuroglu e Sisomphon usaram microscopia de fluorescência para

documentar a eficiência do agente de cura monofluorophosphate sódio contra a carbonatação em sistemas de cimento escória de alto forno (Figura 10).

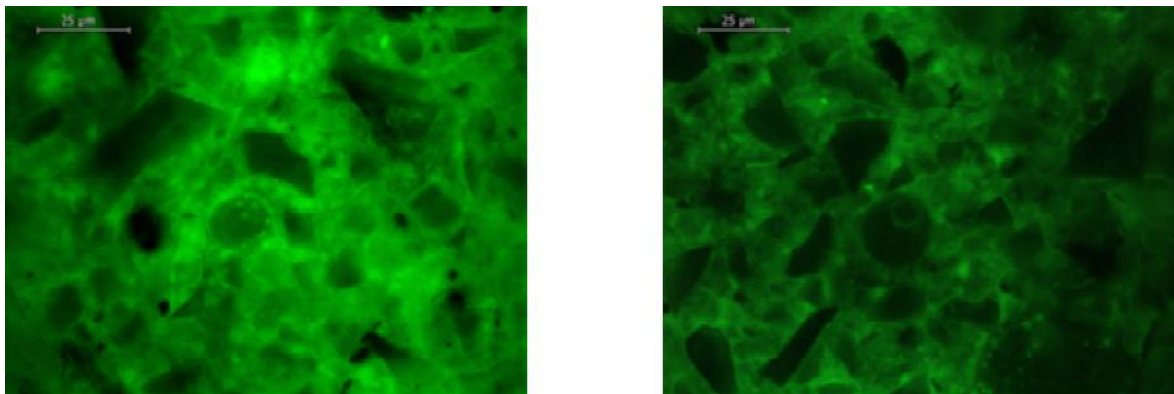


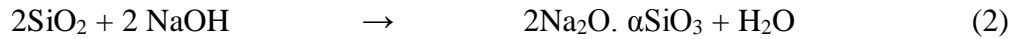
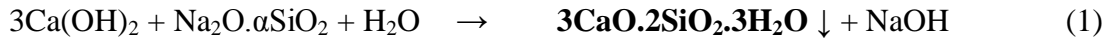
Figura 10 - Micrografias da pasta carbonatada com escória de alto-forno altamente porosa (esquerda) e da microestrutura mais densa incorporando monofluorofosfato de sódio (direita)

2.4.3 Catalisador cristalino como agente cicatrizante

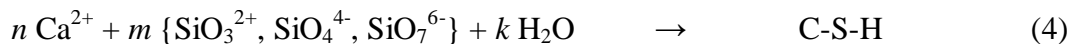
O catalisador cristalino (Cat- X) em solução com sílica reativa (MgSiF_6) forma um material cimentício sintético classificado como uma impermeabilização cristalizante hidrofílica. Os componentes reativos reagem com o Ca(OH)_2 para formar produtos cristalinos que desconectam poros e preenchem fissuras no concreto. Os produtos cristalinos só podem ocorrer quando estiver presente umidade suficiente (SISOMPHON, COPUROGLU, KOENDERS, 2012, p. 567).

Esta tecnologia foi utilizada para melhorar a propriedade de impermeabilidade do concreto e diminuir a migração de radionuclídeos (Césio 137), durante o tratamento, armazenamento e eliminação de resíduos de baixo nível de radioatividade no Japão e também foi usado para a impermeabilização de pontes e túneis das linhas de trem-bala Shinkansen da Japan Railways (MAKI, OHNUMA, 1992, p. 182). A reação de impermeabilização por cristalização está descrita

nas equações simplificadas (Equação 1) a (Equação 3) do estudo de difusão de Césio 137 em argamassa cimentícia de TAKEBE, SHIMOOKA, *et al.* (1989, p. 3) a seguir:



A formação de produtos insolúveis como cristais do tipo $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (C-S-H), cristais de apatita (CaF_2) e cristais de enstatita (MgSiO_3) resultaram numa matriz de cimento mais impermeável e reduziu a concentração radioativa a cerca de 1 ordem de grandeza inferior na região 10 mm mais profunda da amostra tratada com o catalisador cristalino (TAKEBE, SHIMOOKA, *et al.*, 1989, p. 4). A formação cristalina dos produtos varia entre cristais de C-S-H, hidróxido de cálcio ou etringita dependendo do tamanho dos poros e da concentração do pH da solução que penetra nestes poros (Equação 4).



A formação de carbonato de cálcio puro nas bordas da fissura foi responsável pela menor permeabilidade à água, no entanto, este tipo de formação cristalina diminui a recuperação das propriedades mecânicas. Os resultados da análise química dos estudos de SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS (2013, p. 223) também mostraram que os produtos de cicatrização, nas partes internas das fissuras, compostos por uma mistura de CaCO_3 , C-S-H e etringita são responsáveis pela recuperação das propriedades mecânicas.

O catalisador cristalino (Cat X) possui um mecanismo reversível de troca catiônica entre o cátion cálcio bivalente (Ca^{2+}) e o cátion sódio monovalente (Na^+) conforme descrito na Equação 5 (KURAMOTO, NAKAMURA e SHIMAMURA, 1992, p. 564).



As reações de cristalização são mais complexas, mas que podem ser explicada pela interação do catalisador cristalino disperso em água, através da teoria da dupla troca catiônica dos argilominerais. Conforme a Figura 11, durante a troca catiônica entre Na^+ pelo Ca^{2+} formam os quelatos $\text{Ca}:[\text{Cat X}]$ a partir de $\text{Na}:[\text{Cat X}]$ dependendo da concentração de cálcio livre Ca^{2+} na solução (KURAMOTO, NAKAMURA e MATSUDA, 1996, p. 877).

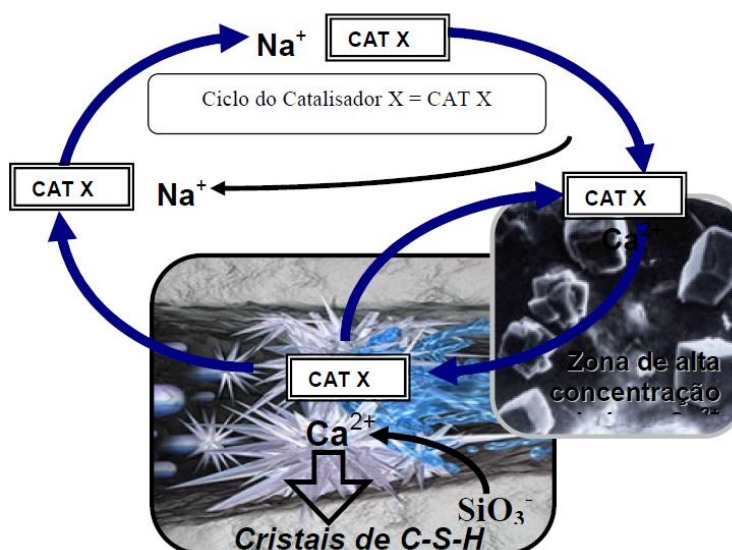


Figura 11 – Formação de cristais de C-S-H devido a capacidade de troca de cátions do catalisador cristalino (Adaptado de TAKAGI, KURAMOTO e SHIMIZU, 1996, p. 98)

Na forma do quelato $\text{Ca}:[\text{Cat X}]$, este composto químico leva a um elevado grau de orientação ou cristalinidade do catalisador cristalino, resultando na formação cristais de silicato de cálcio hidratado C-S-H (Figura 11 - Adaptado de TAKAGI e KURAMOTO *et al.*, 1996, p. 98).

No estudo de SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS (2012, p. 573) sobre o potencial do uso de aditivo expansor à base de sulfoaluminato de cálcio (CSA) e aditivo catalisador cristalino (CA-NF) para argamassas autocicatrizantes, fissuras com a abertura entre 0,25 mm a 0,4

mm podem ser completamente seladas. Em estudo subsequente, a dosagem de 10% de CSA com 1.5% de CA-NF apresentou além da recuperação das propriedades de permeabilidade, também a melhor recuperação das propriedades mecânicas em compósitos cimentícios com endurecimento por deformação (SHCC) (SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS, 2013, p. 223).

Para que o catalisador cristalino adquira a função de transportador de cátions seus cristais devem ser recobertos por adsorção com substâncias orgânicas, como ácidos carboxílicos com dois grupos de carboxilas, que agem como se fosse um coloide protetor formando complexos argilominerais organofílicos (SANTOS, 1992, p. 925) adquirindo assim a função de quelatos (KURAMOTO, NAKAMURA e MATSUDA, 1996, p. 877). O Cat- X tem sido extensivamente estudado para a supressão e controle de reações álcali-agregado (RAA) no concreto através da descarga dos álcalis, resultante da função quelatante dos catalisadores cristalinos que transportam os álcalis para fora da matriz do concreto (KURAMOTO, NAKAMURA e SHIMAMURA, 1992), (KURAMOTO, NAKAMURA e MATSUDA, 1996) e (KURAMOTO, MATSUDA, NAKAMURA e IRIE, 2000).

2.4.4 Restrição por fibras como agente cicatrizante

Quando as fibras são misturadas no concreto, a fim de controlar a abertura da fissura, ao invés de criar uma única fissura, múltiplas fissuras aparecem após o carregamento. Li e seus colaboradores (*apud* RILEM, 2013, p. 121) foram os primeiros a proporem o uso das fibras nos compósitos cimentícios engenheirados (CCE) com endurecimento por deformação (CCED) de modo a restringir a abertura da fissura e assim promover a cicatrização autógena.

A eficiência das fibras de aço, de polipropileno (PP), de nylon (PE) e de PVA como indutoras da cicatrização autógena foram comparadas por Homma *et al.* e Koda *et al.* (*apud* VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2185). As fibras de PVA foram as que induziram a maior

eficiência na capacidade de cicatrização, e pode ser atribuído ao fato das fibras de PVA poderem promover a deposição de produtos de cristalização, tais como grupos hidroxilas, ligadas a estrutura da fibra, atraindo íons de cálcio.

2.4.5 *Exposição à água como agente cicatrizante*

A condição de exposição à água (CE) desempenha um papel importante no processo de autocicatrização. Em geral na condição de exposição em ciclos alternados de úmido/seco (CE3) mostrou a recuperação mecânica ideal, enquanto que na condição de exposição somente ao ar (CE4) não foi observada quaisquer evidências de cicatrização. Na condição de exposição à água renovada regularmente (CE2) renderam uma recuperação mecânica ligeiramente superior na condição de exposição contínua à água (CE1). Em geral, a recuperação das propriedades mecânicas segue a ordem de $CE4 < CE1 < CE2 < CE3$ (SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS, 2012, p. 223).

Entre as diferentes condições de exposição à água, a condição de exposição de ciclos alternados de úmido/seco (CE3) que mostrou a maior recuperação das propriedades mecânicas pode promover a interação de água com o CO_2 e com os materiais cimentícios não hidratado. Pode-se supor que, durante a fase de secagem, conforme o excesso da água vai evaporando, as concentrações de íons presente na água dentro das fissuras são aumentadas. Nessa situação, a quantidade de reagentes fica bastante concentrada para que reações adicionais ocorram, enquanto que a quantidade da água na solução se mantém suficiente. Este fenômeno reforçaria as reações químicas de precipitação e da hidratação contínua. Além disso, a penetração de CO_2 na fissura, durante o período de secagem, conduziria na formação de adicional de carbonatos que são úteis para o selamento das fissuras (SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS, 2012, p. 220).

2.4.6 Esporos de bactérias e seus nutrientes como agente cicatrizante

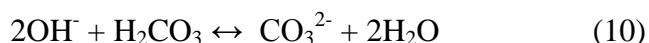
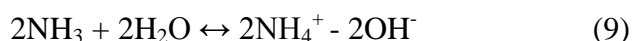
Nas abordagens de Jonkers e Wang *et al.* (*apud* VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2197) quanto ao uso de bactérias como agentes cicatrizantes, sempre existiu a preocupação com o período de tempo em que bactérias ficariam ativas. Concluíram por trabalhar com esporos, que são células bacterianas dormentes que podem resistir a tensões mecânicas e químicas e permanecem viáveis durante períodos maiores que 50 anos.

Para ativar o concreto autocicatrizante bacteriano, proposto por Jonkers *et al.*, precisam estar presentes dentro da fissura, tanto de água quanto o O₂. Mesmo que a água seja sugada para dentro das microfissuras devido à ação capilar, surge a dúvida se estará presente O₂ suficiente no interior das fissuras. Enquanto, Jonkers *et al.* (*apud* VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2203) possa apenas indicar o uso de esporos de bactérias como uma proteção apenas superficial até o momento. Wang *et al.* (*apud* VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2203) adicionou nitrato nos nutrientes como um receptor de elétrons alternativo para tornar possível a precipitação bacteriana de CaCO₃ dentro da fissura sem a presença de oxigênio (O₂).

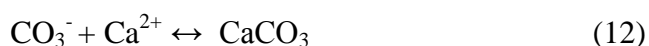
A precipitação bacteriana de CaCO₃ através da hidrólise microbiana de ureia apresenta diversas vantagens em relação aos outros caminhos geradores de carbonato. Como pode ser facilmente controlada tem o potencial para produzir grandes quantidades de carbonato de dentro de um curto período de tempo. A hidrólise de ureia é catalisada por meio de uréase. Como consequência, a ureia é degradada para carbonato e amônio, o que resulta num aumento do pH e da concentração de carbonato no meio ambiente bacteriano (DE MUYNCK, DE BELIE e VERSTRAETE, 2010, p. 124).

Um mol de ureia é hidrolisado intracelularmente a 1 mol de amoníaco e 1 mol de carbamato da Equação 7, que espontaneamente hidrolisa para 1 mol de amoníaco e de ácido

carbônico da Equação 8. Estes produtos subsequentemente equilibram-se em meio aquosa para formar bicarbonato e 2 mol de amônio e íons de hidróxido das Equações 9 e 10 (DE MUYNCK, DE BELIE e VERSTRAETE, 2010, p. 124).



Na presença de íons de cálcio, o resultado é a precipitação de carbonato de cálcio apresentado na Equação 11 e 12, uma vez que certo nível de supersaturação é atingido.



Uma representação simplificada dos eventos que ocorrem durante a precipitação de carbonatos CaCO_3 induzida por bactérias ureolíticas é dada na Figura 12. Íons de cálcio na solução são atraídos para as paredes das células das bactérias devido a carga negativa desta última, resulta na formação de cristais de carbonato na célula da bactéria.

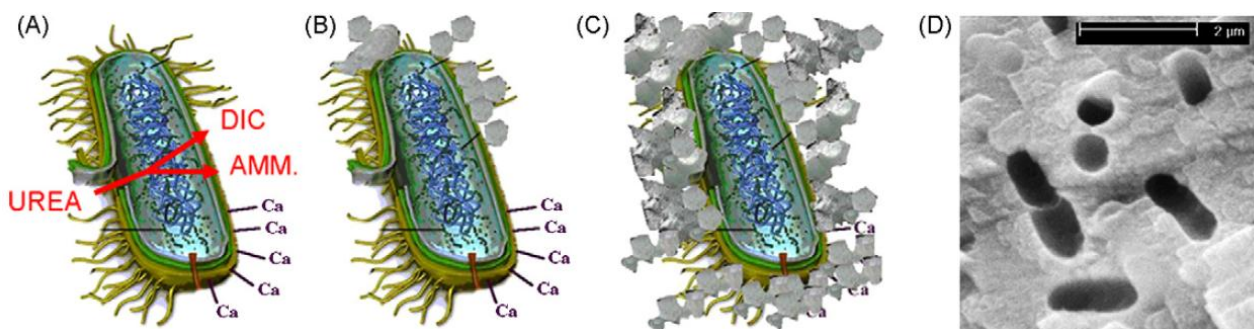


Figura 12 – Representação simplificada da precipitação de CaCO_3 induzida por bactérias ureolíticas (DE MUYNCK, DE BELIE e VERSTRAETE, 2010, p. 126)

Nos estudos de Wang (*apud* VAN TITTELBOOM, SNOECK, *et al.*, 2013, p. 409), enquanto as séries de amostras sem bactérias apenas fissuras com abertura até 0,25 mm foram capazes de selar completamente (devido à cicatrização autógena), quando cápsulas carregadas com bactérias *Bacillus sphaericus* foram incorporados nas amostras, mesmo fissuras com 1 mm de abertura foram capazes de cicatrizar completamente.

No Brasil, SHIRAKAWA possui estudos sobre a biocalcificação de materiais cimentícios com o uso de bactérias da Coleção de Culturas do Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde (INCQS). A bactéria *Pseudomonas putida* INQCS 113 possui a precipitação de carbonato de cálcio mais alta, consumindo em média de 96% de ions de cálcio, seguida pela *Lysinibacillus sphaericus* INQCS 414 com 74% (SHIRAKAWA, CINCOTTO, *et al.*, 2011).

2.5 Mecanismos da cicatrização autógena

Uma das abordagens mais estudada de autocicatrização em materiais cimentícios é a cicatrização autógena. Aparentemente, o mecanismo com a maior capacidade para provocar a cicatrização autógena é a hidratação contínua sendo o principal mecanismo de cura em um concreto jovem. Numa idade mais avançada, a precipitação de carbonato cálcio (CaCO_3) torna-se o principal mecanismo (VAN TITTELBOOM, SNOECK, *et al.*, 2013, p. 2184).

2.5.1 Mecanismo de cicatrização por hidratação contínua

Os estudos sobre o efeito das adições minerais sobre a capacidade de autocicatrização são limitados na literatura, por conseguinte, a substituição parcial de cimento Portland pelas adições minerais pode reduzir o custo do material, reduzir o impacto ambiental e melhorar a sustentabilidade, uma vez que a produção destas adições necessita de menos energia e provocam menos emissões de CO_2 do que o do cimento.

Tentativas para estimular a cicatrização autógena focaram em adições minerais que sejam capazes de promover a deposição de cristais no interior da fissura. Alguns pesquisadores substituíram parte do cimento por cinzas volantes ou escória de alto-forno, que são materiais pozolânicos e latente hidráulicos respectivamente. Como grandes quantidades destes aglomerantes permanecem não hidratados mesmo com a idade mais avançada, é promovida a cicatrização autógena devido à hidratação contínua (SAHMARAN, YILDIRIM e ERDEM, 2013, p. 90).

No entanto, as escórias e as cinzas consomem o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) durante a sua reação e, assim, o potencial para a formação de carbonato de cálcio pode ser reduzida e não parecem melhorar a precipitação de cristais. Mas, demonstrou-se a partir das experiências de

TITTELBOOM, GRUYAERT, *et al.* (2012, p. 350) que as fissuras menores fecharam mais completamente e rapidamente em comparação com fissuras maiores.

Em geral, pode concluir-se que a substituição por cimento de escória de alto-forno ou cinzas volantes melhora a cicatrização autógena, aumentando ainda mais a hidratação, enquanto que não afeta a precipitação de carbonato de cálcio. O efeito vantajoso é mais pronunciado quando é usado a escória de alto forno como substituto do cimento (TITTELBOOM, GRUYAERT, *et al.*, 2012, p. 358).

2.5.2 Mecanismo de cicatrização química

Pesquisadores como SISOMPHON, ÇOPUROĞLU e KOENDERS (2012, p. 566) misturaram o catalisador cristalino com agentes expansivos à base de sulfoaluminatos de cálcio para obter uma melhor cicatrização. Após a penetração da água para dentro da fissura, foram formados cristais de etringita que preencheram as fissuras. No entanto, microfissuras foram notadas na zona de interface entre a matriz e os agregados, devido à reação expansiva. Portanto, propuseram encapsulamento dos agentes produtores de etringita para reduzir o risco de a expansão descontrolada e formação de fissuras adicionais.

Após os seus primeiros desenvolvimentos AHN e KISHI (2010, p. 175) concluíram que a cicatrização de fissuras pode ser obtida pela substituição de 10% do teor de cimento por uma combinação de agentes expansivos, geomateriais e dos agentes químicos. Quando a água penetra na fissura, o agente expansivo se expande, o geomaterial incha e os agentes químicos causam a precipitação de cristais que levam ao fechamento da fissura. Uma desvantagem da aplicação de partículas que pode ainda hidratar ou cristalizar é que a funcionalidade da cicatrização é limitada conforme o agente cicatrizante em si é consumido no processo.

2.5.3 Mecanismo de cicatrização microbiológica

Jonkers declarou que seria vantajoso utilizar esporos bacterianos para precipitar CaCO_3 para apenas catalisar o processo de cicatrização e, portanto, não seriam consumidos. No entanto, as bactérias morrem quando as células são incorporados nos cristais de CaCO_3 e a atividade bacteriana também chega ao fim quando todos os nutrientes são consumidos. Pode assim concluir-se que, mesmo a abordagem bacteriana não irá permitir uma repetição sem fim do processo de cicatrização.

Em sua primeira tentativa de criar um bioconcreto, Jonkers e colaboradores aplicaram esporos de bactérias e nutrientes na mistura de concreto fresco. Quando aparece uma fissura na matriz e a água entra na fissura, tanto os esporos quanto os nutrientes se dissolvem resultando na ativação dos esporos bacterianos. Em seguida, as bactérias iniciam a produção de cristais de CaCO_3 que se depositam nas faces da fissura. O dióxido de carbono (CO_2), liberado devido à conversão metabólica das bactérias, reage com o Ca(OH)_2 lixiviado da matriz do concreto de modo a formar cristais de CaCO_3 adicionais. Os testes mostraram, porém, que os esporos só permaneceram viáveis por um período limitado, enquanto as células não entram em colapso devido à hidratação contínua do cimento resultando em uma matriz de poros de diâmetros menores do que os esporos de bactérias com 1 micrometro de tamanho. Em sua pesquisa mais recente, Jonkers protegeu suas bactérias através de encapsulamento.

2.6 Técnicas para a avaliação da autocicatrização

Diversas técnicas laboratoriais têm sido utilizadas para avaliação do concreto autocicatrizantes e podem ser separadas por técnicas de visualização, de recuperação da estanqueidade e da recuperação das propriedades mecânicas conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Técnicas utilizadas para avaliação da eficiência da autocicatrização (Adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2205)

Técnica de avaliação da autocicatrização		Possibilidades
Visualização e determinação	Microscópio ótico + análise de imagens	Visualização da deposição de cristais e determinação da taxa de cicatrização
	Microscópio eletrônico de varredura	Visualização da deposição de cristais
	Microscópio eletrônico de varredura ambiental	Visualização do rompimento das cápsulas parcialmente embutidas
	Análise de seção fina	Visualização da deposição de cristais no interior das fissuras
	Radiografia de raios-X	Visualização da liberação do agente encapsulado na cápsula embutida
	Tomografia de raios-X	Visualização da liberação do agente encapsulado de cápsula embutida em 3D
	Correlação de imagem digital	Visualização do fechamento da fissura mediante tratamento térmico de SMA
	Análise por difração de raios-X	Determinação dos materiais cristalinos
	Espectroscópio Raman	Determinação da composição química
	Análise no infravermelho	Determinação de produtos precipitados
Recuperação da estanqueidade	Permeabilidade à água baixa pressão	Vazão da água através da fissura (cicatrizada)
	Permeabilidade à água alta pressão	Vazão da água através da fissura (cicatrizada)
	Permeabilidade do ar	Vazão do ar através da fissura (cicatrizada)
	Absorção de água por capilaridade	Absorção de água por capilaridade da fissura (cicatrizada)
	Radiografia por nêutrons	Visualizar a absorção de água por capilaridade
	Teste de corrosão	Resistência contra corrosão
	Delaminação por sais de degelo	Resistência contra delaminação por sais de degelo
	Difusão de cloreto	Resistência contra o ingresso de cloretos
	Pressão Osmótica	Resistência contra o ingresso de íons
	Medições de transmissão de ultrassom	Continuidade do material
Recuperação de propriedades mecânicas	Ensaio de compressão	Recuperação em resistência, rigidez e/ou energia obtida quando recarregar o corpo de prova cicatrizado
	Ensaio de tração na flexão	
	Ensaio de flexão em três pontos	
	Ensaio de flexão em quatro pontos	
	Deformação horizontal coluna/quadro	Formação de novas fissuras contra a reabertura de fissuras antigas
	Laje de carga de impacto	
	Análise de emissão acústica	Recuperação da energia / observar o rompimento da cápsula
	Análise da frequência de ressonância	Recuperação da consistência

2.6.1 Estudo do catalisador cristalino em concretos autocicatrizantes

O estudo de MORI, KURAMOTO, *et al.* (1996, p. 344) investigou os efeitos após 1 ano da aplicação do catalisador cristalino pelo lado inferior do pavimento em concreto armado que apresentava fissuramento intenso de uma ponte rodoviária, devido aos carregamentos repetitivos do tráfego médio diário de 40.000 caminhões configurando 40% do tráfego total na Rota Nacional 23 no Japão (Figura 13).



Figura 13 – Fissuramento intenso visto pelo lado inferior do pavimento em concreto com aberturas entre 0,1 a 0,2 mm (MORI, KURAMOTO, *et al.*, 1996, p. 344)

Foram extraídos corpos de prova com Ø10 cm x 20 cm de comprimento do concreto do pavimento em duas seções, uma com aplicação do catalisador cristalino e outra sem aplicação para fins de comparação. Destes corpos de prova foram retirados amostras para os ensaios de resistência à compressão axial e ensaios de permeabilidade (Figura 14).



Figura 14 - Amostras para o ensaio de resistência à compressão axial e ensaio de permeabilidade (Fotos do autor)

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial mostram um aumento médio de 28 % da resistência à compressão comparados com as amostras não tratadas, embora MORI, KURAMOTO, *et al.* (1996, p. 345) não julgue que a diferença seja resultado do efeito exclusivo do catalisador cristalino.

Os resultados do ensaio de permeabilidade foi apresentado na Figura 15, onde o grupo das amostras tratadas com o catalisador cristalino apresenta um volume inicial mais baixo que as amostras não tratadas, e a tendência à diminuição do volume de água passante das amostras tratadas evidenciam a sua capacidade de autocicatrização.

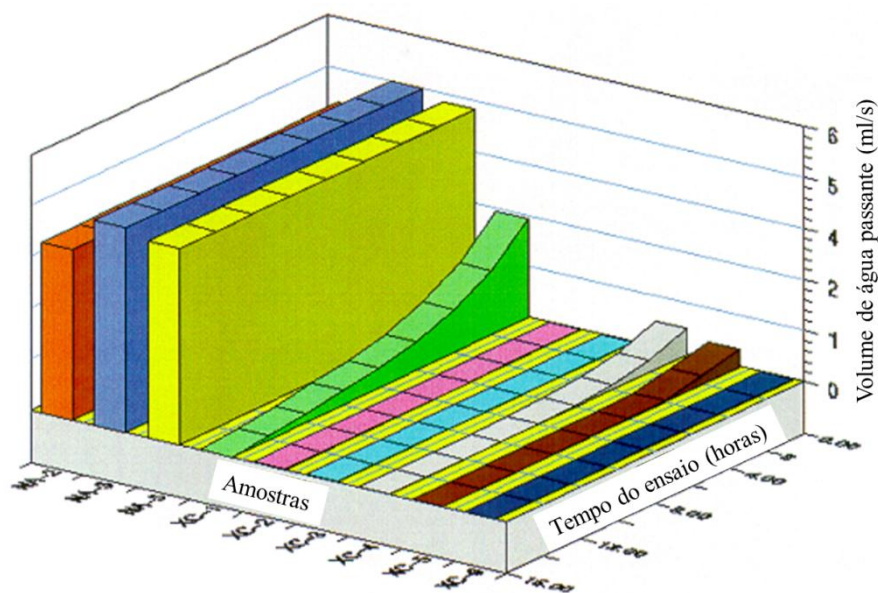


Figura 15 – A tendência à diminuição do volume de água passante das amostras tratadas evidencia a sua capacidade de autocicatrização (MORI, KURAMOTO, *et al.*, 1996, p. 345)

Foram retiradas amostras para microscopia eletrônica de varredura (Figura 16) e nas micrografias com uma ampliação de 1000 vezes, pode ser observada um crescimento de cristais de cimento nos vazios das fissuras das amostras tratadas com o catalisador cristalino (Figura 17A). Nas amostras não tratadas (Figura 17B), apenas a parede do gel pode ser observada.



Figura 16 - Amostras para o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Fotos do autor)

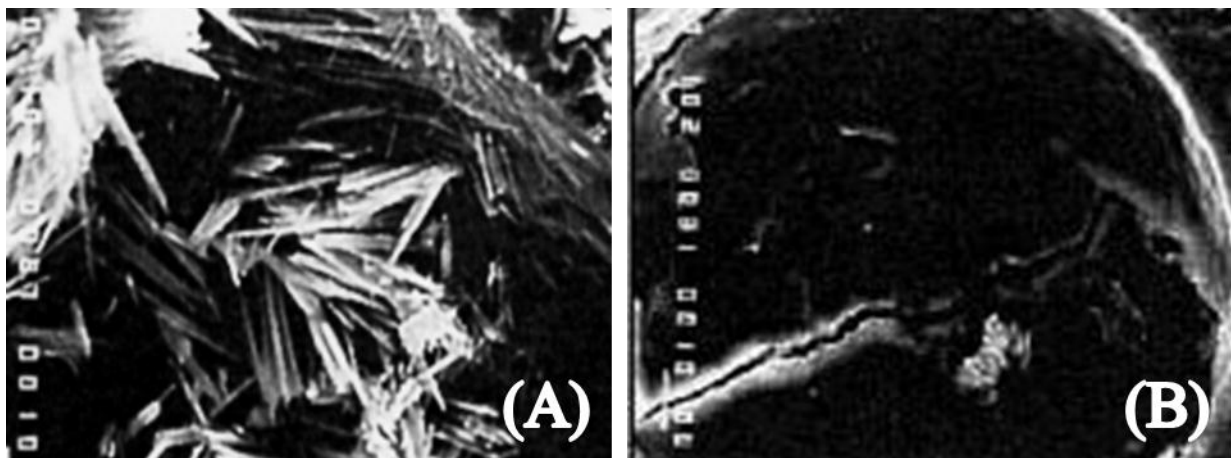


Figura 17 – Micrografias de cristais nas fissuras tratadas com o catalisador cristalino (A) e apenas a parede do gel nas amostras não tratadas (B) (MORI, KURAMOTO, et al., 1996, p. 345)

2.6.2 Estudo das adições minerais nos concretos autocicatrizantes

Os parâmetros dos estudos de 2008 e 2013 de Sahmaran *et al.* são apresentados comparativamente na Tabela 4. Nos estudos de Sahmaran *et al.* foram utilizados adições minerais

representando uma ampla gama de composições químicas, do altamente pozolânicos até para quase cimento: cinzas volantes de baixo teor de cálcio, cinzas volantes de alto teor de cálcio e escórias de alto forno.

Tabela 4 – Comparativo dos estudos de Sahmaran et al.

Parâmetros	(SAHMARAN, KESKIN, <i>et al.</i> , 2008)	(SAHMARAN, YILDIRIM e ERDEM, 2013)
Agente cicatrizante	cinzas volantes de baixo teor de cálcio	cinzas volantes de baixo teor de cálcio cinzas volantes de alto teor de cálcio escórias de alto forno
Tipo de concreto	concreto autoadensável (CAA)	compósito cimentício com endurecimento por deformação (CCED)
Condição de exposição à água	submersa em água saturada com cal à 23 ± 2 °C por 28 dias	submersa em água saturada com cal à 23 ± 2 °C por 60 dias
Pré-fissuramento	compressão axial com 0%, 70% e 90% da carga de ruptura	compressão diametral com níveis de deformação de 1,00 mm, 1,25 mm e ruptura
Período de cicatrização	submersa em água saturada com cal à 23 ± 2 °C por 15 e 30 dias	continua à água, contínua ao ar e ciclos de gelo e degelo por 30 e 60 dias
Propriedades mecânicas	resistência à compressão axial velocidade de propagação de ultrassom	-
Propriedades permeabilidade	taxa de absorção migração de cloretos	difusão de cloretos
Corpos de prova por ensaio	3 CPs cilíndricos Ø100 x 200 mm 28, 28 + 15 e 28 + 30 dias de idade	4 CPs cilíndricos Ø100 x 50 mm 60 , 60 + 30 e 60 + 60 dias de idade
Resultados	A diferença inicial de 27% na resistência dos CPs fissurados com os CPs virgens, e cai para 7% após 30 dias de cicatrização.	CPs com escória exibem maior resistência à penetração de íons cloretos 468 C e maior capacidade de cicatrização em fissuras com abertura de 100 µm

Os parâmetros utilizados no estudo de SAHMARAN, KESKIN, *et al.* (2008) foram base para o programa experimental desta dissertação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de desenvolver o conhecimento de um concreto autocicatrizante que seja aplicável em obras, foi escolhida para a pesquisa desta dissertação a abordagem pela cicatrização autógena. Apesar de o concreto ser um material comum e com uma longa história, no que diz respeito à cicatrização autógena, apenas recentemente começaram os estudos sobre os ensaios capazes de verificar capacidades autocicatrizantes apropriados neste material. O fenômeno é conhecido, mas nem os seus efeitos benéficos nem as suas limitações têm sido bem compreendidas.

Esta dissertação procura contribuir para o estudo dos concretos autocicatrizantes determinando quais ensaios são mais adequados e quais os parâmetros devem ser adaptados para melhor compreender e verificar este fenômeno. A autocicatrização autógena é um fenômeno que pode ser visto no corpo humano, e essa capacidade curativa também pode ser fornecida para o concreto (RILEM, 2013, p. 7). Para que ocorra a cicatrização, pressupõe-se que deva ocorrer primeiro um “ferimento”, ou seja, a geração de uma fissura no concreto. Considera-se que o mecanismo de dano, por exemplo, o tráfego de veículos em estruturas existentes (MORI, KURAMOTO, *et al.* 1996, p. 344), ou carregamento mecânico induzido em corpos de prova em ambiente de laboratório (SAHMARAN, KESKIN, *et al.* 2008) e (SAHMARAN, YILDIRIM e ERDEM, 2013), é essencial para o estudo dos mecanismos de autocicatrização em concretos. Portanto, os parâmetros determinantes para cada tipo de ensaio visando verificar a capacidade autocicatrizante que devem ser considerados são:

- (a) a idade da amostra no momento da geração do fissuramento ou carregamento;
- (b) a forma de geração do fissuramento;
- (c) o período de indução da cicatrização e;
- (d) a condição de exposição à água para promover a autocicatrização.

3.1 Programa experimental

O objetivo foi o estudo comparativo de traços de concreto autoadensáveis utilizando cimentos comerciais com diferentes teores de escórias de alto-forno, aditivo catalisador cristalino e fibras de vidro visando caracterizar possível potencial de cicatrização autógena de fissuras no concreto, analisando suas características reológicas, propriedades de resistência e de estanqueidade.

Uma das últimas conquistas da tecnologia do concreto, os concretos autoadensáveis (CAA) possuem quase a mesma composição que o concreto convencional. Foi desenvolvido com a intenção de aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado, aumentando a trabalhabilidade do concreto e, por conseguinte, aumentar a qualidade de construção. A tecnologia consiste no ajuste da curva granulométrica dos agregados, em especial da parte fina da curva com o emprego de adições minerais, e a adição de aditivos químicos plastificantes e redutores de água, para que um concreto que não necessite de compactação possa ser obtido.

Uma das principais vantagens de utilizar a SCC é a redução no tempo do cronograma de uma construção, no entanto, isto pode resultar em situações nos quais o concreto pode ser submetido a uma sobrecarga mais cedo. No entanto, os concretos autoadensáveis em comparação com os concretos convencionais, apresentam níveis mais elevados de retração térmica e autógena, devido a uma maior quantidade no teor de aglomerante e conseqüentemente menor relação água / aglomerante. Portanto, corrobora com a mesma justificativa dos pesquisadores ABDEL-JAWAD e DEHN (2005, p. 1025) e SAHMARAN, KESKIN, *et al.* (2008, p. 872) que decidiram investigar a capacidade de autocicatrização em concretos autoadensáveis.

Inicialmente, foi realizado um ensaio exploratório simplificado para a caracterização da autocicatrização em um traço de concreto simples segundo o ensaio a seguir:

(1) ensaios de penetração de água sob pressão

NBR 10787:1994 Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão

Em seguida foram realizados ensaios específicos de caracterização da autocicatrização em traços de concretos autocicatrizantes autoadensáveis segundo os seguintes ensaios:

(1) ensaios de resistência à compressão axial	
NBR 5739:2007	Concreto – Ensaio de compressão de amostras cilíndricas
(2) ensaios de determinação de velocidade de propagação de ultrassom	
NBR 8802:1994	Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica
(3) ensaios de absorção por capilaridade	
ASTM C 1585:2004	Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concretes
(4) ensaios de difusão de íons cloreto	
ASTM C 1202:2005	Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration

3.2 Materiais utilizados

- ✓ Cimento CPV ARI Plus comercial
- ✓ Cimento CPII E-40 comercial
- ✓ Cimento CPIII-40 RS comercial
- ✓ Catalisador cristalino aditivo impermeabilizante cristalizante
- ✓ Fibra fibra de vidro comercial resistente à álcalis 12 mm
- ✓ Aditivo redutor de água polifuncional à base de lignosulfonato
- ✓ Aditivo redutor de água superplastificante à base de policarboxilato com antiespumante
- ✓ Aditivo estabilizador modificador de viscosidade à base de éter de celulose

3.3 Caracterização dos materiais

Para o programa experimental da presente dissertação, foram selecionados e caracterizados três cimentos comerciais com distintos teores de escória de alto forno, um catalisador cristalino, uma fibra de vidro e agregados miúdos e graúdos normalmente utilizados na execução de estruturas de concreto no Brasil.

3.3.1 Cimentos comerciais

Foram selecionados três tipos de cimento comerciais utilizados no Brasil para definição das dosagens das amostras de concreto: cimento CP III 40 RS, CP II-E 40 e CP V ARI plus com percentuais distintos de escória de alto forno nas faixas de 55%, 34% e 0% respectivamente cujas normas de especificação dos cimentos utilizados estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Normas de especificação dos cimentos utilizados

Cimento	Normas de especificação utilizadas
CP V ARI Plus	<i>NBR 5733:1991 – Cimento Portland de alta resistência inicial</i>
CP II E 40	<i>NBR 11578:1997 – Cimento Portland composto – Especificação</i>
CP III 40 RS	<i>NBR 5735:1991 – Cimento Portland de alto-forno</i> <i>NBR 5737:1992 – Cimentos Portland resistentes a sulfatos</i>

Baseados nos dados de composições básicas de matéria-prima nas declarações ambientais dos cimentos fornecidos pelos fabricantes, as composições básicas das matérias primas e características físicas estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Composições básicas das matérias-primas dos cimentos

Cimento	Clinker	Gesso	Calcário	Escória de alto forno
CP V ARI Plus	90 %	6 %	4 %	0 %
CP II-E 40	58 %	3 %	5 %	34 %
CP III 40 RS	36 %	4 %	5 %	55 %

Dados fornecidos pelo fabricante, período de ensaio: 2012

A Tabela 7 apresenta a caracterização física do cimento CP V ARI plus utilizado.

Tabela 7 - Relatório dos ensaios físicos do cimento CP V ARI plus utilizado

Cimento CP-V ARI Plus		Limite da norma NBR 5733
Blaine (cm ² /g)	4615	≥ 3000
Início de pega (min)	130	≥ 60
Fim de pega (min)	182	≤ 600
Resistência 1 dia (MPa)	28,3	≥ 14,0
Resistência 3 dia (MPa)	42,6	≥ 24,0
Resistência 7 dias (MPa)	46,7	≥ 34,0
Resistência 28 dias (MPa)	53,5	-

Dados fornecidos pelo fabricante, período de ensaio: 2012

A Tabela 8 apresenta a caracterização física do cimento CP II-E 40 utilizado.

Tabela 8 - Relatório dos ensaios físicos do cimento CP II E 40 utilizado

Cimento CP-II E 40		Limite da norma NBR 11578
Blaine (cm ² /g)	4450	≥ 2600
Início de pega (min)	161	≥ 60
Fim de pega (min)	216	≤ 600
Resistência 1 dia (MPa)	16	≥ 10,0
Resistência 3 dias (MPa)	28,2	≥ 20,0
Resistência 7 dias (MPa)	37,6	≥ 32,0; ≤ 49,0
Resistência 28 dias (MPa)	50,1	-

Dados fornecidos pelo fabricante, período de ensaio: 2012

A Tabela 9 apresenta a caracterização física do cimento CP III 40 RS utilizado.

Tabela 9 - Relatório dos ensaios físicos do cimento CP III 40 RS utilizado

Cimento CP-III 40 RS		Limite da norma 5735 / 5737
Blaine (cm ² /g)	4855	-
Início de pega (min)	153	≥ 60
Fim de pega (min)	225	≤ 720
Resistência 1 dia (MPa)	11,8	-
Resistência 3 dias (MPa)	25,8	≥ 12,0
Resistência 7 dias (MPa)	35,3	≥ 23,0
Resistência 28 dias (MPa)	46	≥ 40,0

Dados fornecido pelos fabricante, período de ensaio: 2012

A Tabela 10 apresenta a caracterização física do cimento CP V ARI plus utilizado.

Tabela 10 - Relatório dos ensaios químicos do CP V ARI plus

Cimento CP-V ARI Plus		Limite da norma NBR 5733
PF ₁₀₀₀	3,41	≤ 4,5
Resíduo Insolúvel	0,49	≤ 1,0
SiO ₂	19,48	-
Al ₂ O ₃	5,14	-
Fe ₂ O ₃	2,99	-
CaO	63,33	-
MgO	5,14	-
SO ₃	2,95	≤ 4,5
S	0	-
Na ₂ O	0,09	-
K ₂ O	0,67	-
CO ₂	2,57	≤ 3,0

Dados fornecidos pelo fabricante, período de ensaio: 2012

A Tabela 11 apresenta a caracterização química do cimento CP II-E 40 utilizado.

Tabela 11 - Relatório dos ensaios químicos do CP II E 40.

Cimento CP-II E 40		Limite da norma NBR 11578
PF ₁₀₀₀	4,73	≤ 6,5
Resíduo Insolúvel	1,2	≤ 2,5
SiO ₂	21,05	-
Al ₂ O ₃	5,41	-
Fe ₂ O ₃	2,33	-
CaO	56,19	-
MgO	5,41	-
SO ₃	2,85	≤ 4,0
S	0,17	-
Na ₂ O	0,09	-
K ₂ O	0,72	-
CO ₂	3,99	≤ 6,5

Dados fornecidos pelo fabricante, período de ensaio: 2012

A Tabela 12 apresenta a caracterização química do cimento CP III 40 RS utilizado.

Tabela 12 - Relatório dos ensaios químicos do CP III 40 RS

Cimento CP-III 40 RS		Limite da norma 5735 / 5737
PF ₁₀₀₀	2,72	≤ 4,5
Resíduo Insolúvel	0,81	≤ 1,5
SiO ₂	24,01	
Al ₂ O ₃	7,85	
Fe ₂ O ₃	2,35	
CaO	56,84	
MgO	2,48	
SO ₃	1,7	≤ 4,0
S	0,32	
Na ₂ O	0,1	
K ₂ O	0,5	
CO ₂	2,3	≤ 3,0

Dados fornecidos pelo fabricante, período de ensaio: 2012

3.3.2 Catalisador cristalino

O catalisador cristalino é fornecido na forma de pó conforme a Figura 18.



Figura 18 – Aspecto do aditivo catalisador cristalino fornecido na forma de pó

As características químicas dos do catalisador cristalino são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Relatório dos ensaios químicos do catalisador cristalino

PF ₁₀₀₀	RI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	S	Na ₂ O	K ₂ O	CO ₂
-	-	20,3	1,7	4,3	30,9	19,4	1	-	5	0,15	-

Dados fornecidos pelo fabricante, (TAKEBE, SHIMOOKA, et al., 1989, p. 3)

3.3.3 Fibras

Foi utilizada fibras de vidro comercial 12 mm resistente à álcalis.

3.3.4 Água

Foi utilizada água potável proveniente da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP).

3.3.5 Agregados

As características dos agregados miúdos são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Características dos agregados miúdos

Ensaio		Areia de quartzo	Areia artificial
Módulo de finura		1,35	2,35
Dimensão máxima	(mm)	1,18	4,75
Massa específica	(kg/m ³)	2,64	2,68
Massa unitária seca	(kg/m ³)	1,53	1,43
Teor de material pulverulento	%	1,3	11,7
Absorção	%	0,2	0,2

Os seguintes ensaios foram realizados:

- (1) ABNT NBR NM 248:2003: agregados - determinação da composição granulométrica;
- (2) ABNT NBR NM 30:2001: agregado miúdo - determinação da absorção de água;
- (3) ABNT NBR NM 45:2006: agregados - determinação da massa unitária;
- (4) ABNT NBR NM 52:2009: agregado miúdo - determinação da massa específica;
- (5) ABNT NBR NM 46:2003: agregado - determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.

As características dos agregados graúdos são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Características do agregado graúdo

Ensaio		Pedrisco	Brita 1
Módulo de finura		5,83	6,94
Dimensão máxima	(mm)	9,5	25,0
Massa específica	(kg/m ³)	2,66	2,69
Massa unitária seca	(kg/m ³)	1,43	1,49
Teor de material pulverulento	%	0,8	0,8
Absorção	%	0,7	0,5

Os seguintes ensaios foram realizados:

- (1) ABNT NBR NM 248:2003: agregados - determinação da composição granulométrica;
- (2) ABNT NBR NM 45:2006: agregados - determinação da massa unitária;
- (3) ABNT NBR NM 53:2009: agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- (4) ABNT NBR NM 46:2003: agregado - determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.

3.4 Ensaio simplificado para o concreto autocicatrizante

Um plano de ensaio exploratório simplificado baseado no ensaio de penetração de água sob pressão (NBR 10787:1994 – Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão) foi definido para estimar a capacidade de autocicatrização de um traço de concreto autocicatrizante. Foi definido 3 CPs prismáticos de 250 x 250 x 125 mm para cada um dos 6 traços. A quantidade de materiais necessários foi determinada conforme a Tabela 16.

Tabela 16 – Tipo e quantidades de corpos de prova para o ensaio exploratório

Ensaio	Tipo e quantidade de corpos de prova	Volume
(1) ensaios de penetração de água sob pressão	3 CPs x 6 traços x 1 idade = 18 CPs 250 x 250 x 125 mm	141 litros

3.4.1 Definição dos traços

O método empregado para a definição das dosagens foi o apresentado na PES-QMAT-LAB-003 – Dosagem experimental de concreto – Procedimento interno embasado nas recomendações do método American Concrete Institute C-211. Foi adotado o consumo de cimento de 300 kg/m³ e a dosagem de catalisador cristalino de 2,5% sobre o peso de cimento. Observam-se na Tabela 17 que as principais variáveis são os diferentes tipos de cimento e a adição ou não de catalisador nas amostras.

Tabela 17 – Dosagens utilizadas do catalisador cristalino no ensaio simplificado

Dosagem	Tipo de cimento	Catalisador cristalino
1	CP III 40 RS	7,5 kg/m ³ (2,5%)
2	CP III 40 RS	
3	CP II E 40	7,5 kg/m ³ (2,5%)
4	CP II E 40	
5	CP V ARI plus	7,5 kg/m ³ (2,5%)
6	CP V ARI plus	

Sendo assim, estabeleceram-se 6 diferentes traços de concreto autocicatrizantes, cuja composição padrão é apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 Composição padrão do concreto simples (kg/m³)

Material		Consumo por m ³
Água		185 kg
Cimento (CP V ARI Plus / CP II-E 40 / CP III 40 RS)		308 kg
Catalisador Cristalino		7,5 kg
Agregado miúdo	Areia de quartzo (70%)	526 kg
	Areia artificial (30%)	225 kg
Agregado graúdo	Pedrisco (70%)	659 kg
	Brita 01 (30%)	283 kg

O traço consolidado para os 6 traços do ensaio simplificado é apresentado na Tabela 19 e a quantidade total de materiais necessários para o ensaio simplificado neste estudo na Tabela 20.

Tabela 19 – Traço consolidado com consumo de água e cimento fixos

Cimento	Água	areia de quartzo	areia artificial	pedrisco	brita 1	catalisador cristalino
1	0,6	1,708	0,732	2,14	0,917	0,025

Tabela 20 – Quantidade de materiais necessários para o ensaio simplificado.

Material		Consumo por m ³	Material para ensaio
Água		185 kg	26,1 kg
Cimento (CP V ARI Plus / CP II-E 40 / CP III 40 RS)		308 kg	14,5 kg/por cimento
Catalisador cristalino		7,5 kg	0,6 kg
Agregado miúdo	Areia de quartzo (70%)	526 kg	74,2 kg
	Areia artificial (30%)	225 kg	31,7 kg
Agregado graúdo	Pedrisco (70%)	659 kg	92,9 kg
	Brita 01 (30%)	283 kg	39,9 kg

Os corpos de prova prismáticos foram moldados em forma de madeira, previamente preparados com desmoldante. Para o adensamento do concreto, foi utilizado um vibrador de imersão. Somente após 24 horas, os corpos de prova foram desformados e armazenados em água saturada com cal à 23 °C por 28 dias, segundo recomendações da norma ABNT NBR 5738:2007 (Concreto – Procedimento para a moldagem e cura de corpos de prova).

3.4.2 Ensaios de penetração de água sob pressão

Foram determinadas a penetração de água sob pressão com corpos de prova prismáticos de 250 x 250 x 125 mm após 28 dias (1 CP x 6 traços) e 56 dias de idade (2 CPs x 6 traços) segundo os procedimentos de ensaio da ABNT NBR 10787:2011 (Concreto endurecido — Determinação da penetração de água sob pressão). O plano de ensaio foi realizado conforme a conforme a Tabela 21.

Tabela 21 – Plano do ensaio exploratório simplificado

Tipo de ensaio	Preparação dos corpos de prova para cada ensaio
Ensaios de penetração de água sob pressão NBR 10787:1994	(1) Moldagem e cura em câmara úmida por 28 dias; (2a) Fase de pré-carregamento e fissuramento (idade 28 dias) Ensaio de carregamento de pressão hidrostática 3 CPs x 6 traços [0,1 MPa (2 dias) / 0,3 MPa (1 dia) / 0,7 MPa (7 dias)] (2b) Rompimento de 1 CP x 6 traços (28 dias) (3) Fase de indução da cicatrização + 28 dias de cura submersa (4a) Ensaio de carregamento de pressão hidrostática 2 CPs x 6 traços [0,1 MPa (2 dias) / 0,3 MPa (1 dia) / 0,7 MPa (1 dia)]; (4b) Rompimento de 2 CP x 6 traços (56 dias)

3.5 Ensaios específicos para o concreto autocicatrizante

A capacidade de cicatrização depende do tipo da composição do cimento utilizado, da proporção das adições minerais e da condição de exposição à água. Nos estudos de Sahmaran et al. foram utilizados adições minerais representando uma ampla gama de composições químicas. Foram adotados os mesmos parâmetros de condições de cura, de pré-fissuramento e de cicatrização dos corpos de prova no programa experimental do estudo específico do concreto autocicatrizante autoadensável desta dissertação que estão apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Comparativo entre os estudos de Sahmaran et al de 2008 e 2013.

Parâmetros	(SAHMARAN, KESKIN, <i>et al.</i> , 2008)	Programa experimental da dissertação
adição mineral	cinzas volantes de baixo teor de cálcio	escórias de alto forno catalisador cristalino fibras de vidro
tipo de concreto	concreto autoadensável (CAA)	concreto autoadensável (CAA)
Cura	submersa em água saturada com cal à 23 ± 2 °C por 28 dias	submersa em água saturada com cal à 23 ± 2 °C por 28 dias
pré-fissuramento	compressão axial com 0%, 70% e 90% da carga de ruptura	compressão axial com 0% e 90% da carga de ruptura
período de cicatrização	submersa em água saturada com cal à 23 ± 2 °C por 15 e 30 dias	submersa em água saturada com cal à 23 ± 2 °C por 28 e 56 dias
propriedades mecânicas	resistência à compressão axial velocidade de propagação de ultrassom	resistência à compressão axial velocidade de propagação de ultrassom
propriedades permeabilidade	taxa de absorção difusão de cloretos	taxa de absorção difusão de cloretos
corpos de prova por ensaio	3 CPs cilíndricos Ø100 x 200 mm 28, 28 + 15 e 28 + 30 dias de idade	3 CPs cilíndricos Ø100 x 200 mm 28, 28 + 28 e 28 + 56 dias de idade
Resultados	A diferença inicial de 27% na resistência dos CPs fissurados com os CPs virgens, e cai para 7% após 30 dias de cicatrização.	ver Capítulo 5 – <i>Considerações Finais.</i>

Para este programa experimental, os ensaios específicos realizados no estado fresco e endurecido do concreto autocicatrizante autoadensável. Podem ser agrupados em três grupos de ensaios: ensaios de reologia, ensaios para determinar as propriedades mecânicas e os ensaios para determinar as propriedades de permeabilidade.

Um plano de ensaios foi definido conforme o plano de ensaio apresentado na Tabela 23, onde foram necessários 162 corpos-de-prova cilíndricos de Ø100x200 mm para os ensaios específicos para estimar a capacidade de autocicatrização destes traços de concreto.

Tabela 23 – Plano de ensaios específicos do programa experimental

Tipo de ensaio	Preparação dos corpos de prova para cada ensaio
(1) ensaios de resistência à compressão axial	(1) Moldagem e cura de 3 CPs x 6 traços x 5 idades = 90 CPs (2) Cura 7/28 dias Rompimento 7/28 dias = 36 CPs (3a) Carregamento com 90% da carga de ruptura aos 28 dias de 54 CPs (3b) Rompimento de 3 CPs x 6 traços com 28 dias de idade (4) Rompimento de 3 CPs x 6 traços com 56 e 84 dias de idade
(2) ensaios de velocidade de propagação de ultrassom (mesmos CPs do RCA)	(1) Moldagem e cura de 28 dias (2 CPs x 6 traços x 3 idades) = 36 CPs (2b) Carregamento com 90% da carga de ruptura aos 28 dias 36 CPs (3) Cura: 28/56/84 dias - Ensaio: 28/56/84 dias
(3) ensaios de absorção por capilaridade	(1) Moldagem e cura de 28 dias (3 CPs x 6 traços x 2 idades) = 36 CPs (2a) Ensaio de 3 CPs x 6 traços com 28 dias de idade = 18 CPs (2b) Carregamento com 90% da carga de ruptura aos 28 dias 18 CPs (3) Ensaio de 3 CPs x 6 traços com 56 dias de idade = 18 CPs
(4) ensaios de difusão de íons cloreto	(1) Moldagem e cura: 28 dias (3 CPs x 6 traços x 2 idades) = 36 CPs (2a) Carregamento com 90% da carga de ruptura aos 28 dias (2b) Corte dos corpos de prova sendo usada as fatias do meio (2c) Ensaio de 3 CPs x 6 traços com 28 dias de idade = 18 CPs (3) Ensaio de 3 CPs x 6 traços com 56 dias de idade = 18 CPs

A quantidade de materiais necessários foi determinada conforme as Tabela 24 e Tabela 25.

Tabela 24 – Tipo e quantidades de corpos de prova por ensaio

Ensaio	Tipo e quantidade de corpos de prova	Volume
Resistência à compressão axial (RCA)	3 CPs x 6 traços x 2 idades = 36 CPs Ø100 x 200 mm	227 litros
Propagação de ultrassom (mesmos CPs do RCA)	3 CPs x 6 traços x 3 idades = 54 CPs Ø100 x 200 mm fissurados	340 litros
Absorção por capilaridade	3 CPs x 6 traços x 2 idades = 18 CPs Ø100 x 200 mm 18 CPs Ø100 x 200 mm fissurados	227 litros
Difusão de íons cloreto	3 CPs x 6 traços x 2 idades = 36 CPs Ø100 x 200 mm fissurados	227 litros

Tabela 25 – Quantidade de materiais necessários para este estudo

Material	Consumo por m ³	Material para ensaio
Água	196 kg	234 kg
Cimento (CP V ARI Plus / CP II-E 40 / CP III 40 RS)	392 kg	3 x 156 kg/cimento
Catalisador Cristalino	10 kg	6 kg
Agregado miúdo	Areia de quartzo (70%)	573 kg
	Areia artificial (30%)	246 kg
Agregado graúdo	Pedrisco (70%)	651 kg
	Brita 01 (30%)	279 kg
Aditivo polifuncional (0,6%)	2,4 kg	2,9 kg
Aditivo hiperplastificante (1,0%)	4,0 kg	4,8 kg
Aditivo modificador de viscosidade (0,5%)	2,0 kg	2,4 kg
Fibra de Vidro (12 mm)	900 g	1,1 kg

3.5.1 Definição dos traços

O método empregado para a definição das dosagens foi o apresentado na PES-QMAT-LAB-003 – Dosagem experimental de concreto – Procedimento interno embasado nas recomendações do método American Concrete Institute C-211. Como parâmetro inicial do estudo

de dosagem do concreto autocicatrizante auto-adensável, foi fixado a relação água/cimento em 0,5 e o consumo de cimento em 400 kg/m^3 .

A dosagem recomendada do catalisador cristalino é de 2 a 3% sobre o peso de cimento (s.p.c.), sendo adotado o valor médio de 2,5% sobre o consumo de cimento de 400 kg/m^3 e, portanto foram adicionados 10 kg de catalisador cristalino para cada m^3 de concreto. O aditivo catalisador cristalino não devem ser considerados aglomerantes e, portanto a dosagem deve ser feita por adição e não por substituição.

Sendo assim, estabeleceram-se 6 diferentes traços de concreto autocicatrizantes, apresentados na Tabela 26. Observa-se que as principais variáveis são os diferentes tipos de cimento e a adição ou não de catalisador cristalino na mistura.

Tabela 26 – Dosagens utilizadas do catalisador cristalino e das fibras de vidro

Dosagem	Tipo de cimento	Catalisador cristalino	Fibra de vidro
1	CP III 40 RS	10 kg/m^3 (2,5%)	900 g/m^3
2	CP III 40 RS		900 g/m^3
3	CP II E 40	10 kg/m^3 (2,5%)	900 g/m^3
4	CP II E 40		900 g/m^3
5	CP V ARI plus	10 kg/m^3 (2,5%)	900 g/m^3
6	CP V ARI plus		900 g/m^3

Foram utilizados três tipos de aditivos químicos comerciais nos traços selecionados, os dados técnicos e dosagens normalmente utilizadas para a formulação de concretos auto-adensáveis são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 – Dosagens dos aditivos químicos utilizados no concreto autoadensável

Aditivo	Polifuncional	Hiperplastificante	Modificador de viscosidade
Base	Lignosulfonato	policarboxilato + antiespumante	éter de celulose
Massa específica	1,20 g/cm ³	1,05 g/cm ³	1,01 g/cm ³
Dosagem	0,6 % s.p.c.	1,0 % s.p.c.	0,5 % s.p.c.
Uso	Redutor de água em 15%	Redutor de água em 40%	Estabilizador e redutor da exsudação

Dados fornecidos pelo fabricante, período de ensaio: 2012

Na dosagem inicial do concreto, selecionou-se o traço de modo que a reologia destas amostras apresentasse propriedades de concreto auto-adensável, conforme a composição dada na Tabela 28. Portanto, para todos os traços foram fixados o consumo de água em 192 litros/m³ e o consumo de cimento em 392 kg/m³, mantendo a relação água/aglomerante em 0,5. O catalisador cristalino foi dosado por adição para não alterar a composição padrão dos traços.

Tabela 28 – Composição padrão da dosagem ajustada do concreto utilizado (kg/m³)

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

O traço final consolidada para os 6 traços é apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 – Traço consolidado com consumo de água e cimento fixos

Cimento	água	areia de quartzo	areia artificial	pedrisco	brita 1	catalisador cristalino	fibra de vidro
1	0,5	1,462	0,628	1,661	0,712	0,025	0,002

3.5.2 Sequência de mistura na betoneira

Primeiramente, foram misturados os agregados graúdos (pedrisco e brita 1), e o catalisador cristalino com 2/3 da água de amassamento, de modo que a pasta de catalisador cristalino se espalhasse sobre a superfície do agregado graúdo, e conseqüentemente na interface pasta/agregado.

Posteriormente foi adicionado o cimento, a areia (areia natural e artificial), as fibras de vidro e o restante da água de amassamento, ainda sem a utilização dos aditivos químicos.

Na Figura 19 pode-se ver, nessa etapa, um concreto bastante coeso e seco, a consistência com abatimento 0 cm foi determinada através do ensaio ABNT NBR NM 67:1998 (concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone). O abatimento é uma medida da consistência do concreto, definido pela diferença em centímetros entre a altura do molde e a altura da massa de concreto depois de assentada.



Figura 19 – Concreto sem aditivos químicos com consistência coesa e seca (abatimento de 0 cm).

Nesta etapa intermediária, foi proposta a adição de um superplastificante polifuncional para aumentar a consistência do concreto a partir de um abatimento 0 cm para 8 cm, isto se justifica por questões técnicas e de economia do consumo de superplastificante à base de policarboxilato, que é normalmente mais caro.

Tecnicamente, é recomendável que o abatimento inicial seja diferente de 0 cm, pois o este pode ser um parâmetro importante para a aceitação do concreto na obra. Dessa forma, foi necessária a adição de 0,6% s.p.c. de superplastificante polifuncional ao concreto para o ajuste da consistência para que o mesmo apresentasse um abatimento de 8 cm (Figura 20).



Figura 20 - - Concreto com aditivo superplastificante polifuncional com abatimento 8 cm.

Para concluir a sequência de mistura, segue-se com o uso combinado do aditivo superplastificante à base de policarboxilato e do aditivo modificador de viscosidade para que nesta etapa o concreto já apresente propriedades auto-adensáveis caracterizado pelo equilíbrio entre uma grande fluidez e a resistência à segregação e exsudação.

A dosagem de 1,0% de superplastificante à base de policarboxilato torna o concreto tão mais fluido que a medida da consistência é definida pelo diâmetro da circunferência em milímetros do espalhamento que a massa de concreto sofre depois de assentada, este valor foi determinado através do ensaio ABNT NBR NM 68:1998 (Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff), (Figura 21).



Figura 21 - – Concreto com superplastificante de policarboxilato com espalhamento > 700 mm.

Finalmente, a dosagem de 0,5% de aditivo modificador de viscosidade promove maior coesão à massa de concreto e estabiliza a exsudação da água. que diferencia um concreto de alta trabalhabilidade de um concreto auto-adensável conforme a Figura 22.



Figura 22 – Detalhe das bordas do espalhamento do concreto sem exsudação

3.5.3 Ensaios de controle da reologia do concreto autoadensável

Todos os seis traços foram misturados por 7 minutos em betoneira de 400 litros. Depois de completado o procedimento de mistura, foram conduzidos ensaios no concreto fresco para determinar o diâmetro do espalhamento flow, caixa L e o teor de ar incorporado de acordo com as normas de ensaios ABNT NBR NM 68:1998 (Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff) e ABNT NBR NM 47:2002 (Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico).

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados em forma metálica, previamente preparados com desmoldante. Para o adensamento do concreto, foi utilizada uma haste metálica. Somente após 24 horas, os corpos de prova foram desformados e armazenados em água saturada com cal à 23 °C por 28 dias, segundo recomendações da norma ABNT NBR 5738:2007 (Concreto – Procedimento para a moldagem e cura de corpos de prova).

3.5.4 Ensaio de resistência à compressão axial (RCA)

Foram realizados os ensaios de RCA com corpos de prova Ø100 x 200 mm, segundo a norma ABNT NBR 5739:2007 (Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos) conforme o plano (Tabela 30) e cronograma (Tabela 31) de ensaio a seguir.

Tabela 30 – Plano de ensaio de resistência à compressão axial

Plano de Ensaio de RCA	
Série 1 ^a	3 CPs x 6 traços x 2 idades = 36 CPs Ø100 x 200 mm Cura: 7/28 dias – Rompimento com: 7/28 dias
Série 1b	3 CPs x 3 cimentos x 6 traços = 54 CPs Ø100 x 200 mm Cura: 28 dias – Carregamento com 90% da carga de ruptura aos 28 dias
Série 2	3 CPs x 3 cimentos x 6 traços = 54 CPs fissurados / cicatrizados Cura: 28/56/84 dias – Rompimento com: 28/56/84 dias

Tabela 31 – Cronograma de ensaio de resistência à compressão axial

Cronograma de ensaios de RCA		
Série 1	7 dias	Rompimento de 3 CPs x 6 traços = 18 CPs
	28 dias	Rompimento de 3 CPs x 6 traços = 18 CPs Cálculo do valor de 90% da carga de ruptura aos 28 dias de cada traço
Série 1 ^a		Carregamento com 90% da carga de ruptura aos 28 dias de 54 CPs
		Rompimento de 3 CPs x 6 traços = 18 CPs fissurados / cicatrizados
Série 2	56 dias	Rompimento de 3 CPs x 6 traços = 18 CPs fissurados / cicatrizados
	84 dias	Rompimento de 3 CPs x 6 traços = 18 CPs fissurados / cicatrizados

Após 28 dias da moldagem, 90% da carga de ruptura aos 28 dias foi cuidadosamente mantida por 2 minutos, de modo a assegurar que esta não fosse excessiva e resultasse na ruptura devido a propagação progressiva do microfissuramento. O nível de 90% da carga de ruptura foi adotado também nos estudos de Sahmaran *et al* (2008, p. 2), que utilizou a carga de 70 % e 90%.

Após o pré-carregamento, as amostras de concreto foram armazenadas em água saturada com cal, e as propriedades mecânicas foram monitoradas durante 28, 56 e 84 dias estimados como necessário para a cicatrização destas fissuras.

3.5.5 *Ensaio de determinação da velocidade de propagação ultrassônica*

Foram determinados a velocidade de propagação ultrassônica logo depois do carregamento com 90% da carga de ruptura e após 28 e 56 dias. Esse ensaio eram executados com os mesmos corpos de prova cilíndricos Ø100 x 200 mm momentos antes do rompimento destes CPs nos ensaios de RCA. A Tabela 32 apresenta o plano de ensaio destes corpos de prova fissurados e cicatrizados com as idades de 28/56/84 dias de acordo com a ABNT NBR 8802:1994 - (Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica).

Tabela 32 - Ensaio de determinação da velocidade de propagação ultrassônica

Plano de ensaios de propagação de ultrassom	
Ensaio de propagação de ultrassom (utiliza os mesmos CPs do RCA)	2 CPs x 6 traços x 28/56/84 dias = 36 CPs Ø100 x 200 mm Cura: 28/56/84 dias - Ensaio: 28/56/84 dias

3.5.6 *Ensaio de absorção por capilaridade*

Para os ensaios de absorção por capilaridade e difusão de íons cloretos os corpos de prova fissurados foram serrados em fatias com espessuras de 50 mm, sendo que foram usadas as duas fatias do meio de cada corpo de prova. A Tabela 33 apresenta o plano de ensaio determinando a absorção por capilaridade dos corpos de prova cilíndricos de Ø100 x 50 mm após 28 e 56 dias de cura de acordo com a norma ASTM C1585 (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes).

Tabela 33 - Ensaio de absorção por capilaridade

Plano de ensaios de absorção por capilaridade	
Ensaio de absorção por capilaridade	3 CPs x 6 traços x 2 idades = 36 CPs Ø100 x 50 mm - Cura: 28/56 dias - Ensaio: 28/56 dias

O ensaio de absorção por capilaridade consistiu no registro do aumento de massa de uma amostra cilíndrica (Ø100mm x 50 mm) pela absorção por sucção capilar dentro de um determinado intervalo de tempo de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 25, 36, 49, 64, 81, 120 e 360 minutos.

A taxa de absorção (mm), definido como a diferença de massa (g), dividida pela área da seção do corpo de prova (mm²), a densidade da água e a temperatura registrada (g/mm³), foi plotado no eixo da raiz quadrado de tempo (min^{1/2}). A inclinação da linha obtida define o índice de absorção do corpo de prova durante as 6 h do ensaio (Figura 23).

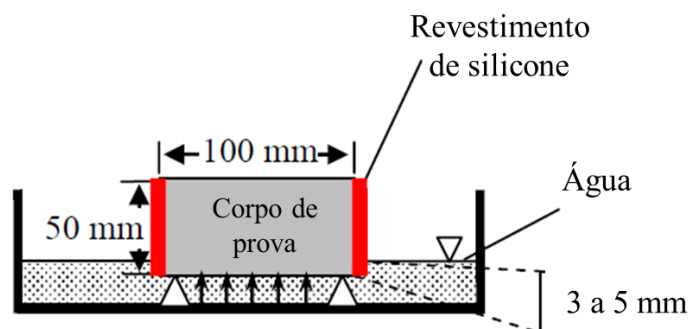


Figura 23 - Diagrama esquemático do teste absorção por capilaridade (SAHMARAN, KESKIN, et al., 2008, p. 875)

3.5.7 Ensaios de difusão de íons cloretos

Foram determinadas a difusão de íons cloretos com corpos de prova cilíndricos de $\varnothing 100 \times 50$ mm após 28 e 56 dias de cura de acordo com a norma ASTM C1202:2005 (Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration). O plano de ensaio é apresentado na Tabela 34.

Tabela 34 - Plano de ensaios de difusão de íons cloreto

Plano de ensaios de difusão de íons cloreto	
Ensaios de difusão de íons cloreto	3 CPs x 6 traços x 2 idades = 36 CPs $\varnothing 100 \times 50$ mm Cura: 28/56 dias - Ensaio: 28/56 dias

O método da ASTM C1202:2005 consiste no monitoramento da quantidade de corrente elétrica passante por corpos de prova de concreto com $\varnothing 100 \times 50$ mm, durante um período de 6 horas. Para realização deste ensaio, é utilizada uma célula de dois compartimentos, onde uma das câmaras é preenchida com uma solução de Na Cl, enquanto a outra contém uma solução de NaOH como mostra a Figura 24.

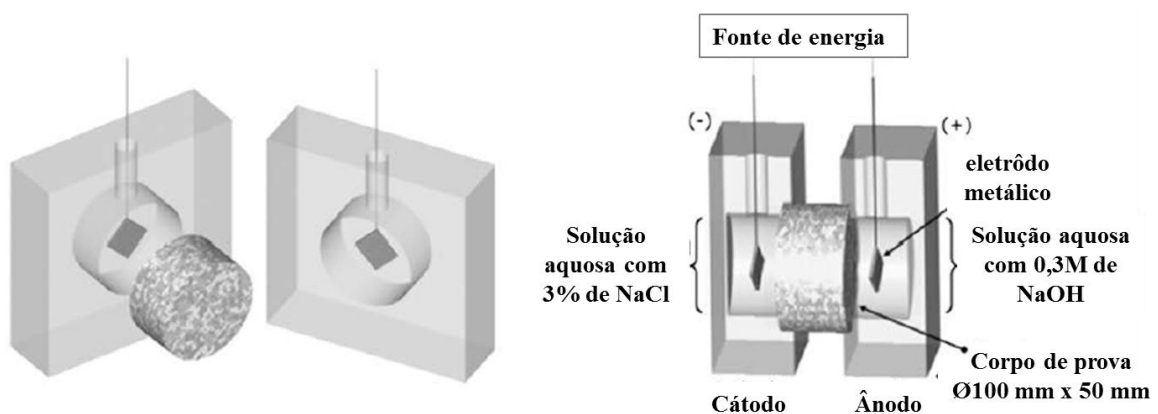


Figura 24 - Arranjo experimental da célula de ensaio de difusão de cloretos (Adaptado de MEDEIROS, FILHO e HELENE, 2009, p. 131).

Uma tensão de 60 V deve ser mantida entre as extremidades da amostra durante o ensaio, e determinada a carga total passante (em Coulombs) que é então relacionada com a resistência do concreto quanto à penetração dos cloretos conforme a Tabela 35.

Tabela 35 - Classificação da permeabilidade do concreto quanto aos cloretos baseada na carga passante. Traduzido de ASTM C1202 (2005)

Carga passante (Coulombs)	Permeabilidade do concreto aos cloretos
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito baixa
<100	Desprezível

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tanto a execução do ensaio exploratório simplificado (penetração de água sob pressão) como dos ensaios específicos mais complexos para os parâmetros reológicos, de recuperação das resistências mecânicas (resistência à compressão axial e determinação de velocidade de propagação de ultrassom) e de recuperação da estanqueidade (absorção por capilaridade e difusão de íons cloreto) contribuíram substancialmente para a compreensão sobre a influência de cimentos disponíveis no mercado nacional com percentuais distintos de escória de alto forno.

4.1 Ensaio simplificado para o concreto autocicatrizante

O ensaio simplificado tem por objetivo auxiliar na compreensão dos parâmetros básicos dos ensaios dos concretos autocicatrizantes ativados pelo catalisador cristalino. Para cimentos com adições, este longo período de indução de 60 dias parece ser necessário para assegurar um avançado grau de hidratação tanto do cimento Portland como das ativação das escórias de alto forno.

O carregamento das amostras com pressão hidrostática aos 28 dias com os valores de pressão a partir de 0,1 MPa (2 dias) / 0,3 MPa (1 dia) / 0,7 MPa (7 dias) mostraram que a indução da cicatrização foi efetiva.

4.1.1 *Resultados dos ensaios de penetração de água sob pressão*

Na Tabela 36 são apresentados os resultados dos ensaios de penetração de água sob pressão.

Tabela 36 – Resultados dos ensaios de penetração de água sob pressão

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

Os resultados dos ensaios de penetração de água sob pressão mostram o efeito impermeabilizante mais significativo das amostras aditivadas com o catalisador cristalino.

4.2 Ensaios específicos para o concreto autocicatrizante autoadensável

Os valores dos resultados dos ensaios específicos deste programa experimental ficaram bastante próximos dos resultados encontrados por SAHMARAN, KESKIN, *et al.* (2008) e convergem quanto a tendência de quanto maior a quantidade das adições minerais nos cimentos comerciais, maior a quantidade de materiais não hidratados para potencializar uma possível autocicatrização a longo prazo, referindo-se ao cimento CP III 40 RS.

4.2.1 Resultados dos ensaios de reologia do concreto autoadensável

Como pode ser observado na Tabela 37, os espalhamentos flow de todos os traços estavam na faixa de 680–780 mm, e o teor de ar incorporado estava entre 0,7 a 0,8%. Não foi detectada

qualquer segregação ou exsudação em nenhum dos traços durante o ensaio de espalhamento flow e da caixa L. Portanto, todos os traços de concretos podem ser considerados autoadensáveis.

Tabela 37. Propriedades no estado fresco dos traços de concretos utilizados

Traço	Tipo de aglomerante	Caixa L	Ar incorporado	Espalhamento Flow
1	cimento CP III + catalisador cristalino	ok	0,7 %	700 mm
2	cimento CP III	ok	0,8 %	760 mm
3	cimento CP II-E + catalisador cristalino	ok	0,7 %	730 mm
4	cimento CPII-E	ok	0,7 %	780 mm
5	cimento CP V-ARI + catalisador cristalino	ok	0,8 %	680 mm
6	cimento CP V-ARI	ok	0,7 %	720 mm

Observando a Tabela 37 podemos concluir que a adição do catalisador cristalino no traço de concreto autoadensável reduz levemente o espalhamento flow das amostras.

4.2.2 Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial (RCA)

A Tabela 38 apresenta as propriedades mecânicas de resistência à compressão dos amostras de concreto. As colunas azuis apresentam os amostras com idades de 7 dias e 28 dias curados normalmente (Série 1). As colunas verdes apresentam as amostras fissurados pelo pré-carregamento com idades de 28 dias, 56 dias e 84 dias (Série 2). A Figura 25 apresenta o comportamento da resistência à compressão devido a fissuração e ao efeito autocicatrizante das microfissuras.

Tabela 38 – Propriedades da resistência à compressão do concreto (MPa)

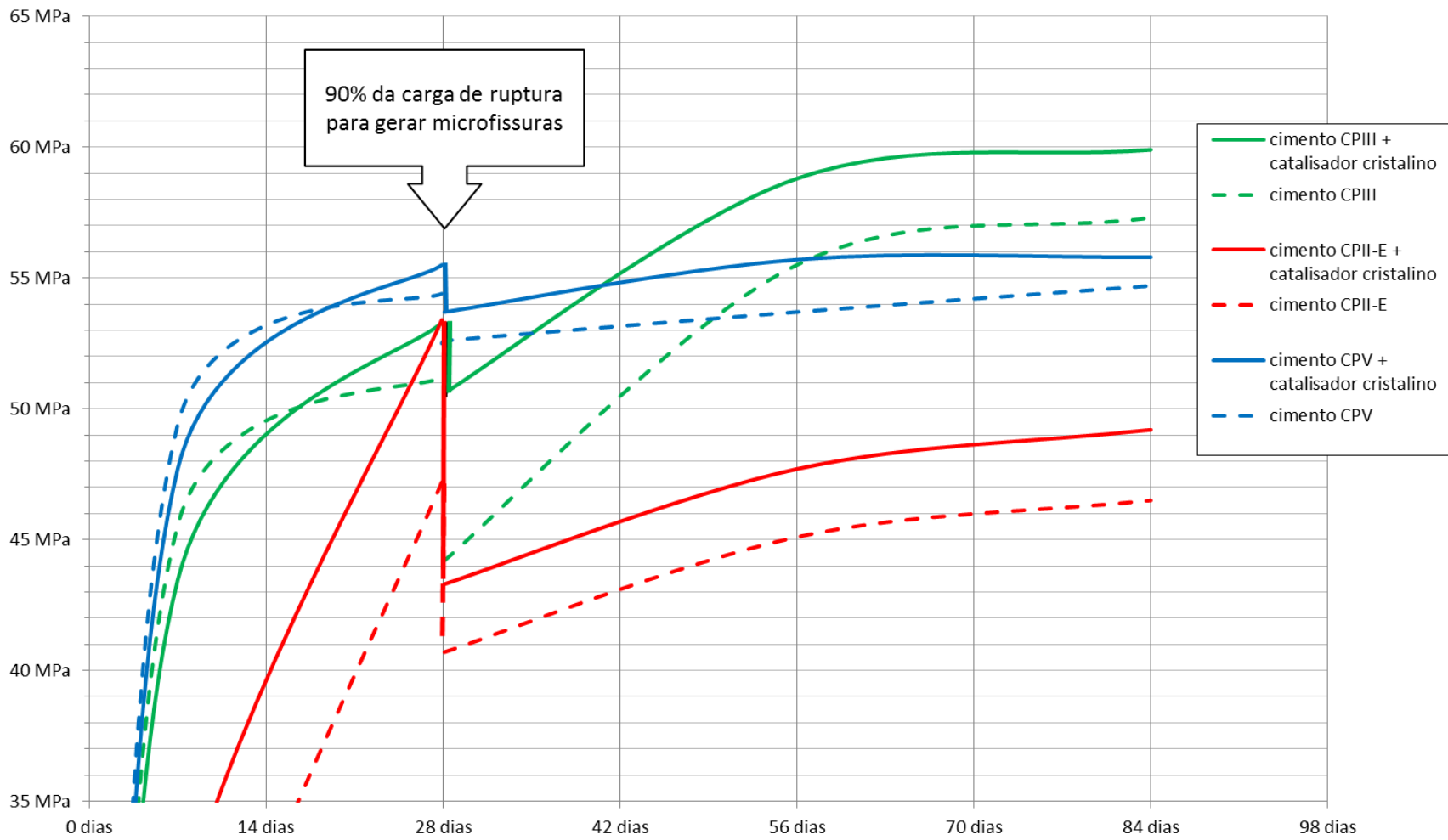
Traço	Tipo de aglomerante	Resistência à compressão (MPa)						
		Série 1			Série 2			
		7dias	28 dias	Perda por fissuração	28 dias	56 dias	84 dias	Recuperação por cicatrização
1	cimento CPIII + catalisador	43,5	53,3	-5,1%	50,6	58,8	59,9	+17,4%
2	cimento CPIII	45,6	51,2	-13,7%	44,2	55,5	57,3	+25,6%
3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

Os resultados dos ensaios nas maiores idades (84 dias) das propriedades mecânicas mostram uma maior de recuperação dos cimentos comerciais que possuem maiores teores de escória de alto forno, cimento CP III e CP II respectivamente. O comportamento hidráulico latente da escória de alto forno nas amostras de concreto é essencial para a sua autocicatrização em longo prazo (Tabela 39).

Tabela 39 – Comportamento da resistência à compressão a fissuração e ao efeito autocicatrizante.

Traço	Tipo de aglomerante	Perda por fissuração	Recuperação por cicatrização
1	cimento CP III + catalisador cristalino	-5,1%	+17,4%
2	cimento CP III	-13,7%	+25,6%
3	cimento CP II-E + catalisador cristalino	-18,9%	+11,0%
4	cimento CPII-E	-13,8%	+12,3%
5	cimento CP V-ARI + catalisador cristalino	-3,2%	+3,8%
6	cimento CP V-ARI	-3,3%	+3,9%

Figura 25 – Comportamento da resistência à compressão devido a fissuração e ao efeito autocicatrizante das microfissuras



Pela Figura 26, a amplitude das propriedades mecânicas de perda por fissuração e recuperação por cicatrização se deve mais pelas características do tipo de cimento. Os cimentos com maiores teores de escória de alto-forno CP III e CP II-E mostram uma maior de recuperação em idades mais avançadas.

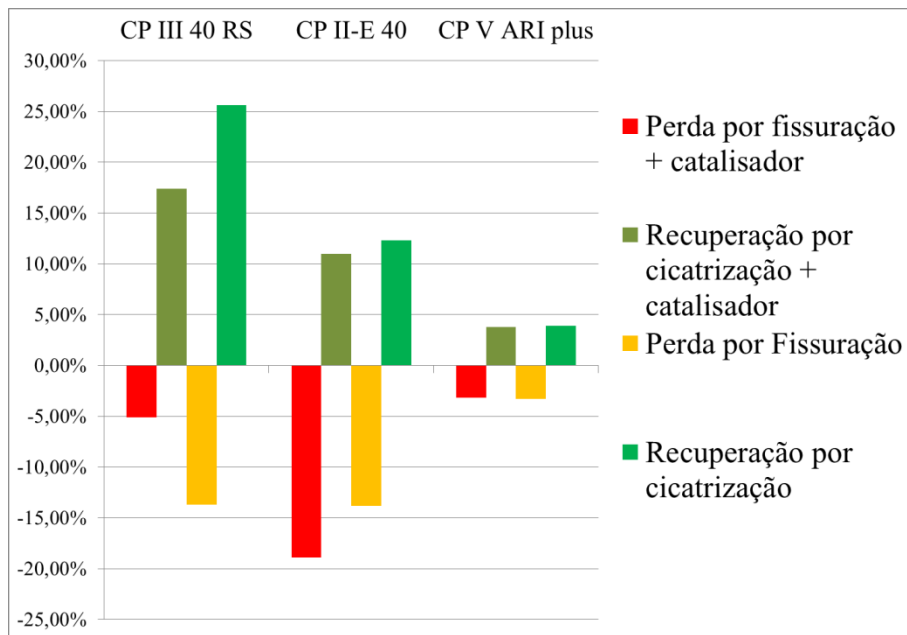


Figura 26 – Comparativo das propriedades mecânicas de perda por fissuração e recuperação por cicatrização entre os 3 tipos de cimentos

4.2.3 Resultados dos ensaio de velocidade de propagação ultrassônica

A Tabela 40 apresenta as propriedades mecânicas da velocidade de propagação de onda ultrassônica (m/s) através das amostras de concreto.

Tabela 40 – Propriedades da velocidade de propagação de onda ultrassônica (m/s)

Traço	Tipo de aglomerante	Após a fissuração			28 dias de cicatrização			56 dias de cicatrização		
		CP1	CP2	Média	CP1	CP2	Média	CP1	CP2	Média
1	cimento CPIII + catalisador cristalino	4527	4500	4514	4545	4535	4540	4562	4558	4560
2	cimento CPIII	4412	4414	4413	4640	4651	4646	4545	4614	4580
3	cimento CPII-E + catalisador cristalino	4566	4566	4566	4654	4675	4665	4785	4812	4799
4	cimento CPII-E	4098	4395	4247	4831	4854	4843	4721	4708	4714
5	cimento CPV + catalisador cristalino	4570	4560	4565	4457	4527	4492	4568	4522	4545
6	cimento CPV	4691	4668	4679	4444	4543	4494	4554	4543	4549

A velocidade da propagação de ultrassom através de qualquer material sólido é afetados pela existência de fissuras no material. Estes valores são muito próximos dos resultados de (SAHMARAN, KESKIN, *et al.*, 2008) com as velocidades de propagação de ondas de ultrassom entre 4000 a 5000 m/s.

ABDEL-JAWAD e DEHN (*apud* RILEM, 2013, p. 147) empregou esta técnica para avaliar o potencial de cicatrização de fissuras em concretos autoadensáveis onde a velocidade do pulso ultrassônico das amostras previamente fissuradas são iguais ou mesmo superiores que os obtidos para as amostras de controle. Isto significa que todas as fissuras geradas no pré-fissuramento foram cicatrizadas como resultado da hidratação continua do cimento quando exposto a uma condição de cura submersa em água por 28 dias.

4.2.4 Resultados dos ensaios de absorção por capilaridade

Os resultados dos ensaios de absorção por capilaridade dos três cimentos são apresentados.

4.2.4.1 Resultados de absorção por capilaridade do cimento CP III 40 RS

Para o cimento CP III 40 RS, a Tabela 41 apresenta os resultados do ensaio da taxa de absorção de água e, valores das amostras (F) fissuradas aos 28 dias e, na Tabela 42 das amostras (FC) fissuradas aos 28 dias e cicatrizadas durante o período de 28 dias até os 56 dias.

Tabela 41. Taxa de absorção de água das amostras ensaiadas logo após a fissuração (F)

Amostras de controle	CP III + catalisador (F) (fissuradas aos 28 dias)	CP III (F) (fissuradas aos 28 dias)
1 min	0,158	0,209
2 min	0,193	0,276
3 min	0,214	0,311
4 min	0,232	0,343
6 min	0,245	0,366
8 min	0,253	0,389
12 min	0,274	0,389
16 min	0,291	0,412
20 min	0,301	0,437
25 min	0,313	0,461
36 min	0,361	0,501
49 min	0,393	0,531
64 min	0,421	0,571
81 min	0,446	0,613
2 horas	0,485	0,642
6 horas	0,609	0,807

Tabela 42. Taxa de absorção das amostras fissuradas aos 28 dias e cicatrizadas até 56 dias (FC)

Amostras de controle	CP III + catalisador (fissuradas e cicatrizadas de 28 a 56 dias)	CP III (fissuradas e cicatrizadas de 28 a 56 dias)
1 min	0,120	0,141
2 min	0,163	0,185
3 min	0,184	0,209
4 min	0,222	0,229
6 min	0,24	0,244
8 min	0,254	0,258
12 min	0,262	0,269
16 min	0,27	0,292
20 min	0,279	0,303
25 min	0,293	0,319
36 min	0,309	0,354
49 min	0,323	0,365
64 min	0,35	0,384
81 min	0,363	0,405
2 horas	0,412	0,467
6 horas	0,455	0,485

4.2.4.2 Resultados de absorção por capilaridade do cimento CP II E-40

Para o cimento CP II E-40, a Tabela 43 apresenta os resultados do ensaio da taxa de absorção de água e, valores das amostras (F) fissuradas aos 28 dias e, na das amostras (FC) fissuradas aos 28 dias e cicatrizadas durante o período de 28 dias até os 56 dias.

Tabela 43. Taxa de absorção de água das amostras ensaiadas logo após a fissuração (F)

Amostras de controle	CP II-E + catalisador (F) (fissuradas aos 28 dias)	CP II-E (F) (fissuradas aos 28 dias)
1 min	0,170	0,202
2 min	0,206	0,25
3 min	0,241	0,29
4 min	0,266	0,316
6 min	0,294	0,342
8 min	0,309	0,358
12 min	0,33	0,388
16 min	0,351	0,422
20 min	0,366	0,437
25 min	0,406	0,472
36 min	0,454	0,518
49 min	0,481	0,572
64 min	0,512	0,611
81 min	0,544	0,666
2 horas	0,608	0,719
6 horas	0,778	1,01

Tabela 44. Taxa de absorção das amostras fissuradas aos 28 dias e cicatrizadas até 56 dias (FC)

Amostras de controle	CP II-E + catalisador (fissuradas e cicatrizadas de 28 a 56 dias)	CP II-E (fissuradas e cicatrizadas de 28 a 56 dias)
1 min	0,142	0,171
2 min	0,18	0,214
3 min	0,2	0,236
4 min	0,219	0,259
6 min	0,236	0,274
8 min	0,242	0,284
12 min	0,261	0,298
16 min	0,277	0,317
20 min	0,303	0,337
25 min	0,323	0,361
36 min	0,362	0,398
49 min	0,4	0,433
64 min	0,427	0,455
81 min	0,456	0,487
2 horas	0,494	0,546
6 horas	0,667	0,667

4.2.4.3 Resultados de absorção por capilaridade do cimento CP V ARI plus

Para o cimento CP V ARI plus, a Tabela 45 apresenta os resultados do ensaio da taxa de absorção de água das amostras (F) fissuradas aos 28 dias e, na Tabela 46 Tabela 45 das amostras (FC) fissuradas aos 28 dias e cicatrizadas durante o período de 28 dias até os 56 dias.

Tabela 45. Taxa de absorção de água das amostras ensaiadas logo após a fissuração (F)

Amostras de controle	CP V + catalisador (F) (fissuradas aos 28 dias)	CP V (F) (fissuradas aos 28 dias)
1 min	0,131	0,123
2 min	0,162	0,155
3 min	0,191	0,189
4 min	0,207	0,211
6 min	0,223	0,242
8 min	0,238	0,257
12 min	0,251	0,279
16 min	0,265	0,302
20 min	0,28	0,312
25 min	0,314	0,354
36 min	0,35	0,403
49 min	0,382	0,434
64 min	0,405	0,461
81 min	0,435	0,494
2 horas	0,497	0,559
6 horas	0,616	0,726

Tabela 46. Taxa de absorção das amostras fissuradas aos 28 dias e cicatrizadas até 56 dias (FC)

Amostras de controle	CP V + catalisador (fissuradas e cicatrizadas de 28 a 56 dias)	CP V (fissuradas e cicatrizadas de 28 a 56 dias)
1 min	0,091	0,151
2 min	0,131	0,201
3 min	0,148	0,239
4 min	0,166	0,264
6 min	0,187	0,293
8 min	0,186	0,31
12 min	0,204	0,337
16 min	0,225	0,373
20 min	0,25	0,386
25 min	0,274	0,425
36 min	0,308	0,47
49 min	0,344	0,525
64 min	0,377	0,564
81 min	0,406	0,615
2 horas	0,444	0,67
6 horas	0,617	0,962

Os gráficos comparativos dos ensaios de absorção por capilaridade dos três cimentos com e sem o catalisador cristalino são apresentados na Figura 27.

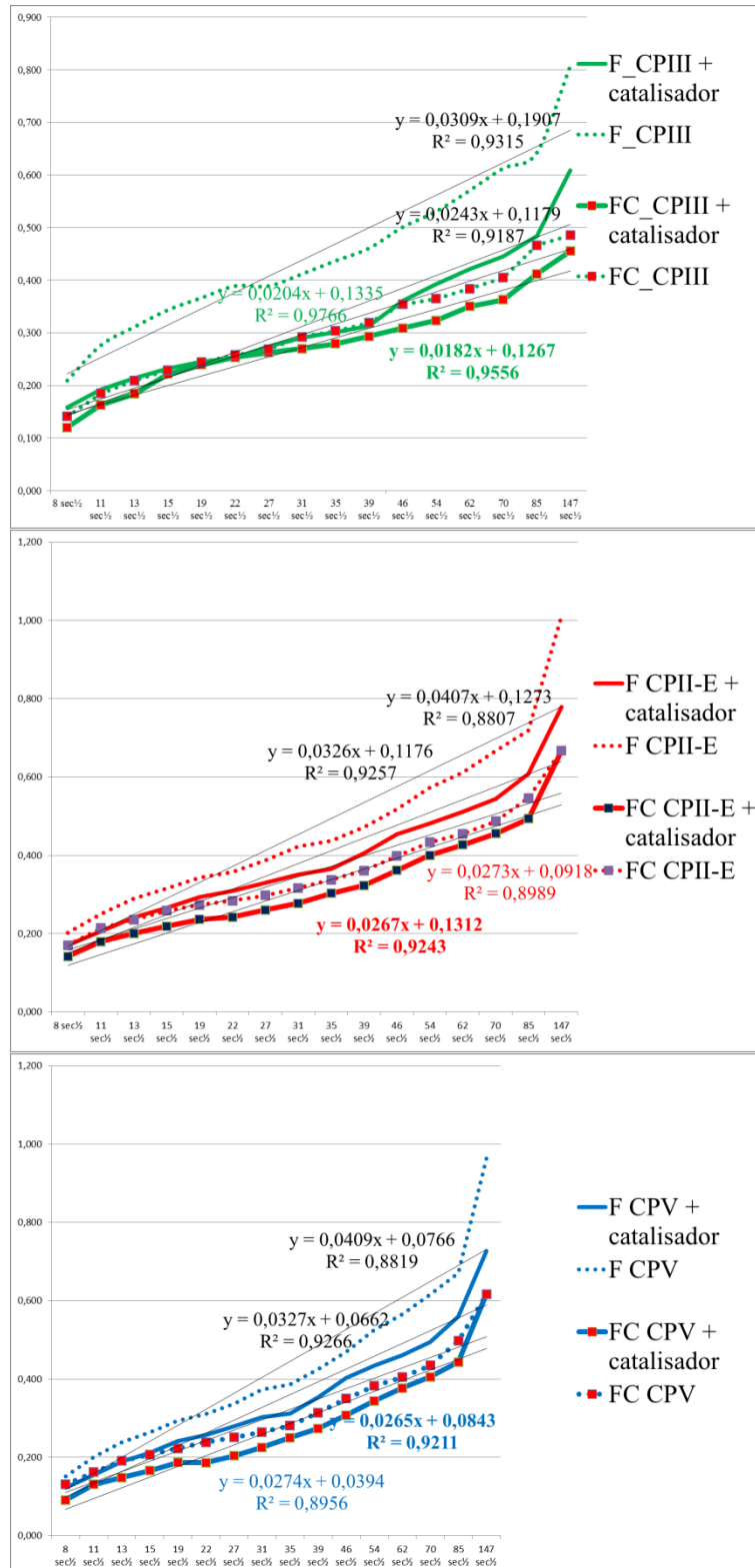


Figura 27 - Comparação da taxa de absorção de água dos amostras fissuradas (F) e fissuradas/cicatrizadas (F/C) para os cimentos CP III 40 RS, CP II- E 40 e CP V ARI plus.

Os resultados comparativos dos ensaios de absorção de água por capilaridade das amostras (F) fissuradas aos 28 dias dos três cimentos são apresentados na e, das amostras (FC) fissuradas aos 28 dias e cicatrizadas durante o período de 28 dias até os 56 dias na Um resumo das taxas de absorção dos três cimentos com e sem o catalisador cristalino são apresentadas na Tabela 47 e na Figura 28.

Tabela 47 – Resumo das taxas de absorção dos cimento CP III fissurados (F) e cicatrizados (FC)

Amostras	Fissuradas e cicatrizadas (FC)		Fissuradas (F)	
	+ catalisador	-	+ catalisador	-
CP III	0,0182 (R ² = 0,9187)	0,0204 (R ² = 0,9766)	0,0243 (R ² = 0,9187)	0,0309 (R ² = 0,9315)
CP II-E	0,0267 (R ² = 0,9243)	0,0273 (R ² = 0,9187)	0,0326 (R ² = 0,9253)	0,0407 (R ² = 0,8807)
CP V ARI	0,0274 (R ² = 0,8956)	0,0265 (R ² = 0,9211)	0,0327 (R ² = 0,9266)	0,0406 (R ² = 0,8819)

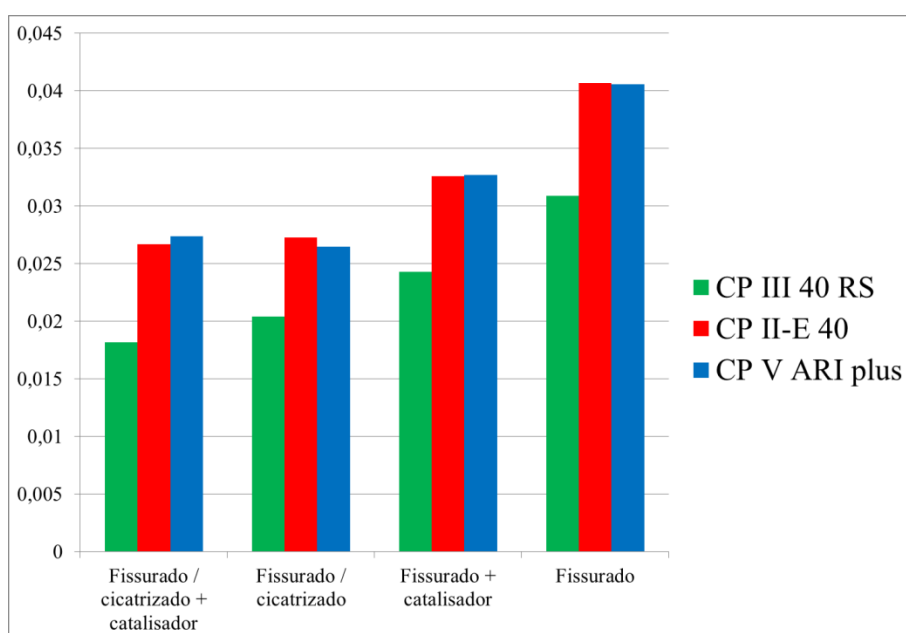


Figura 28 – Comparativo da taxa de absorção entre os 3 tipos de cimentos

1. Para o cimento CP III 40 RS o uso do catalisador cristalino diminui as taxas de absorção por capilaridade tanto das amostras fissuradas aos 28 dias e como também das amostras fissuradas e cicatrizadas. O período de cicatrização de 28 dias entre a fissuração aos 28 dias e o ensaio aos 56 dias foi suficiente para mostrar uma melhora significativa da taxa de absorção à água de todas as amostras de cimento CP III 40 RS;
2. Para o cimento CP II E-40 o uso do catalisador cristalino diminui as taxas de absorção por capilaridade tanto das amostras fissuradas aos 28 dias. O período de cicatrização de 28 dias entre a fissuração aos 28 dias e o ensaio aos 56 dias foi suficiente para mostrar uma melhora significativa da taxa de absorção à água da amostra de cimento CP II E-40 sem o catalisador;
3. Para o cimento CP V ARI plus o uso do catalisador cristalino diminui as taxas de absorção por capilaridade das amostras fissuradas e cicatrizadas. O período de cicatrização de 28 dias entre a fissuração aos 28 dias e o ensaio aos 56 dias foi suficiente para mostrar uma melhora significativa da taxa de absorção à água das amostras de cimento CP V ARI plus.

4.2.5 Resultados dos ensaios de difusão de íons cloretos

Os resultados de difusão de cloretos são apresentados na Tabela 48 e tabela 45.

Tabela 48 - Difusão de íons cloretos em amostras ensaiadas logo após o fissuramento

Tipo de cimento	CP01		CP02		CP03		Média
cimento CPIII	1755		1737		1800		1764
	27 °C	33 °C	26 °C	33 °C	26 °C	33 °C	
cimento CPIII + catalisador cristalino	1773		1872		1935		1860
	23 °C	34 °C	24 °C	36 °C	24 °C	33 °C	
cimento CPII-E	3618		3771		4392		3927
	21 °C	51 °C	21 °C	52 °C	21 °C	54 °C	
cimento CPII-E + catalisador cristalino	4131		3888		4050		4023
	21 °C	55 °C	21 °C	51 °C	21 °C	53 °C	
cimento CPV ARI	5895		4716		4806		5139
	30 °C	68 °C	29 °C	55 °C	29 °C	55 °C	
cimento CPV ARI + catalisador cristalino	5166		5175		5445		5262
	27 °C	61 °C	27 °C	59 °C	27 °C	60 °C	

Tabela 49 – Difusão de íons cloretos após 28 dias de cicatrização

Tipo de cimento	CP01		CP02		CP03		Média
cimento CPIII	1071		1098		1089		1086
	22 °C	30 °C	22 °C	30 °C	22 °C	30 °C	
cimento CPIII + catalisador cristalino	1071		1296		1143		1170
	22 °C	30 °C	22 °C	29 °C	22 °C	29 °C	
cimento CPII-E	3267		3195		2862		3108
	21 °C	50 °C	21 °C	49 °C	21 °C	48 °C	
cimento CPII-E + catalisador cristalino	2502		3276		3897		3225
	21 °C	42 °C	21 °C	52 °C	21 °C	54 °C	
cimento CPV ARI	2196		2448		2709		2451
	21 °C	41 °C	21 °C	43 °C	21 °C	45 °C	
cimento CPV ARI + catalisador cristalino	2799		2646		2529		2658
	21 °C	43 °C	21 °C	44 °C	21 °C	43 °C	

Os resultados dos ensaios em baixas idades (28 dias) das propriedades de permeabilidade mostram uma maior de recuperação dos cimentos comerciais mais puros como o CP V. Quanto maior a disponibilidade de hidróxido cálcico livre Ca(OH)_2 , mais rápida é a formação de carbonatos nas amostras de concreto para a sua autocicatrização em curto prazo (Tabela 50).

Tabela 50 – Redução percentual da difusão de íons cloreto nos concretos após 28 dias de cicatrização

Traço	Tipo de aglomerante	Logo após o fissuramento	28 dias de cicatrização	Redução da difusão (%)
1	cimento CP III + catalisador cristalino	1764	1086	-38%
2	cimento CP III	1860	1170	-37%
3	cimento CP II-E + catalisador cristalino	3927	3108	-21%
4	cimento CPII-E	4023	3225	-20%
5	cimento CP V-ARI + catalisador cristalino	5139	2451	-52%
6	cimento CP V-ARI	5262	2658	-49%

Nos ensaios de difusão de cloreto, a Figura 29 mostra uma redução percentual da difusão de íons cloreto nos concretos após 28 dias de cicatrização para todas as amostras, sendo que para a amostra com cimento CP V-ARI + catalisador cristalino foi a que apresentou a maior redução percentual de 52%. O ensaio de difusão de cloretos não foi capaz de identificar quaisquer influências do efeito do catalisador cristalino sobre as amostras ensaiadas.

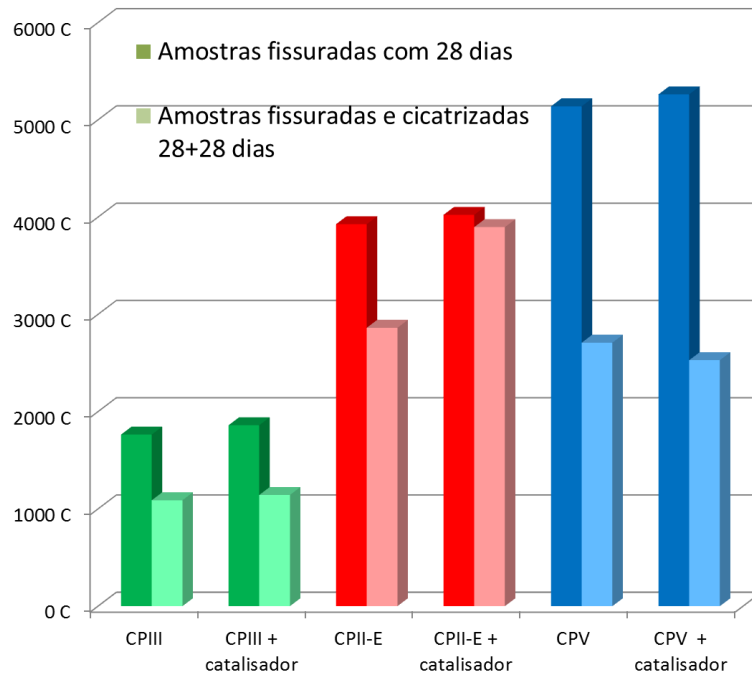


Figura 29 – Redução percentual da difusão de cloretos comparando os 3 cimentos

4.3 *Discussão dos resultados*

4.3.1 *Corpos de prova fissurados e não cicatrizados*

As amostras de controle não danificadas possuíam uma resistência à compressão média mais elevada de 52,5 MPa, portanto, comparar as propriedades dos corpos de prova fissurados por idade não necessariamente indica qualquer autocicatrização, conforme as reações de hidratação continuam mesmo para as amostras não danificadas.

Como esses corpos de prova fissurados foram testados imediatamente após a liberação do pré-carregamento, que podemos considerar como não tiveram tempo para passar por qualquer cicatrização da fissura. Os resultados na Tabela 51 mostram que, para as amostras não cicatrizadas, a resistência à compressão, a velocidade de pulso de ultrassom, a taxa de absorção de água e a difusão de íons cloreto foram afetados pelo catalisador cristalino e pelo teor de escória de alto forno nos cimentos comerciais.

Tabela 51 – Propriedades dos corpos de prova fissurados não cicatrizados

Traço	Tipo de aglomerante	Resistência à compressão	Ultrassom	Taxa de absorção	Difusão de cloretos
1	CP III + catalisador	50,6 MPa	4514 m/s	0,0243 mm	1764 C
2	CP III	44,2 MPa	4413 m/s	0,0309 mm	1860 C
3	CP II-E + catalisador	43,3 MPa	4566 m/s	0,0326 mm	3927 C
4	CP II-E	40,7 MPa	4247 m/s	0,0407 mm	4023 C
5	CP V-ARI + catalisador	53,7 MPa	4565 m/s	0,0327 mm	5139 C
6	CP V-ARI	52,6 MPa	4679 m/s	0,0406 mm	5262 C

Sob as condições de pré-carregamento de 90% da carga de ruptura, e conforme a proporção do teor de escória de alto-forno aumenta para 55%, houve um aumento significativo na recuperação das propriedades mecânica e de redução de permeabilidade, devido à adição do catalisador cristalino, em particular no ensaio de resistência à compressão axial. O catalisador cristalino melhora a resistência à compressão das amostras fissuradas não cicatrizadas em 14% no cimento CP III, 6% no CPII e 2% no CPV. Portanto, parece que os corpos de provas com a adição de escória de alto-forno e catalisador cristalino são menos afetados pelos carregamentos mecânicos. A taxa de absorção de água foi reduzida em 21,4% no cimento CPIII, 19,9% no CPII e 19,5% no CPV. Além disso, os valores de carga no ensaio de difusão de cloretos reduzem-se 5,2% nas amostras com cimento CPIII, 2,4% no CPII e 2,3% no CPV. No entanto, um aumento no teor de escória de alto-forno de 34% para 55% não chega a mostrar nenhum efeito significativo sobre as propriedades de permeabilidade. O dano mensurável foi menos claro no ensaio de velocidade do pulso ultrassônico.

A utilização de materiais cimentícios suplementares, tais como escória de alto-forno pode ter um efeito significativo sobre a permeabilidade do concreto conforme medido pelo ensaio de difusão de cloretos. Enquanto, que o componente ativo no clínquer do cimento Portland é um ligante hidráulico, na escória de alto forno, que é um resíduo da indústria do aço, também possui propriedades hidráulicas latentes. Isto significa que a reação de ativação necessitam de substâncias como Ca(OH)_2 , por exemplo, proveniente a partir da hidratação do cimento. No entanto, é sabido que os materiais cimentícios suplementares atualmente utilizados, tais como escória de alto-forno, cinzas volantes, sílica ativa ou metacaolim, reagem mais lentamente em comparação com o cimento Portland.

4.3.2 Efeitos da autocicatrização

O reparo de fissuras em elementos de concreto armado submetidos à carregamento mecânico utilizando os métodos de reparo convencionais, quer seja pelo bloqueio físico da água através da aplicação de uma película elastomérica impermeabilizante com capacidades de cobrimento de fissuras dinâmicas ou através da injeção de resinas flexíveis de baixa viscosidade para dentro dessas fissuras, tem sido um objetivo quando consideramos a durabilidade destes elementos estruturais de concreto.

Por outro lado, os concretos autocicatrizantes podem impermeabilizar integralmente toda a estrutura do concreto, com a aplicação de um impermeabilizante à base de catalisador cristalino, desde que as aberturas dessas fissuras não ultrapasse o valor de 0,4 mm (MORI, KURAMOTO, TAKAGI, HORIE, TANIMOTO, 1996). A Tabela 52 apresenta os resultados de resistência à compressão axial (RCA), velocidade de propagação ultrassônica, absorção por capilaridade e difusão de cloretos de amostras que foram submetidas a um pré-carregamento e, posteriormente, armazenados por até 56 dias em água para avaliar o grau de autocicatrização.

Tabela 52 – Propriedades dos corpos de prova fissurados e cicatrizados

Traço	Tipo de aglomerante	Resistência à compressão	Ultrassom	Taxa de Absorção	Difusão de cloretos
1	CP III + catalisador	58,8 MPa	4540 m/s	0,0182 mm	1086 C
2	CP III	55,5 MPa	4646 m/s	0,0204 mm	1170 C
3	CP II-E + catalisador	47,7 MPa	4566 m/s	0,0267 mm	3108 C
4	CP II-E	45,1 MPa	4665 m/s	0,0273 mm	3225 C
5	CP V-ARI + catalisador	55,7 MPa	4492 m/s	0,0274 mm	2451 C
6	CP V-ARI	53,7 MPa	4494 m/s	0,0265 mm	2658 C

Uma análise das Tabela 53 a Tabela 56 possibilitam a seguinte discussão quanto aos resultados dos ensaios das propriedades mecânicas e permeabilidade do efeito de autocicatrização das amostras. O efeito do catalisador cristalino melhora a resistência à compressão das amostras fissurados e cicatrizada em 5,9% no cimento CPIII, 5,8% no CPII e 3,7% no CPV.

Embora o menor valor da taxa de absorção de água de 0,0182 milímetros tenha sido obtido nas amostras com cimento CPIII + catalisador cristalino, uma não linearidade mais elevada foi obtida para as propriedades de permeabilidade nas amostras aditivadas com o catalisador cristalino, a taxa de absorção de água foi reduzida em 10,8% no cimento CPIII e 2,2% no CPII, mas aumenta em 3,4% no CPV. No ensaio de difusão de cloretos, os valores foram reduzidos em 7,2% no cimento CPIII, 3,6% no CPII e 7,8% no CPV. Estes valores mostram que o efeito de autocicatrização depende não só do tipo de cimento utilizado, o teor de escória de alto-forno e a adição de catalisador cristalino, mas também das condições de exposição à água e ao ar (SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS, 2012).

Tabela 53 - Recuperação da resistência à compressão

Traço	Tipo de aglomerante	Resistência à compressão 28 dias	Resistência à compressão 28 + 56 dias	Recuperação
1	CP III + catalisador	50,6 MPa	59,9 MPa	18.4%
2	CP III	44.2 MPa	57.3 MPa	29.6%
3	CP II-E + catalisador	43.3 MPa	49.2 MPa	13.6%
4	CPII-E	40.7 MPa	46.5 MPa	14.3%
5	CP V-ARI + catalisador	53,7 MPa	55,8 MPa	3.9%
6	CP V-ARI	52,6 MPa	54,7 MPa	4.0%

Tabela 54 – Velocidade de propagação ultrassônica

Traço	Tipo de aglomerante	Velocidade do ultrassom 28 dias	Velocidade do ultrassom 28 + 56 dias	Variação
1	CP III + catalisador	4514 m/s	4560 m/s	1.0%
2	CP III	4413 m/s	4580 m/s	3.8%
3	CP II-E + catalisador	4566 m/s	4799 m/s	5.1%
4	CPII-E	4247 m/s	4714 m/s	11.0%
5	CP V-ARI + catalisador	4565 m/s	4545 m/s	- 0.4%
6	CP V-ARI	4679 m/s	4549 m/s	- 2.8%

Tabela 55 – Redução da taxa de absorção de água

Traço	Tipo de aglomerante	taxa de absorção de água 28 dias	taxa de absorção de água 28 + 56 dias	Redução
1	CP III + catalisador	0,0243 mm	0,0182 mm	25,1%
2	CP III	0,0309 mm	0,0204 mm	34,0%
3	CP II-E + catalisador	0,0326 mm	0,0267 mm	18,1%
4	CPII-E	0,0407 mm	0,0273 mm	32,9%
5	CP V-ARI + catalisador	0,0327 mm	0,0274 mm	16,2%
6	CP V-ARI	0,0406 mm	0,0265 mm	34,7%

Tabela 56 – Redução da carga de difusão de cloretos

Traço	Tipo de aglomerante	Carga de difusão de íons 28 dias	Carga de difusão de íons 28 + 56 dias	Redução
1	CP III + catalisador	1764 C	1086 C	38%
2	CP III	1860 C	1170 C	37%
3	CP II-E + catalisador	3927 C	3108 C	21%
4	CPII-E	4023 C	3225 C	20%
5	CP V-ARI + catalisador	5139 C	2451 C	52%
6	CP V-ARI	5262 C	2658 C	49%

Como pode ser observado nas Tabelas 53 a Tabela 56, os danos e cicatrizações foram mensuráveis de uma forma mais claras com o teste de resistência à compressão, o ensaio de absorção e a difusão de cloretos.

Ao comparar o gráfico da taxa de absorção de água das amostras curadas armazenados em água, conforme o teor de incorporação de escória de alto-forno aumenta para 55 % com adição de catalisador cristalino (como mostrado na Figura 27), observa-se que uma redução significativa da absorção de água cumulativa com a raiz quadrada do tempo ocorreu, no entanto, as amostras curadas sem o catalisador cristalino mostram uma percentagem de recuperação superior. Isto sugere que o efeito de autocicatrização depende fortemente das condições de exposição à água e ao ar. Pode-se supor que, durante a fase de secagem, o excesso de água tenha se evaporado, por conseguinte, as concentrações de íons na água presente nas fissuras aumentam. Nesta situação, as quantidades de reagentes disponíveis para posteriores reações são consideravelmente concentradas, enquanto a quantidade de água também seja suficiente para as reações através da solução. Este fenômeno deve melhorar as reações químicas, a precipitação e mais hidratação contínua. além disso, a penetração de CO_2 na fissura durante o período de secagem, conduziria à formação adicional de carbonatos (CaCO_3) que são úteis para o selamento das fissuras.

À medida que o nível de incorporação de escória de alto-forno aumenta até 55%, as reduções de resistência à compressão foram mais visíveis nas amostras com 56 dias. Aos 90% de pré-carregamento, os valores de recuperação reduziram em 29,6% para 18,4% no cimento CPIII, 14,3% para 13,6% no CPII e 4,0% a 3,9% no CPV. Com base nas discussões anteriores, observou-se que, nas misturas de CAAs com escória de alto-forno, o material não ativado da escória de alto-forno disponível para posterior hidratação foi também maior. Portanto, parece que a escória de alto-forno influencia significativamente na autocicatrização dos corpos de prova pré-carregados mecanicamente; mesmo após 56 dias, a cura úmida é fundamental para a autocicatrização em longo

prazo. Os géis de C-S-H formados através das reações de ativação da escória de alto-forno desenvolveram uma boa ligação dentro das fissuras.

Conclusões semelhantes também podem ser feitas para o ensaio de difusão de íons cloreto. No entanto, deve notar-se que, entre os efeitos de autocicatrização, as reduções foram mais visíveis na janela de cicatrização de 28 dias. Os valores de redução foram de 52% para 49% para o cimento CPV, 38% a 37% para o CPIII e 21% a 20% para o CPII-E. Os efeitos de autocicatrização são mais visíveis nas propriedades de permeabilidade, quando comparado com as propriedades mecânicas. Portanto, ao olhar para as reduções o ensaio de difusão de íons cloreto apresentada na Tabela 56, pode ser observado que os resultados dos testes, tais como a recuperação das propriedades mecânicas e de estanqueidade mostram uma maior autocicatrização nas amostras com os cimentos CP III, CP V e CP II, respectivamente.

O pré-carregamento do concreto provoca um aumento na porosidade total e uma diminuição da sua resistência final à compressão. Como as fissuras se desenvolvem a partir de dentro da matriz de concreto, a estrutura de poros acaba sendo modificada e a continuidade das fissuras aumentada. O fissuramento interno inicialmente reduziu a resistência à compressão em 5,1 ~ 18,9% quando pré-carregado até 90% de sua resistência à compressão final. Mas após 56 dias, foram recuperados entre 3,9 ~ 29,6%. Isto porque o alto volume de escória de alto-forno, um material hidráulico latente, que possuía uma quantidade significativa de partículas não hidratadas disponíveis em suas microestrutura, contribuiu para o efeito de autocicatrização das fissuras pré-existentes ativados pelo catalisador cristalino. A recuperação das propriedades da resistência à compressão e da permeabilidade podem ser relacionados com o preenchimento progressivo de fissuras por géis de CSH recém-formadas devido a seus efeitos de autocicatrização. Os cimento CPIII e CPII-E modificados pelo catalisador cristalino, se beneficiaram de cura prolongada em água saturada com cal livre e mostram reduções mais significativas nas taxas de absorção de água do que as misturas de controle. Reações químicas em curso entre o catalisador cristalino e os subprodutos

dos cimentos podem ser promovidas por essas condições de cura, resultando em volumes reduzidos de vazios permeáveis.

Esta dissertação procura contribuir para o estudo dos concretos autocicatrizantes e na Tabela 57 foram consolidados quais ensaios seriam mais adequados e quais os parâmetros deveriam ser adaptados para melhor compreender e verificar este fenômeno.

Tabela 57 – Considerações sobre os ensaios simplificado e específicos quanto a autocicatrização

Tipo de ensaio	Verifica autocicatrização?		Pré-fissuramento / carregamento	Idade dos CPs no ensaio	Eficácia do catalisador cristalino?		Sugestões para futuras pesquisas
	Sim	Não			Sim	Não	
Penetração de água sob pressão		√	Pressão hidrostática 28 d / 0,7 MPa (NBR 10787)	56 dias	√		Pré carregamento 28 d → 3 d / 0,25 MPa (YANG, YANG e LI, 2011, p. 182)
Resistência à compressão axial (RCA)	√		Compressão axial 90% de 28d (SAHMARAN, KESKIN, <i>et al.</i> , 2008, p. 873)	28 / 56 / 84 dias	√		Compressão axial → Compressão diametral (SAHMARAN, YILDIRIM e ERDEM, 2013, p. 90)
Velocidade de propagação de ultrassom		√	Pré fissuramento 28 dias	28 / 56 dias		√	Pré fissuramento 14 dias ultrassom difuso (IN, HOLLAND, <i>et al.</i> , 2013, p. 43)
Absorção por capilaridade	√		Pré fissuramento 28 dias (SAHMARAN, KESKIN, <i>et al.</i> , 2008, p. 873)	28 / 56 dias	√		Duração do ensaio de 6 h → 384 h
Difusão de íons cloreto	√		Pré fissuramento 28 dias (SAHMARAN, KESKIN, <i>et al.</i> , 2008, p. 873)	28 / 56 dias		√	Pré fissuramento 28 dias → 60 dias Idade de Ensaio 56 dias → 120 dias Tensão do ensaio 60 V → 30 V (MEDEIROS, FILHO e HELENE, 2009, p. 130)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diferentes abordagens foram desenvolvidas para estudar novos tipos de concretos que possuam a capacidade de reparar as suas próprias fissuras. Entre essas abordagens, a abordagem pela autocicatrização autógena aprimora o mecanismo natural de colmatação do concreto, e utiliza em suas dosagens componentes de materiais genéricos que estariam presentes mesmo quando estas não fossem especificamente concebidas para a autocicatrização.

As amostras dos ensaios analisados utilizaram um catalisador cristalino específico, fibra de vidro resistente à álcalis e três tipos de cimentos comerciais brasileiros: cimento de escória de alto-forno (CP III 40 RS), cimento Portland modificado com escória de alto-forno (CP II-E 40) e cimento Portland puro (CP V ARI), com percentagens distintas de escória de alto forno, a 55 %, 35 % e 0 %, respectivamente. Essas amostras foram colocadas numa prensa sob 90 % da sua carga de ruptura para gerar fissuras, em seguida imersas em água para desencadear o mecanismo de autocicatrização e, subseqüentemente, submetidas à ensaios de laboratório após 28, 56 e 84 dias.

O objetivo desta pesquisa foi o desenvolvimento de um concreto autoadensável com capacidades de autocicatrização, que permitirá a concepção de estruturas de concreto mais duráveis. Os concretos autoadensáveis (CAA) foram uma das mais recentes conquistas na tecnologia do concreto. No entanto, em comparação com os concretos convencionais, os CAAs mostram níveis muito mais elevados de retração térmica e autógena; esses CAAs de alta resistência são muito mais propensos a fissurarem em uma idade precoce do que os concretos com resistências normais. As investigações sobre as propriedades de autocicatrização de CAAs submetidos a carregamentos mecânico levam ao desenvolvimento de novos processos de hidratação das partículas de cimento não hidratados quando exposto à água (SAHMARAN, KESKIN, *et al.*, 2008).

Em investigações posteriores das capacidades de autocicatrização de compósitos cimentícios incorporando diferentes tipos de materiais cimentícios suplementares, um produto de autocicatrização mais evidente foi observado a partir de misturas que incorporaram a escória de alto-forno (SAHMARAN, YILDIRIM e ERDEM, 2013 e QIAN, *et al.*, 2009). Além disso, a área superficial elevada da escória de alto-forno fornece mais locais de nucleação, bem como os íons OH^- e álcalis para o fluido dos poros quando a escória de alto-forno é hidratada (LI, ZHAO, 2003). Os produtos de hidratação dos cimentos Portland compostos com escória de alto-forno são os mesmos que o dos cimentos Portland, exceto que são encontradas quantidades menores de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) quanto mais elevados forem os teores de escória nos cimentos. A menor quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o uma estrutura de poros mais refinada nos cimentos de escória de alto-forno poderia, por conseguinte, contribuir para a sua maior resistência química (DE BELIE *et al.*, 1996).

Embora, deva ser considerado o efeito positivo da hidratação continua das partículas da escória nos concretos autocicatrizantes com escórias de alto forno. A vulnerabilidade à carbonatação dos concretos com cimentos de escórias de alto forno pode ser atribuída a sua alta permeabilidade ao gás carbônico (CO_2) e ao baixo teor de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Entretanto, o baixo teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e uma estrutura de poros mais refinada do concreto com escória de alto forno pode contribuir para uma maior resistência química destes concretos (DE BELIE, VERSELDER, *et al.*, 1996, p. 1718).

No estudo de SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS (2012, p. 573) sobre o potencial do uso de aditivo expensor à base de sulfoaluminato de cálcio e aditivo catalisador cristalino para argamassas autocicatrizantes, fissuras com a abertura entre 0,25 mm a 0,4 mm podem ser completamente seladas. Em estudo subsequente, a dosagem de 10% de aditivo expensor com 1.5% de aditivo catalisador cristalino apresentou além da recuperação das propriedades de permeabilidade, também a melhor recuperação das propriedades mecânicas em compósitos

cimentícios com endurecimento por deformação (SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS, 2013, p. 223).

A formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) puro nas bordas fissura foi responsável pela impermeabilidade à água, no entanto, esta formação diminui a recuperação das propriedades mecânicas. Os resultados da análise química mostraram que os produtos de cicatrização nas partes internas das fissuras são compostos por uma mistura de CaCO_3 , C-S-H e etringita responsável pela recuperação das propriedades mecânicas. (SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS, 2013, p. 223).

A eficiência das fibras de aço, de polipropileno (PP), de nylon (PE) e de álcool de polivinila (PVA) foram comparadas por Homma *et al.* e Koda *et al.* (*apud* VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013, p. 2185). As fibras de PVA foram as que induziram a maior eficiência na capacidade de cicatrização, e pode ser atribuído ao fato das fibras de PVA poderem promover a deposição de produtos de cristalização, tais como grupos hidroxilas, ligadas a estrutura da fibra, atraindo íons de cálcio.

A condição de exposição à água (CE) desempenha um papel importante no processo de autocicatrização. Em geral na condição de exposição em ciclos alternados de úmido/seco (CE3) mostrou a recuperação mecânica ideal, enquanto que na condição de exposição somente ao ar (CE4) não foi observada quaisquer evidências de cicatrização. Na condição de exposição à água renovada regularmente (CE2) renderam uma recuperação mecânica ligeiramente superior na condição de exposição contínua à água (CE1). Em geral, a recuperação das propriedades mecânicas segue a ordem de $\text{CE4} < \text{CE1} < \text{CE2} < \text{CE3}$ (SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS, 2012, p. 223).

Entre as diferentes condições de exposição à água, a condição de exposição de ciclos alternados de úmido/seco (CE3) que mostrou a maior recuperação das propriedades mecânicas pode

promover a interação de água com o dióxido de carbono (CO_2) e com os materiais cimentícios não hidratado. Pode-se supor que, durante a fase de secagem, conforme o excesso da água vai evaporando, as concentrações de íons presente na água dentro das fissuras são aumentadas. Nessa situação, a quantidade de reagentes fica bastante concentrada para que reações adicionais ocorram, enquanto que a quantidade da água na solução se mantém suficiente. Este fenômeno reforçaria as reações químicas de precipitação e da hidratação contínua. Além disso, a penetração de CO_2 na fissura, durante o período de secagem, conduziria na formação de adicional de carbonatos que são úteis para o selamento das fissuras (SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS, 2012, p. 220).

Portanto, os seguintes mecanismos devem ser considerados para uma especificação robusta de um concreto de autocicatrizante autógeno: (a) Um mecanismo de hidratação contínua com o uso de cimento composto de grandes teores de escória de alto-forno, (b) um mecanismo de cura química com uma dosagem de catalisador cristalino para causar um efeito de recristalização de cimento nas fissuras do concreto, e (c) um mecanismo de restrição de fissura com a adição de fibras de vidro resistente à álcalis do tipo dúctil para reforçar a matriz de cimento (TAKAGI, LIMA e HELENE, 2012). Um padrão de fissuramento múltiplo com aberturas de fissuras relativamente pequenas (em comparação com o fissuramento de um concreto normal) geralmente resulta no aumento da resistência do material à penetração de líquidos e gases (MECHTCHERINE, LIEBOLDT, 2011). Os mecanismos autocicatrizantes possuem a vantagem de poderem ocorrer mais de uma vez, e pode ser facilmente especificado nos projetos para elementos estruturais de concreto que não são facilmente acessíveis para a sua manutenção e seu reparo, tais como estruturas subterrâneas, pontes e barragens. Embora os seus custos iniciais sejam maiores, os custos de manutenção podem ser reduzidos, e a vida útil de serviço dessas estruturas podem ser prolongadas, assim como o dano pode ser imediatamente reparado (VAN TITTELBOOM, DE BELIE, VAN LOO, JACOBS, 2011).

5.1 Conclusões

Este estudo investigou o comportamento autocicatrizante de concretos auto-adensáveis (CAA) incorporando materiais cimentícios suplementares, onde a autocicatrização mais evidente foi observada a partir de cimentos com escórias de alto-forno e um catalisador cristalino.

Após 28 dias, e condicionado a um pré-carregamento, os corpos de prova de CAAs fissurados foram induzidos a uma subsequente cicatrização por mais 28 dias e até 56 dias. A recuperação das propriedades mecânicas e de permeabilidade foram investigadas. As seguintes conclusões podem ser tiradas a partir dos resultados experimentais deste estudo:

- (1) A recuperação das propriedades mecânicas e estanqueidade indicam uma maior autocicatrização nas amostras com cimentos CP III, CP V e CP II respectivamente;
- (2) Embora tenha havido uma tendência para a autocicatrização mais lenta nas amostras com CP III e CP II em um estágio inicial comparado as amostras com CP V, o comportamento de um material hidráulico latente como a escória de alto-forno foi fundamental para a autocicatrização em longo prazo;
- (3) Ficou claro que o catalisador cristalino foi eficaz na melhoria das propriedades mecânicas e de permeabilidade dos CAAs fissurados pelo carregamento mecânico. No entanto, a adição do catalisador cristalino diminuiu ligeiramente a trabalhabilidade (espalhamento flow) das misturas de CAAs.

- (4) Sob as condições de pré-carregamento de 90% da carga de ruptura, conforme a proporção do teor de escória de alto-forno aumenta para 55%, houve um aumento significativo na recuperação das propriedades mecânicas e de redução de permeabilidade, devido à adição de catalisador cristalino. Portanto, os corpos de prova com escória de alto-forno adicionado com o catalisador cristalino apresentam menores diferenças nas reduções dos valores de resistência mecânica logo após o pré-carregamento e, portanto parecem serem menos afetados pelo carregamento mecânico;
- (5) O ensaio simplificado para o concreto autocicatrizante através do ensaio de penetração de água sob pressão, pode ser considerada uma metodologia mais simples para a comprovação da eficácia do uso do catalisador cristalino, desde que se utilize o esquema de ensaio 28 + 28, ou seja, carregamento hidrostático aos 28 dias com pressões de 0,1 MPa nos primeiros 2 dias, 0,3 MPa por mais 1 dia e 0,7 MPa por mais 7 dias. Após 28 dias de indução, executar novamente a sequência de carregamento hidrostático conforme a norma NBR 10.787:2011 com as pressões de 0,1 MPa nos primeiros 2 dias, 0,3 MPa por mais 1 dia e 0,7 MPa por mais 2 dias;
- (6) Nos ensaios de difusão de cloreto, a amostra dosada com cimento CP III foi a que apresentou menor valor final da carga com 1086 Coulombs. A amostra dosada com cimento CP V + catalisador cristalino apresentou maior a redução percentual com 52% no valor de carga em Coulombs em 28 dias de cicatrização;
- (7) Um aumento de temperatura foi notado no teste de difusão em íons cloreto quando realizado com uma tensão aplicada de 60 V, conforme exigido pela norma ASTM C1202/05. Esta tensão é suficientemente elevada, para que possa ser gerado calor devido ao efeito Joule. Este aumento

na temperatura pode ter afetado a mobilidade dos íons. Nos estudos de Medeiros *et al.* (2009, p. 130) mostraram que o efeito de Joule é muito menor, quando a tensão aplicada é de 30 V;

Para projetar sistematicamente uma tecnologia robusta de autocicatrização, a abordagem pela autocicatrização autógena que aprimora o mecanismo natural de colmatação do concreto, e utiliza em suas dosagens componentes de materiais genéricos, tais como escória de alto forno, catalisador cristalino e fibras sintéticas do tipo dúcteis são altamente recomendados. As condições de exposição na etapa da cura do concreto desempenham um papel importante no processo de autocicatrização, em geral, as condições de exposição em ciclos alternados de úmido/seco determinam uma recuperação mecânica ótima. Levar em consideração os fenômenos microbiológicos, físicos e químicos, serão importantes para o desenvolvimento de novas técnicas de autocicatrização que garantam a durabilidade em longo-prazo das estruturas de concreto.

5.2 Sugestões para continuação dos trabalhos

A capacidade de autocicatrização também depende do tipo da composição do cimento utilizado, da proporção das adições minerais e da condição de exposição à água. Algumas recomendações podem ser sugeridas para estudos de dosagem que especifiquem o uso de concretos autocicatrizantes autoadensáveis:

- (1) O tipo de cimento a ser utilizado deve ser preferencialmente o CP III 40 RS, ou o uso de adições minerais suplementares como as cinzas volantes, microssílicas e metacaolim podem ser utilizadas (SAHMARAN, YILDIRIM e ERDEM, 2013, p. 101);
- (2) Dosagem de aditivos minerais como o aditivo expansor à base de sulfoaluminato de cálcio à 10% s.p.c. e do aditivo catalisador cristalino dosado à 3% s.p.c. conforme os estudos de SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS (2013, p. 223);
- (3) Devido a excelente capacidade de dispersão das fibras de PVA, é possível sugerir o uso de quantidades maiores de fibras de PVA em até 2% em volume, em substituição as fibras de vidro, sem sacrificar o desempenho nas propriedades reológicas do concreto autoadensável no estado fresco (KONG, BIKE e LI, 2003, p. 335);
- (4) A condição de exposição na etapa de cura de concretos autocicatrizantes deve ser a mais próxima da condição de exposição em ciclos alternados de úmido/seco que consiste na submersão em água encanada por 12 horas e secagem ao ar por 12 horas por 28 dias, sendo que

a água deve ser reposta após cada ciclo conforme os estudos de SISOMPHON, COPUROGLU e KOENDERS (2012, p. 218);

- (5) Após a desmoldagem, o período em que as amostras devem ser submersas em água saturada com cal a 23 ± 2 °C devem aumentar de 28 dias (SAHMARAN, KESKIN, *et al.*, 2008, p. 873) para pelo menos 60 dias, antes de sofrerem o pré-carregamento. Uma idade maior visa assegurar um grau avançado tanto da hidratação do cimento Portland como das atividades das escórias de alto-forno conforme as recomendações de SAHMARAN, YILDIRIM e ERDEM (2013, p. 90);
- (6) Substituir o pré-carregamento por compressão axial de uma percentagem da carga de ruptura (SAHMARAN, KESKIN, *et al.*, 2008, p. 873), pela técnica de fissuração das amostras por compressão diametral através de uma deformação controlada, como mostrado na Figura 30.

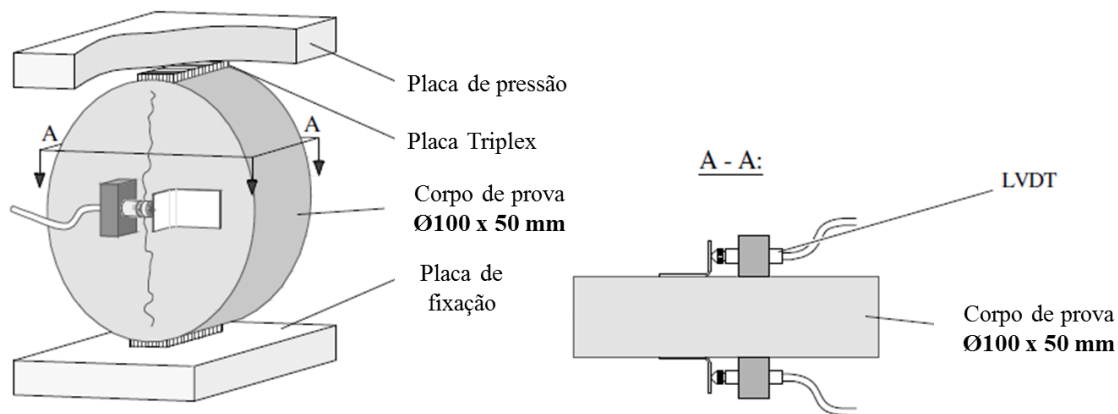


Figura 30 - Vista lateral e vista por cima da configuração da fissuração por compressão diametral (RILEM, 2013, p. 30)

Nos estudos de SAHMARAN, YILDIRIM e ERDEM (2013, p. 91) as amostras foram submetidas à deformações com valores de 1,00 mm, 1,25 mm e a deformação até a ruptura;

(7) Os parâmetros dos ensaios de um próximo estudo podem ser melhorados a partir do programa experimental desta dissertação conforme a Tabela 58.

Tabela 58 – Parâmetros de ensaios para continuação dos trabalhos.

Parâmetros	Programa experimental da dissertação	Sugestões para continuação dos trabalhos
Adição mineral	escórias de alto forno catalisador cristalino fibras de vidro	escórias de alto forno catalisador cristalino expansores de sulfoaluminato de cálcio fibras de PVA
Tipo de concreto	concreto autoadensável (CAA)	concreto autoadensável (CAA)
Cura	submersa em água saturada com cal a 23 ± 2 °C por 28 dias	submersa em água saturada com cal a 23 ± 2 °C por 60 dias
Pré-fissuramento	compressão axial com 0% e 90% da carga de ruptura	compressão diametral com níveis de deformação de 1,00 mm, 1,25 mm e ruptura
Período de cicatrização	submersa em água saturada com cal a 23 ± 2 °C por 28 e 56 dias	ciclos alternados 12 horas de úmido/seco com renovação da água a 23 °C saturada com cal a cada ciclo por 30 e 60 dias
Propriedades mecânicas	resistência à compressão axial velocidade de propagação de ultrassom	resistência à compressão axial resistência à tração na flexão (4 pontos)
Propriedades de permeabilidade	taxa de absorção por capilaridade (ASTM C1585 – 6 horas) difusão de íons cloretos (ASTM C1202:2005 – 60 V)	taxa de absorção por capilaridade (NBR 9779:2012 - 384 hora 60 dias) difusão de íons cloretos (ASTM C1202:2012 – 30 V)
No. corpos de prova por ensaio	3 CPs cilíndricos Ø100 x 200 mm 28, 28 + 28 (56) e 28 + 56 (84) dias de idade	4 CPs cilíndricos Ø100 x 50 mm 60, 60 + 30 e 60 + 60 dias de idade Microscopia eletrônica de varredura (com espectroscopia de energia dispersiva de raios-X)

6 REFERÊNCIAS

- ABDEL-JAWAD, Y.; DEHN, F. Self-healing of self-compacting concrete. In: **SCC 2005 Conference**. Orlando: [s.n.]. 2005. Proceedings... p. 1023–1029.
- AHN, T. H.; KISHI, T. The effect of geo-materials on the autogenous healing behavior of cracked concrete. In: **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**. 2009. Londres: Taylor & Francis Group. Proceedings... p. 235-240.
- AHN, T.-H.; KISHI, T. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various minerals admixtures. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 8, n. 2, p. 171-186, Jun. 2010.
- ALMEIDA, I. R. A onda de concreto que flutua no M.A.R. **Revista Concreto & Construções – IBRACON**, v. 72,, p. 100-110, Out-Dez. 2013.
- ALONSO, C. *et al.* Na₂PO₃F as inhibitor of corroding reinforcement in carbonated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, p. 405-415, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:1991**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991, 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735:1991**: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, ABNT, 1991, 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737:1992**: cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992, 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2003**: concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003, 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2007**: concreto - ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007, 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2007**: projetos de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2007, 221 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2009**: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009, 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802:1994**: concreto endurecido -determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 1994, 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:2009**: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009, 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779:2012**: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995, 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10787:2011**: concreto endurecido - determinação da penetração de água sob pressão. Rio de Janeiro, 2011, 6 p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:1997**: cimento Portland composto – especificação. Rio de Janeiro, 1997, 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30:2001**: agregado miúdo - determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001, 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:2006**: agregados - determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 2006, 38 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46:2001**: agregado - determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2001, 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47:2002**: concreto - determinação do teor de ar em concreto fresco - método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002, 23 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:2009**: agregado miúdo - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2009, 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:2009**: agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009, 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:1998**: concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998, 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 68:1998**: concreto - determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998, 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:2003**: agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003, 6 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1585:2004** standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. v. 04.02 - Concrete and Aggregates, Filadélfia, 2004. 6 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202:2005**: standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration., West Conshohocken, 2005. 8 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202:2012**: standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration., West Conshohocken, 2012. 8 p.
- BLAISZIK, B. J. *et al.* Self-healing polymers and composites. **Annual Review of Materials Research**, p. 179–211, 2010.
- BRITEZ, C. HELENE, P. BUENO, S. PACHECO, J. Estanqueidade de lajes de subpressão. Caso MIS-RJ. In: **55º Congresso Brasileiro do Concreto**. 2013. Gramado. Anais... p. 1–16.
- DE BELIE, N. VERSELDER, H. J. DE BLAERE, B. VAN NIEU-WENBURG, D. VERSCHOORE, R. Influence of the cement type on the resistance of concrete to feed acids. **Cemend and Concrete Research**, v. 26, n. 11, p. 1717-1725, 1996.

- DE BELIE, N. Microorganisms versus stony materials: a love–hate. **Materials and Structures** v. 43, p. 1191–1202, 2010.
- DE MUYNCK, W. *et al.* Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. **Cement and Concrete Research** v. 38, n. 7, p. 1005–1014, Jul. 2008.
- DE MUYNCK, W.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. **Ecological Engineering** v. 36, p. 118–136, 2010.
- DRY, C. M. Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. **Smart Materials and Structures**, v. 3, p. 118-123, 1994.
- DRY, C. M. Timed release of chemicals into cementitious material after the material has hardened to repair cracks, rebond fibers, and increase flexural toughening. **Fracture Mechanics**, Philadelphia, v. 25, 1994.
- DRY, C. M. Repair of highway bridges by internal time-release of repair chemicals. In: **Engineering Mechanics: A Force for the 21st Century**. 1998. La Jolla: [s.n.]. Proceedings... p. 17-20.
- DRY, C. M. Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1969-1977, Aug. 2000.
- DRY, C. M.; CORSAW, M. A comparison of bending strength between adhesive and steel reinforced concrete with steel only reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33 p. 1723–1727, Nov. 2003.
- DRY, C. M.; CORSAW, M.; BAYER, E. A comparison of internal self repair with resin injection in repair of concrete. **Journal of adhesion science and technology**, v. 17, p. 79-89, Apr. 2003.
- EDVARDESEN, C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, **ACI Materials Journal**, p. 448-455, Jul.-Aug, 1999.
- ELHAKAM, A. A.; MOHAMED, A. E.; AWAD, E. Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 421–427, 2012.
- GRANGER, S. *et al.* Mechanical characterization of the self-healing effect of cracks in Ultra High Performance Concrete (UHPC). In: **3rd International Conference of Construction Materials, Performance, Innovations and Structural Implications**. 2005. Vancouver. Proceedings... [s.n.].
- HAMMES, F.; VERSTRAETE, W. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, p. 3-7, 2002..
- HEARN, N. Self-healing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference? **Materials and Structures**, v. 31, p. 563-567, Oct. 1998.
- HOMMA, D.; MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. Self-healing Capability of fibre reinforced cementitious Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Tokyo, v. 7, n. 2, p. 217-228, Junho 2009.

- 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, Oct. 2013.
- IN, C.-W. et al. Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound. **NDT&E International**, v. 57, p. 36-44, 2013.
- JEFFERSON, A. *et al.* A new system for crack closure of cementitious materials using shrinkable polymers. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 795-801, 2010.
- JUN, P.; MECHTCHERINE, V. behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC) under monotonic and cyclic tensile loading: Part 1 – Experimental investigations. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 10, p. 801-809, Nov. 2010.
- KIM, J. S.; SCHLANGEN, E. Self-healing in ECC stimulated by SAP under flexural cyclic load. In: **3rd International Conference on Self Healing Materials**. Bath: [s.n.]. 2011. Proceedings... p. 27-29.
- KONG, H.-J.; BIKE, S. G.; LI, V. C. Constitutive rheological control to develop a self-consolidating engineered cementitious composite reinforced with hydrophilic poly(vinyl alcohol) fibers. **Cement & Concrete Composites**, v. 23, p. 333-341, 2003.
- KRAMER, S. L. B. *et al.* Autonomic restoration of electrical conductivity. **Advanced Materials** v. 24, n. 3, p. 398-401, Dec. 2011.
- KUANG, Y.; OU, J. Self-repairing performance of concrete beams strengthened using superelastic SMA wires in combination with adhesives released from hollow fibers. **Smart Materials and Structures**, v. 17, p. 1-7, 2008.
- KURAMOTO, Y.; NAKAMURA, Y.; SHIMAMURA, M. Control of AAR by catalysed alkali discharge. In: **9th Alkali-aggregate reaction in concrete**. 1992. London. Proceedings... p. 564-569.
- KURAMOTO, Y.; NAKAMURA, Y.; MATSUDA, Y. Effects of alkali substitution on suppression of AAR. In: **10th Alkali-aggregate reaction in concrete**. 1996. Melbourne. Proceedings... p. 876-883.
- KURAMOTO, Y.; MATSUDA, Y.; NAKAMURA, Y.; IRIE, M. Verification of suppression of AAR by a metal carrying complex compound. In: **11th Alkali-aggregate reaction in concrete**. 2000. Québec. Proceedings... p. 1-9.
- LANDIS, N.; NAGY, E. N.; KEANE, D. T. Microstructure and fracture in three dimensions. **Engineering Fracture Mechanics** v. 70, p. 911-925, 2003.
- LI, V.; HERBERT, E. N. Robust-self-healing-concrete-for-sustainable-infrastructure. **J. Advanced Concrete Technology**, v. 10, p. 207-218, 2012.
- LI, G. ZHAO, X. Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, p. 293-299, 2003.
- MAKI, Y.; OHNUMA, H. Application of concrete to the treatment and disposal of radioactive waste in Japan. **Nuclear Engineering and Design**, v. 138, n. 2, p. 179-188, Dec. 1992.

- MAKI, Y.; KURAMOTO, Y.; NAKAMURA, Y. Improvement of property of concrete with cement crystal breeding type concrete improving material. In: **46th Annual Meeting of Civil Engineering Society of Japan**. 1991. Tokyo. Proceedings... p. 300-301.
- MEDEIROS, M. H. F.; FILHO, J. H.; HELENE, P. Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions. **Marine Structures**, v. 22, p. 128-141, 2009.
- MECHTCHERINE, V.; LIEBOLDT, M. Permeation of water and gases through cracked textile reinforced concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 725-734, 2011.
- MORI, S. et al. Repair of road bridge RC floor slab with advanced cracks from the floor underside. In: **51st Annual Meeting of Civil Engineering Society of Japan**. Tokyo: [s.n.]. 1996. Proceedings... p. 344-345.
- OHAMA, Y.; DEMURA, K.; ENDO, T. Strength properties of epoxy-modified mortars without hardener. In: **9th International Congress on the Chemistry**. Nova Delhi: [s.n.]. 1992. Proceedings... p. 512-516.
- QIAN, S.; ZHOU, J.; DE ROOIJ, M.R.; SCHLANGEN, E.; YE, G.; VAN BREUGEL, K. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 613-621, 2009.
- RASHAD, A. M. A synopsis about the effect of nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, nano-Fe₃O₄ and nano-clay on some properties of cementitious materials – A short guide for Civil Engineer. **Materials and Design**, v. 52, p. 143-157, 2013.
- RILEM. Self-healing phenomena in cement-based materials., 2005. (**Technical Committee 221-SHC**) Disponível em: <http://www.rilem.net/gene/main.php?base=8750&gp_id=228>. Acesso em 25 Janeiro 2012.
- RILEM. Self-healing phenomena in cement-based materials. Heidelberg: Springer Netherlands, v. 11, 2013.
- ROCHA, A. P. Cobertura fluida. **téchne**, n. 193, p. 50-54, Abril 2013. ISSN 0104-1053.
- ŞAHMARAN, M. *et al.* Self-healing of mechanically-loaded self-consolidating concretes with high volumes of fly-ash. **Cement and Concrete Composites**, v.30, p. 872-879, Jul. 2008.
- ŞAHMARAN, M.; LI, V. C. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1033-1043, 2009.
- ŞAHMARAN, M.; YILDIRIM, G.; ERDEM, T. K. Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 35, p. 89-101, 2013.
- SANGADJI, S.; SCHLANGEN, E. Mimicking bone healing process to self repair concrete structure - novel approach using porous network concrete. **Procedia Engineering**, v. 54, p. 315 – 326, 2013.
- SANTOS, P. D. S. Ciência e tecnologia de argilas. 2a. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1992, v. 2. p. 409-854.
- SANTOS, P. D. S. Ciência e tecnologia de argilas. 2a. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1992, v. 3. P. 855-1089.

- SHIRAKAWA, M. A. *et al.* Effect of culture medium on biocalcification by *Pseudomonas Putida*, *Lysinibacillus Sphaericus* and *Bacillus Subtilis*. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 42, n. 2, Apr./Jun. 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, p. 13–32, 2011.
- SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement & Concrete Composites** v. 34, p. 566–574, 2012.
- SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 217–224, 2012.
- TAKAGI, E. M.; KURAMOTO, Y.; SHIMIZU, M. Leakage prevention methods of concrete underground or embeded structures. Cement crystalline reproduction materials. **Groundwater environments and foundation work**, Tóquio, v. 24, n. 2, p. 97-103, Feb. 1996.
- TAKAGI, E. M. ; LIMA, M. G. ; HELENE, P. R. L. Contribution to study of the self-healing effect activated by crystalline catalysts in concrete structures when subjected to continuous exposure to water. In: International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, 2012, Cape Town. Proceeding of 3rd International Conference of Concrete Repair, Rehabilitation and Retrifitting. Cape Town: CRC Press, 2012. v. III. p. 1415-1419.
- TAKEBE, S. *et al.* Studies on Diffusion of Cesium 137 in Cement Mortar. **Japan Atomic Energy Research Institute**. Tokai, (JAERI M89-211), 1989. 19 p.
- UKRAINZYK, N.; KOENDERS, E. A. B.; VAN BREUGEL, K. Morphological nature of diffusion in concrete paste. In: **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitng III**. London: 2012. Taylor & Francis Group, Proceedings... p. 321 - 327.
- VAN TITTELBOOM, K. *et al.* Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 497–505, 2011.
- VAN TITTELBOOM, K. *et al.* Acoustic emission analysis for the quantification of autonomous crack healing in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 333–341, 2012.
- 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, Dec. 2012.
- VAN TITTELBOOM, K. *et al.* Most recent advances in the field of self-healing cementitious materials. In: **4th International Conference on Self-Healing Materials**. Ghent, Belgium: Proceedings... p. 406-413, 2013.
- VAN TITTELBOOM, K. *et al.* Use of neutron radiography and tomography to visualize the autonomous crack healing efficiency in cementitious materials. **Materials and Structures**, v. 46, p. 105–121, 2013.
- VAN TITTELBOOM, K. *et al.* Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 497–505, 2011.

- VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. **Materials** v. 6, p. 2182-2217, Jun. 2013.
- 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, Jan. 2012.
- WERNECK, F. O Estado de São Paulo. Palecete e prédio modernista interligados por cobertura vão abrigar museu, 2010. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/cidades,palecete-e-predio-modernista-interligados-por-cobertura-vaio-abrigar-museu,559600,0.htm>>. Acesso em 31 maio 2010.
- WHITE, S. *et al.* Autonomic healing of polymer composites. **Nature**, v. 409, p. 794-797, Feb. 2001.
- WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. **Cement and Concrete Composites** v. 33, p. 763-770, Apr. 2011.
- YANG, Y.; YANG, E.-H.; LI, V. C. Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 176–183, 2011.
- YANG, Z. *et al.* Laboratory assessment of a self-healing cementitious composite. **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2142, p. 9–17, 2010.
- YODMATAI, D. *et al.* Water sorptivity, water permeability, autogenous shrinkage, and compressive strength of concrete with crystalline materials. In: **15th national convention on civil engineering**. 2010. Ubonrachatani: Proceedings... [s.n.].
- YUAN, X. L. *et al.* Effect of cement type and air-entraining agent on microbially induced carbonate precipitation in cement paste. **Advanced Materials Research**, v. 816, p. 758-761, 2013.

ANEXO

Pesquisadores no campo dos Concretos Autocicatrizantes.



Dr. Scott R. WHITE



Universidade de Illinois
(Urbana Champaign - EUA)

Presidente do 2º. ICSHM 2009 (Chicago – EUA)
Pesquisador do departamento de Engenharia Aeroespacial da Universidade de Illinois, a confiabilidade gerada por seu artigo, publicado na revista Nature em 2001, sobre circuitos impressos eletrônicos autocicatrizantes baseados em microcápsulas com metal líquido, provocou um maior interesse pelo tema dos materiais autocicatrizantes.



Dra. Carolyn M. DRY



Universidade de Illinois
(Urbana Champaign - EUA)

Pesquisadora do departamento de Arquitetura da Universidade de Illinois foi a primeira a propor a introdução intencional de propriedades autocicatrizantes no concreto com adição de fibras ocas preenchidas com polímeros adesivos em 1994.



Dr. Sybrand VAN DER ZWAAG



Universidade de Tecnologia Delft
(Delft – Holanda)

Presidente do 1º. ICSHM 2007 (Noordwijk – Holanda);
Presidente do 4º. ICSHM 2013 (Ghent – Bélgica);
Diretor científico da DCMat (Centro de Materiais da Delft);
Pesquisador do departamento de Engenharia Aeroespacial da Universidade de Delft editou o primeiro livro sobre materiais autocicatrizantes.



Dr. Ian BOND



Universidade de Bristol
(Bristol – Reino Unido)

Presidente do 2º. ICSHM 2009 (Chicago – EUA)
Presidente do 3º. ICSHM 2011 (Bath – Reino Unido)
Pesquisador sobre compósitos multifuncionais e chefe do departamento de Engenharia Aeroespacial do Centro de Inovação e Ciência de Compósitos Avançados da Universidade de Bristol.



Dr. Russell J. VARLEY



CSIRO – Ciência dos Materiais e Engenharia
(Clayton South – Austrália)

Presidente do 3º. ICSHM 2011 (Bath – Reino Unido);
Principal pesquisador da CSIRO sobre a engenharia de polímeros com ênfase na melhoria do desempenho, durabilidade e sustentabilidade de novas matrizes poliméricas, nanocompósitos e materiais autocicatrizantes.



Dra. Nele DE BELIE



Universidade de Ghent
(Ghent – Bélgica)

Presidente do 4º. ICSHM 2013 (Ghent – Bélgica);
Coautora do Relatório de Estado-de-Arte do SHC 221;
Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Chefe do Laboratório Magnel de Pesquisa de Concreto em pesquisas sobre durabilidade, autocicatrização, biodeposição e fotocatalise de materiais de construção.



Dr. Erik SCHLANGEN



Universidade de Tecnologia Delft
(Delft – Holanda)

Presidente do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Coautor do Relatório de Estado-de-Arte do SHC 221;
Pesquisador sobre a durabilidade em micromecânica e em materiais, como o desenvolvimento de concreto autocicatrizante baseado no uso de bactérias e o asfalto autocicatrizante com fibras de lã de aço, que pode ser reparado com aquecimento por indução de micro-ondas.



Dr. Mario DE ROOIJ
TNO innovation
for life
Organização para Pesquisa Científica
Aplicada (Holanda)

Secretário do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Coautor do Relatório de Estado-de-Arte do SHC 221;
Especialista em serviços de previsão de Análise de Ciclo Vida em infraestrutura, com quase 10 anos de pesquisa e experiência de consultoria na TNO. Seu envolvimento em projetos europeus incluem DuraCrete, DARTS, ChlorTest, e COMPASS.



Dra. Kim VAN TITTELBOOM



Universidade de Ghent
(Ghent – Bélgica)

Coautora do Relatório de Estado-de-Arte do SHC 221; Membro ativa do comitê técnico SHC 221 da RILEM; Avaliação da eficiência da autocicatrização com tomografia computadorizada e a análise de emissão acústica. Estudos sobre o uso de bactérias ureolíticas (*Bacillus sphaericus*), de escória de alto-forno e cinzas volantes e de cápsulas tubulares com poliuretano para reparar fissuras no concreto.



Dr. Willem DE MUYNCK



Universidade de Ghent
(Ghent – Bélgica)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM; Estudos sobre a influência da dosagem de ureia e cálcio sobre a efetividade da biodeposição de carbonatos induzidas por bactérias no concreto para aumentar a sua durabilidade. A biodeposição diminuiu a absorção da água em 65 a 90%, a taxa de carbonatação e a difusão de cloretos diminuíram por cerca de 25 a 30% e 10 a 40% respectivamente.



Dra. Jianyun WANG



Universidade de Ghent
(Ghent – Bélgica)

Membro ativa do comitê técnico SHC 221 da RILEM; Estudos sobre o uso de bactérias imobilizadas em gel de sílica ou poliuretano para concretos autocicatrizantes, e sobre a proteção contra corrosão de materiais cimentícios por deposição superficial de CaCO_3 pelo *Bacillus pasteurii*.



Dr. Oğuzhan ÇOPUROĞLU



Universidade de Tecnologia Delft
(Delft – Holanda)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM; Lidera investigações sobre o potencial de bactérias atuarem como um agente autocicatrizante no concreto, e estudos sobre a hidratação e a microestrutura do concreto de ultra-alto desempenho (CUAD).



Dr. Klaas VAN BREUGEL



Universidade de Tecnologia Delft
(Delft – Holanda)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM; Estudos sobre a hidratação e a microestrutura do concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) com cinzas de casca de arroz, e sobre modelagem computacional da permeabilidade, da difusão iônica, do efeito da temperatura de cura, e da condutividade elétrica de materiais cimentícios.



Dra. Nynke TER HEIDE



Universidade de Tecnologia Delft
(Delft – Holanda)

Pesquisadora de estudos experimentais da cicatrização de fissuras em baixas idades investigando sob quais condições as fissuras formadas no concreto em baixas idades podem ser cicatrizadas novamente quando existe uma maior hidratação do cimento.



Dr. Henk JONKERS



Universidade de Tecnologia Delft
(Delft – Holanda)

Desenvolvimento de concreto autocicatrizante baseado em um sistema bicomponente composto de lactato de cálcio e bactérias alcalifílicas formadoras de esporos encapsuladas em partículas porosas de argila expandida.



Dr. Eduardus A.B. KOENDERS



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Estudos sobre o potencial de autocicatrização de compósitos cimentícios de endurecimento por deformação (CCED) reforçada com fibras de PVA incorporando aditivo expansivo à base de cálcio sulfoaluminato e aditivo catalisadores cristalina, onde a análise química mostra produtos da cicatrização compostos por CaCO_3 , C-S-H e etringita.



M Sc. Haoliang HUANG



Universidade de Tecnologia Delft
(Delft – Holanda)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM; Estudos sobre simulação, caracterização e quantificação dos comportamentos de autocicatrização de microfissuras devido a uma maior hidratação em pasta de cimento.



Dr. Ahmed LOUKILI



Escola Central de Nantes
(Nantes – França)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Pesquisador sobre estudos de dosagem e comportamentos mecânicos do concreto, durabilidade de materiais cimentícios, concretos ecológicos e efeitos colaterais no concreto.



Dr. Sébastien GRANGER



Escola Central de Nantes
(Nantes – França)

Pesquisador sobre a caracterização mecânica do efeito de autocicatrização de fissuras em concretos de ultra-alto desempenho (CUAD)



Dr. Victor C. LI



Universidade de Michigan
(Ann Arbor – EUA)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Pesquisador com patente do concreto autocicatrizante reforçado com pozolanas e grande quantidade de fibras de PVA. Execução de pavimento de ponte com compósitos cimentícios com endurecimento por deformação (CCED) com um custo inicial cerca de três vezes maior do que um concreto padrão, mas com um custo 50% menor de manutenção.



Dr. Shunzhi QIAN



Universidade Tecnológica de Nanyang
(Nanyang – Singapura)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Estudos sobre a otimização da distribuição de fibra de PVA ajustando a sequência de mistura e as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios engenheirados (CCE).



Dr. Mustafa ŞAHMARAN



Universidade de Gaziantep
(Gaziantep – Turquia)

Estudos de propriedades de autocicatrização e durabilidade dos concretos autoadensáveis (CAA) e compósitos cimentícios engenheirados (CCE) contendo grandes volumes de cinzas volantes, escória de alto-forno e partículas porosas de argila expandida saturados com água.



Dra. Carola K. EDVARDSSEN



COWI - Engenharia Consultiva e Planejamento
(Lyngby – Dinamarca)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Consultora sobre tecnologia de concreto e dimensionamento por vida útil de estruturas de concreto em ambientes agressivos em diversos projetos de infraestruturas em todo o mundo. Estudos sobre a permeabilidade e cicatrização autógena de fissuras em concreto.



Dr. Hans-Wolf REINHARDT



Universität Stuttgart

Universidade de Stuttgart
(Stuttgart – Alemanha)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Pesquisador sobre a permeabilidade e autocicatrização de concretos fissurados em função da temperatura (20 a 80 °C) e da abertura da fissura (0,05 a 0,20 mm) e sobre a relação entre os teores de álcalis e Ca(OH)_2 com os cimentos Portland pozolânicos para a prevenção permanente da reação álcali agregado (RAA).



Dr. R. Douglas HOOTON



Universidade de Toronto
(Toronto – Canadá)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM
Pesquisador na Ciência dos Materiais dos aglomerantes para o concreto, com ênfase na durabilidade e vida útil do concreto, quando expostos a ambientes agressivos, incluindo os sulfato do solos, congelamento, e sais de cloretos para o degelo ao longo dos últimos 35 anos.



Dr. Konstantin KOVLER



Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental
(Haifa – Israel)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Membro ativo do comitê técnico SAP da RILEM “Aplicação de polímeros superabsorventes em construção de concreto”;
“Membro ativo do comitê técnico ACI 236 Ciência dos materiais de concreto”
Pesquisador na área de materiais e tecnologias de construções sustentáveis.



Dr. Viktor MECHTCHERINE



Universidade de Tecnologia de Dresden
(Dresden – Alemanha)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Pesquisador sobre o comportamento dos compósitos cimentícios com endurecimento por deformação (CCED) sob tensão de tração uniaxial cíclica,



Dra. Mette R. GEIKER



Universidade Técnica da Dinamarca
(Lyngby – Dinamarca)

Membra ativa do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Pesquisadora sobre o concreto simples e armado, focando em estudos sobre propriedades de materiais relevantes para a sua fabricação e uso em estruturas de engenharia civil;
Estudos sobre materiais cimentícios e compósitos cimentícios engeheirados com um material autocicatrizante.



Dr. Robert LARK



Escola de Engenharia Cardiff
(Cardiff - Reino Unido)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Pesquisador sobre as técnicas de gerenciamento de ativos e o comportamento e dimensionamento de estruturas de aço e concreto, incluindo o desenvolvimento de novos materiais cimentícios;



Prof. Lars-Olof NILSSON



Universidade Lunds
(Lund – Suécia)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Pesquisador na área de fenômenos de transporte em materiais porosos de construção relacionadas às mudanças de umidade, a carbonatação, a absorção de dióxido de carbono, o ingresso de cloreto, as emissões de materiais e da penetração do gás.



Dr. Pavel TRTIK



Ciência dos Materiais e Tecnologia
(Dübendorf – Suíça)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Investigações sobre a relação do nano-micro-macro em materiais cimentícios. Os dados 3D de micro e nanoestruturas são processados por análise computacional, a fim de relacioná-los com as propriedades de resistência, durabilidade, viscosidade e processos relacionados aos mecanismos de fratura, a degradação química, hidratação e comportamento reológico.



Dr. W. Jason WEISS



Universidade Purdue
(West Lafayette – EUA)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Pesquisador sobre o comportamento de materiais à base de cimento Portland e da relação entre a estrutura do material, propriedades e desempenho de ciclo de vida com foco em fissuras de retração, simulação de desempenho do ciclo de vida e testes não-destrutivos.



Dr Ningxu HAN



Universidade de Shenzhen
(Shenzhen – China)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Estudos sobre sintetização de fibras com polímeros por processo químico in situ em materiais cimentícios



Dr. Jianzhong LAI



Universidade de Ciência e Tecnologia de
Nanjing (Nanjing – China)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Estudos sobre os danos dinâmicos e as relações tensão-deformação de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho submetido a impacto repetitivos.



Yeqing SHEN



Universidade de Tecnologia de Nanjing
(Nanjing – China)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Estudos sobre a evolução da estrutura e morfologia de compactos cimentícios hidratados.



Luguang SONG



Universidade Southeast
(Nanjing – China)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Estudos sobre a durabilidade do concreto exposto ao ataque de sulfato sob carregamento de flexão e ciclos de secagem-molhagem, e sobre a dependência do coeficiente de difusão de cloreto no concreto em função do tempo para assegurar a precisão do modelo de previsão da vida útil.



Xiongzhou YUAN



Universidade Southeast
(Nanjing – China)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Estudos sobre as propriedades de autocicatrizantes de fissuras de material cimentícios com adesivo termoplástico de EVA.



Dr. Hirozo MIHASHI



Universidade de Tohoku
(Sendai – Japão)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Membro ativo do comitê técnico 240-FDS da RILEM sobre a durabilidade de compósitos cimentícios com endurecimento por deformação (CCED) reforçados com fibras.



Dr. Tomoya NISHIWAKI



Universidade de Tohoku
(Sendai – Japão)

Membro ativo do comitê técnico SHC 221 da RILEM;
Pesquisador sobre o desenvolvimento de compósitos cimentícios engenheirados autocicatrizantes e concretos autocicatrizantes.



Dr. Toshiharu KISHI



Universidade de Tóquio
(Tóquio – Japão)

Pesquisador do comportamento autocicatrizante de fissuras em de compósitos cimentícios incorporando várias adições minerais em argamassas e concretos. Estudos sobre o efeito dos aditivos expansores, geomateriais e catalisador cristalino;
Patente sobre adições cimentícias baseados em alumina-silicatos expansivos que promove capacidades autocicatrizantes e propriedades intumescentes.



Dr. Tae-ho AHN



Universidade de Tóquio
(Tóquio – Japão)

Pesquisador do comportamento autocicatrizante de fissuras em de compósitos cimentícios incorporando várias adições minerais em argamassas e concretos. Estudos sobre o efeito dos aditivos expansores, geomateriais e catalisador cristalino;
Patente sobre adições cimentícias baseados em alumina-silicatos expansivos que promove capacidades autocicatrizantes e propriedades intumescentes.



Dr. Yasurô MAKI



Universidade Hôsei
(Koganei – Japão)

Pesquisador sobre a aplicação dos catalisador cristalino em estruturas de armazenamento de resíduos de baixo nível de radiação em instalações nucleares no Japão.



Dr. Yuzuru KURAMOTO



Japan Xypex Co.
(Tóquio-Japão)

Pesquisador com as patentes sobre aditivos catalisador cristalino microencapsulados a base de complexos inorgânicos de sais de fosfato e agente de cura com ácidos carboxílicos e silicatos para a cristalização do concreto; e sobre a supressão da reação álcali-agregado com o uso dos catalisador cristalino como transportadores para a descarga de álcalis do concreto deteriorado.



Dr. Patrick F. McGRATH



Xypex Chemical Co.
(Vancouver – Canadá)

Pesquisador com mais de 25 anos de experiência profissional e acadêmica na indústria da construção concentrando-se principalmente na avaliação e restauro de estruturas existentes e concepção, formulação e especificação de materiais para atender às necessidades específicas.

Pesquisadores no campo dos Concretos Autocicatrizantes no Brasil.



Dr. Paulo R. L. HELENE



Escola Politécnica da USP
(São Paulo – Brasil)

Pesquisador sobre a corrosão de armaduras no concreto armado, e sobre dosagem e controle de concretos de alto desempenho (CAD); Possui o recorde em altura de concreto bombeado no país, e o recorde mundial de concreto colorido de alta resistência com 125MPa na obra do e- Tower.



Dra. Maryangela G. LIMA



Instituto Tecnológico de Aeronáutica
(São José dos Campos – Brasil)

Pesquisadora sobre a durabilidade, degradação e desempenho dos materiais e componentes de construção com ênfase na ação de fatores ambientais, como a umidade e a temperatura, na degradação das construções e estruturas.



Emilio Minoru TAKAGI



Instituto Tecnológico de Aeronáutica
(São José dos Campos – Brasil)

Pesquisador sobre concretos autocicatrizantes com cimentos de escória de alto-forno ativados por catalisadores cristalinos. Publicou artigo sobre o uso de catalisadores cristalinos em obras metroviárias do Japão e tecnologia de injeção de resinas em fissuras no concreto.



Dra. Márcia A. SHIRAKAWA



Escola Politécnica da USP
(São Paulo – Brasil)

Pesquisadora multidisciplinar envolvendo microbiologia aplicada ao ambiente construído, incluindo avaliação da influência de biofilmes (fungos e fototróficos) na eficiência energética de módulos fotovoltaicos. Estudos sobre biocalcificação de materiais cimentícios com o uso de bactérias ureolíticas e cianobactérias.



Dr. Eduardus A.B. KOENDERS



Universidade de Tecnologia Delft (Holanda)
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Estudos sobre o potencial de autocicatrização de compósitos cimentícios de endurecimento pós-deformação (CCED) reforçada com fibras de PVA incorporando aditivo expansivo à base de cálcio sulfoaluminato e aditivo catalisadores cristalina, onde a análise química mostra produtos da cicatrização compostos por CaCO_3 , C–S–H e etringita.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">DM</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">27 de janeiro de 2014</p>	3. REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/DM-090/2013</p>	4. N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">130</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino			
6. AUTOR(ES): Emilio Minoru Takagi			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Concreto autocicatrizante; Concreto autoadensável; Catalisador cristalino; Escória de alto-forno.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Concretos; Altos fornos; Fornos; Catalisadores; Cimento Portland; Engenharia estrutural; Engenharia civil.			
10. APRESENTAÇÃO: <p style="text-align: right;"><input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional</p> ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. Área de Infraestrutura Aeroportuária. Orientadora: Profa. Dra. Maryangela Geimba de Lima. Defesa em 13/12/2013. Publicada em 2013			
11. RESUMO: Em 1994, C. Dry foi a primeira pesquisadora a propor a introdução intencional de propriedades autocicatrizantes no concreto. A partir da criação do comitê técnico SHC 221 da RILEM em 2005, diferentes abordagens vêm sendo desenvolvidas para o estudo de um novo tipo de concreto que possua a capacidade de reparar suas próprias fissuras. Dentre estas abordagens, a cicatrização autógena se baseia em melhorar o mecanismo de colmatação natural do concreto. Neste estudo, a própria ocorrência da fissura é um dos mecanismos de gatilho, pois permite a penetração da água que ativa o catalisador cristalino, e expõe nas faces internas destas fissuras uma nova superfície formada por cimentos sub-hidratados e por escórias não ativadas. Este catalisador cristalino eleva a alcalinidade da água, dentro das fissuras, que favorecem a formação de produtos hidratados estáveis nas faces internas de fissuras estáticas com abertura de até 0,4 mm. Para a investigação deste mecanismo de gatilho, amostras de concreto foram moldadas utilizando a adição de catalisador cristalino, fibras de vidro e também três tipos de cimentos comerciais CP III RS, CP II-E e CP V ARI com percentuais distintos de escória de alto forno nas faixas de 55%, 34% e 0% respectivamente. Posteriormente, estes corpos de prova foram colocados na prensa e carregados com 90% da carga de ruptura, o que gerou fissuras no interior destes corpos de prova. Em seguida, foram mergulhados em água para disparar o mecanismo de autocicatrização, para então serem submetidos à ensaios de laboratório após 28 dias, 56 dias e 84 dias. Os resultados dos ensaios, tais como, de recuperação das propriedades mecânicas e da estanqueidade mostram uma maior autocicatrização nas amostras com cimento CP III, CP V e CP II respectivamente. Portanto, se existe a tendência para uma autocicatrização mais lenta nas amostras com escória de alto forno (cimento CPIII e CP II) nas idades mais jovens comparados com as amostras com 100% de cimento Portland (cimento CP V), o comportamento hidráulico latente da escória de alto forno nas amostras é essencial para a sua autocicatrização em longo prazo.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> CONFIDENCIAL <input type="checkbox"/> SECRETO			