

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

THIAGO FERREIRA DUTRA

**INFLUÊNCIA DO ADITIVO CRISTALIZANTE NA AUTOCICATRIZAÇÃO DE BARRAS
DE ARGAMASSA AFETADAS PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.**

**Alegrete
2023**

THIAGO FERREIRA DUTRA

**INFLUÊNCIA DO ADITIVO CRISTALIZANTE NA AUTOCICATRIZAÇÃO DE BARRAS
DE ARGAMASSA AFETADAS PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Simone Dornelles Venquiaruto

**Alegrete
2023**

THIAGO FERREIRA DUTRA

INFLUÊNCIA DO ADITIVO CRISTALIZANTE NA AUTOCICATRIZAÇÃO DE BARRAS DE ARGAMASSA AFETADAS PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 11 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA - Orientador

Profa. Dra. FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA - UNIPAMPA

Eng. Me. MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 19:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA, ENGENHEIRO-AREA**, em 05/02/2023, às 14:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/02/2023, às 09:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 1047535 e o código CRC 15202606.

”Não é a força do corpo que conta mas a
força do espírito.”

(J.R.R. Tolkien)

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade e pelo sucesso nessa etapa.

Agradeço aos meus pais Anderson e Adriana pelo amor, apoio e motivação durante os cinco anos de curso, pelo exemplo e pelos ensinamentos para a vida, contribuindo para formar a pessoa que sou hoje e ao meu irmão Alexander Ian, pelo aprendizado dentro e fora da universidade, colaborando para meu crescimento pessoal e servindo como um exemplo profissional.

A minha namorada Maria, pelo amor, companheirismo, pela companhia e consideração, apoiando e auxiliando durante o percurso acadêmico e se fazendo sempre presente nos momentos mais importantes.

A minha Orientadora Simone por ter aceitado me orientar, pela disponibilidade, pelo auxílio na realização desse trabalho tornando-o possível.

Aos meus amigos, que fizeram parte da minha formação durante os cinco anos de graduação contribuindo com trocas de conhecimento essenciais para a formação profissional, em especial Felipe, Gabriel, Jacson, Juliano e Rafael que estiveram presentes durante todo o período de universidade.

Aos técnicos do LEMAC, Marcelo e Raquel, pelo auxílio na realização dos ensaios dessa pesquisa e a todos os demais professores que contribuíram com conhecimento e ensinamentos durante o curso.

RESUMO

A Reação Álcali-Agregado (RAA) é uma reação que ocorre envolvendo agregados reativos, álcalis presentes no cimento e água, essa reação forma um gel alcalino com características expansivas ao absorver água, gerando tensões internas e causando a abertura de microfissuras em matrizes cimentícias. Atualmente estudos vêm sendo executados na busca de maneiras para o fechamento de microfissuras no concreto, sendo uma delas o *Self-healing* em que o concreto realiza a selagem de suas próprias fissuras por meio de causas físicas, químicas ou mecânicas. Pesquisas recentes utilizam o aditivo cristalizante como meio de fechamento de fissuras através da percolação de cristais que são formados na presença de água. Este estudo tem por objetivo verificar a influência de um aditivo cristalizante em traços de argamassa produzidos com agregados caracterizados previamente como potencialmente reativos para o cimento Portland CPV-ARI frente a reação álcali-agregado(RAA), analisando a efetividade desse aditivo na autocicatrização de microfissuras ocasionadas pela RAA, com o passar do tempo, por meio de ensaios de absorção de água por capilaridade, tração na flexão e compressão axial. As argamassas foram produzidas utilizando cimento Portland CPV-ARI com adição de 2% de aditivo cristalizante, dois agregados reativos da região de Alegrete-RS e Quaraí-RS e um agregado não reativo (areia do IPT), para servir como referência. Foram produzidas três misturas com traço padrão definido pela norma NBR 15577-4 e moldadas barras de argamassa em 2 modelos distintos de fôrmas. O modelo-I foi utilizado para os ensaios de RAA e o modelo - II para os ensaios mecânicos e de durabilidade. Após a produção das misturas, todas as argamassas passaram pelo processo de imersão em solução básica de NaOH a 80 °C, por 30 dias (amostras do modelo I) e por 28 dias (amostras do modelo II). Durante o período de imersão, as barras de argamassa do modelo I foram monitoradas quanto ao seu comprimento para a determinação das expansões por RAA. As barras de argamassa do modelo II permaneceram imersas em solução por 28 dias para a indução da microfissuração nos corpos de prova. Após este processo, foram retiradas da solução, resfriadas a temperatura ambiente e divididas em dois lotes. O primeiro lote foi ensaiado a partir da idade de 28 dias (absorção de água por capilaridade, tração na flexão e compressão axial). O segundo lote foi acondicionado em cura submersa por 32 dias, até atingir a idade de 60 dias (para otimizar a ação do aditivo cristalizante) e posteriormente passou pelos mesmos ensaios de controle do primeiro lote. Os resultados do ensaio acelerado de RAA mostraram pouca diferença em relação aos resultados de Dutra (2018), indicando pouca influência do aditivo cristalizante na expansão dos corpos de prova por RAA. Com relação as propriedades mecânicas e de durabilidade foi observado melhoria de algumas propriedades e a manutenção de outras com o emprego do aditivo cristalizante. Os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, mostraram que todas as misturas apresentaram melhorias nessa propriedade em maiores idades. Com relação aos ensaios de tração na flexão observou-se uma tendência de constância das resistências com o passar do tempo, demonstrando uma baixa efetividade do aditivo cristalizante para melhoria desta propriedade. Para os ensaios de compressão axial houve aumento nas resistências dos corpos de prova produzidos com os agregados reativos. Para as argamassas que foram moldadas com o agregado de referência ocorreu a manutenção da resistência. Em geral, conclui-se que para os materiais e técnicas aplicadas neste estudo, o aditivo

cristalizante se mostrou promissor na autocicatrização em argamassas avariadas pela Reação Álcali-Agregado.

Palavras-chave: Aditivo cristalizante. Autocicatrização. Selagem de fissuras.

ABSTRACT

This study aims to verify the influence of a crystallizing additive on mortar mixes produced with aggregates previously characterized as potentially reactive for CPV-ARI Portland cement against alkali-aggregate reaction (AAR), analyzing the effectiveness of this additive in the self-healing of microcracks caused by AAR through tests of water absorption by capillarity, bending tensile and axial compression. The mortars were produced using Portland cement CPV-ARI with the addition of 2% of crystallizing additive, two reactive aggregates from the region of Alegrete-RS and Quaraí-RS and a non-reactive aggregate (sand from IPT), to serve as a reference. Three mixtures were produced with a standard mix defined by the NBR 15577-4 standard and mortar bars were molded in 2 different models of molds. Model-I was used for the RAA tests and model-II for mechanical and durability tests. After producing the mixtures, all mortars were immersed in a basic NaOH solution at 80 °C for 30 days (model I samples) and 28 days (model II samples). During the immersion period, the model I mortar bars were monitored for their length to determine the expansions by RAA. Model II mortar bars remained immersed in solution for 28 days to induce microcracking in the specimens. After this process, they were removed from the solution, cooled to room temperature and divided into two batches. The first batch was tested from the age of 28 days (water absorption by capillarity, bending tensile and axial compression). The second batch was conditioned in submerged curing for 32 days, until it reached the age of 60 days, to optimize the action of the crystallizing additive, and subsequently underwent the same control tests as the first batch. The results of the accelerated AAR test showed little difference in relation to the results of Dutra (2018), indicating little influence of the crystallizing additive on the expansion of the specimens by AAR. Regarding the mechanical and durability properties, an improvement of some properties was observed and the maintenance of others with the use of the crystallizing additive. The results of the capillary water absorption tests showed that all mixtures showed improvements in this property at greater ages. With regard to the bending tensile tests, a trend of resistance constancy over time was observed, demonstrating a low effectiveness of the crystallizing additive to improve this property. For the axial compression tests, there was an increase in the resistance of the specimens produced with reactivities aggregates. For the mortars of reference aggregate, resistance was maintained. In general, it is concluded that for the materials and techniques applied in this study, the crystallizing additive showed promise in self-healing in mortars damaged by the Alkali-Aggregate Reaction.

Keywords: Crystallizing admixture. Self-healing. Crack sealing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Presença de fissuração causada por RAA nos estudos de Stanton.	16
Figura 2 – Esquema ilustrativo da formação da RAA.	17
Figura 3 – Fluxograma das etapas da reação álcali-agregado	18
Figura 4 – Estrutura do dióxido de silício presente nos agregados	19
Figura 5 – Processo de formação do gel da RAS	20
Figura 6 – Modelos de Autocicatrização do concreto.	26
Figura 7 – Tipos de Autocicatrização Autógena.	27
Figura 8 – Fechamento de fissura por carbonato de cálcio precipitado.	29
Figura 9 – Expansão das barras de argamassa em função do tempo para os Agregados com o cimento Portland CPV-ARI.	34
Figura 10 – Agregados a serem utilizados no trabalho.	34
Figura 11 – Aditivo cristalizante utilizado no presente estudo.	35
Figura 12 – Organograma ilustrativo das Etapas 2 e 3 realizadas por traço de argamassa.	36
Figura 13 – Materiais utilizados para a moldagem dos corpos de prova.	38
Figura 14 – Produção de argamassa segundo a norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018).	38
Figura 15 – Produção de argamassa modelo I segundo a norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018).	39
Figura 16 – Produção de argamassa modelo II segundo a norma NBR 13279 (ABNT, 2005)	40
Figura 17 – Barras de argamassa passando por processo de cura em câmara úmida.	41
Figura 18 – Imersão das barras de argamassa em Solução básica de NaOH	42
Figura 19 – Realização de leituras do ensaio de expansão em barras de argamassa.	42
Figura 20 – Realização do ensaio absorção de água por capilaridade.	43
Figura 21 – Realização do ensaio de ruptura por tração na flexão.	44
Figura 22 – Realização do ensaio de ruptura por tração na flexão.	45
Figura 23 – Resultados médios do ensaio de expansão em barras de argamassa Modelo I.	47
Figura 24 – Deformação em barra de argamassa Modelo I confeccionada com a Mistura B-2 após o ensaio acelerado de RAA.	48
Figura 25 – Microfissuras aparentes em barras de argamassa Modelo I - Mistura A-1.	48
Figura 26 – Microfissuras aparentes em barras de argamassa Modelo I - Mistura B-2.	49
Figura 27 – Barra de argamassa Modelo I - Mistura C-3 sem a presença de microfissuras.	49
Figura 28 – Comparação de resultados de expansão em barras de argamassa.	50
Figura 29 – Barra de argamassa modelo II pós ensaio acelerado de RAA - Mistura A-1.	52
Figura 30 – Barra de argamassa modelo II pós ensaio acelerado de RAA - Mistura B-2.	52
Figura 31 – Barra de argamassa modelo II pós ensaio acelerado de RAA - Mistura C-3.	52
Figura 32 – Resultado médio do ensaio de absorção de água por capilaridade (1/2).	53

Figura 33 – Formação de cristais de hidróxido de sódio na superfície dos corpos de prova em ensaio de absorção de água por capilaridade.	54
Figura 34 – Resultado médio do ensaio de absorção de água por capilaridade (2/2).	54
Figura 35 – Resultado médio do ensaio de tração na flexão.	57
Figura 36 – Resultado médio do ensaio de Compressão axial.	58
Figura 37 – Lupa utilizada para a retirada das imagens.	62
Figura 38 – Pontos brancos identificados em corpos de prova moldados com a Mistura A-1.	62
Figura 39 – Pontos brancos identificados em corpos de prova moldados com a Mistura B-2.	63
Figura 40 – Pontos brancos identificados em corpos de prova moldados com a Mistura C-3.	63
Figura 41 – Microfissuras identificadas em corpos de prova moldados com a Mistura A-1 aos 28 dias.	64
Figura 42 – Microfissuras identificadas em corpos de prova moldados com a Mistura A-1 aos 60 dias.	64
Figura 43 – Microfissuras identificadas em corpos de prova moldados com a Mistura B-2 aos 28 dias.	65
Figura 44 – Microfissuras identificadas em corpos de prova moldados com a Mistura B-2 aos 60 dias.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Minerais e rochas suscetíveis à Reação Álcali-Agregado (Parte 1). . .	24
Tabela 2 – Minerais e rochas suscetíveis à Reação Álcali-Agregado (Parte 2). . .	24
Tabela 3 – Propriedades físicas do cimento CPV-ARI	32
Tabela 4 – Propriedades químicas do cimento CPV-ARI	33
Tabela 5 – Caracterização química do aditivo cristalizante.	35
Tabela 6 – Composição granulométrica dos agregados para barras de argamassa segundo NBR 15577-4.	37
Tabela 7 – Misturas produzidas para os ensaios do programa experimental. . .	39
Tabela 8 – Resultados médios de expansão em barras de argamassa nas idades de 16 e 30 dias.	51
Tabela 9 – ANOVA-Fator único - Mistura A-1	55
Tabela 10 – ANOVA-Fator único - Mistura B-2	55
Tabela 11 – ANOVA-Fator único - Mistura C-3	55
Tabela 12 – Teste de Duncan	56
Tabela 13 – Resultados médios do ensaio de tração na flexão aos 28 e 60 dias.	57
Tabela 14 – Resultados do ensaio de compressão axial aos 28 e 60 dias.	59
Tabela 15 – ANOVA-Fator único - Mistura B-2 (Compressão)	59
Tabela 16 – ANOVA-Teste de Duncan (Compressão).	60
Tabela 17 – Análise geral dos ensaios de controle.	60
Tabela 18 – ANOVA-Fator único - Mistura A-1 (Tração)	73
Tabela 19 – ANOVA-Fator único - Mistura B-26 (Tração)	73
Tabela 20 – ANOVA-Fator único - Mistura C-3 (Tração)	73
Tabela 21 – Teste de Duncan (Tração)	73
Tabela 22 – ANOVA-Fator único - Mistura A-1 (Compressão)	73
Tabela 23 – ANOVA-Fator único - Mistura C-3 (Compressão)	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADC - Aditivo Cristalizante

CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens

CP - Corpo de Prova

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR - Norma Brasileira

RAA - Reação Álcali-Agregado

RAC - Reação Álcali-Carbonato

RAS - Reação Álcali-Sílica

RASS - Reação Álcali-Silicato

UHE - Usina Hidroelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.1.3	Justificativa	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	O concreto e suas manifestações patológicas	15
2.2	Reação Álcali-Agregado e os mecanismos de expansão	16
2.3	Tipos de reação álcali-agregado	19
2.3.1	Reação álcali-sílica (RAS)	19
2.3.2	Reação álcali-silicato (RASS)	21
2.3.3	Reação álcali-carbonato (RAC)	21
2.4	Fatores de influência da reação álcali agregado	22
2.4.1	Álcalis do cimento	22
2.4.2	Agregados reativos	23
2.4.3	Umidade e Temperatura	23
2.4.4	Aditivos químicos e Adições minerais	25
2.5	<i>Self-healing</i> no concreto	26
2.5.1	Autocicatrização autógena	26
2.5.2	Autocicatrização Autônoma	28
2.5.3	Reparo Ativado	28
2.6	Tecnologia <i>self-healing</i> por meio de aditivos cristalizantes	29
2.6.1	Aditivos cristalizantes como mitigadores de fissuras em concreto	30
2.6.2	Aditivos cristalizantes na Reação Álcali-Agregado	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais	32
3.1.1	Cimento Portland	32
3.1.2	Agregados	33
3.1.3	Aditivo Cristalizante	34
3.2	Programa Experimental	35
3.2.1	Produção das Argamassas	37
3.2.2	Moldagem dos corpos de prova	39
3.2.3	Ensaio de controle	41
3.2.3.1	Ensaio acelerado de RAA e indução de microfissuras por RAA	41
3.2.3.2	Ensaio de Absorção de água por capilaridade	43
3.2.3.3	Ensaio de tração na flexão	43
3.2.3.4	Ensaio de compressão axial	44
3.2.4	Obtenção/compilação de resultados e imagens	45
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
4.1	Ensaio acelerado de RAA	47
4.2	Microfissuras induzidas por ação química - RAA	51
4.3	Ensaio de Absorção de água por capilaridade	53
4.4	Ensaio de Tração na flexão	56

4.5	Ensaio de Compressão axial	58
4.6	Compilação dos resultados	60
4.7	Imagens	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
5.1	Sugestão de trabalhos futuros	67
	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO A – ANÁLISE DE VARIÂNCIA	73

1 INTRODUÇÃO

O concreto pode ser considerado um “material universal” devido a algumas características como a facilidade do manuseio, a possibilidade variável de moldagem e o baixo custo comparado com outros materiais, porém devido ao seu uso intenso na construção civil são encontradas situações onde as interações do material com o meio ambiente o agridem, fazendo com que a vida útil do concreto seja reduzida, mesmo sendo projetado e executado de maneira correta. Segundo Bolina *et al.* (2019), uma maneira de manter a vida útil da estrutura é com a prática de manutenções no concreto, podendo essa ser dividida em tipos diferentes, como manutenção preventiva, manutenção corretiva e manutenção preditiva.

Contudo, Mehta e Monteiro (2008) relatam que custos com manutenções de estruturas já existentes chegam a 40% do custo total relacionado a construção civil, onde os outros 60% estão destinados para a construção de novas estruturas. Os autores ainda afirmam que o custo crescente destinado para essa atividade trás uma necessidade de mais estudos a fim de melhorar a durabilidade do material.

Um dos fenômenos que degradam as estruturas em concreto, quando inseridas em locais com elevada umidade, como fundações e barragens, é a Reação Álcali-Agregado (RAA), que causa fissurações no concreto por meio de tensões internas. A partir do surgimento de fissuras, o concreto se encontra suscetível à ações deletérias que prejudiquem sua durabilidade. Custos envolvendo reparos em estruturas de barragens e usinas hidroelétricas afetadas pela RAA costumam ser bastante elevados (HASPARYK, 2005).

Frente à esse desafio, uma solução testada e estudada nos últimos anos é o fechamento de fissuras por meio da autocicatrização do concreto, que consiste na mitigação dessas fissuras por mecanismos da própria estrutura, seja por elementos já existentes no concreto, como por exemplo a re-hidratação do cimento a partir de grãos anidros ou deposição de carbonato de sódio na abertura, ou então pela adição de elementos no concreto com o intuito de reparar as fissuras, como microcápsulas contendo bactérias específicas e aditivos cristalizantes (ECA) (IGARASHI *et al.*, 2009).

Responsável pelo desencadeamento da autocicatrização autógena no concreto, o ECA funciona como um aditivo redutor de permeabilidade, impedindo a percolação da umidade para o interior da estrutura. O aditivo pode ser aplicado de duas formas, sendo elas adicionado à mistura durante o processo de produção do concreto ou aplicado como um impermeabilizante de superfície (TAMBARA, 2022; BIANCHIN, 2018).

Considerando a utilização do concreto inserido em ambientes em contato direto com umidade, a ocorrência da RAA se torna uma das principais causadoras de fissuras no concreto. Aliando o fato que a RAA ocorre na presença de umidade, característica também observada em aditivos cristalizantes, surge a proposta de analisar a interação

da utilização desse tipo de aditivo para a autocicatrização de fissuras geradas a partir da RAA a fim de evitar gastos com manutenção em estruturas avariadas em sua manifestação.

1.1 Objetivos

O presente estudo tem como base os Objetivos dos itens 1.1.1 e 1.1.2

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a interação de um aditivo cristalizante, adicionado a matriz do cimento, na autocicatrização de barras de argamassa fissuradas pela Reação Álcali-Agregado.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar a expansão em barras de argamassas, submetidas ao ensaio acelerado de RAA, contendo e não contendo aditivo cristalizante;
- Avaliar propriedades mecânicas (compressão e tração na flexão) das barras de argamassa nas idades de 28 e 60 dias após o ensaio acelerado de RAA;
- Avaliar propriedades de indicativo de durabilidade das barras de argamassa nas idades de 28 e 60 dias através do ensaio de absorção de água por capilaridade, após o ensaio acelerado de RAA;
- Analisar a existência de cristais precipitados nas fissuras ocasionadas pelo ensaio acelerado de RAA, por meio de imagens obtidas por microscópio óptico.

1.1.3 Justificativa

A pesquisa sobre a aplicação de aditivos cristalizantes no concreto é crescente nos dias atuais, onde estudos de Jiang *et al.* (2015), Moreira (2016), Ferreira (2017), Bianchin (2018), Lima *et al.* (2021), Jantsch *et al.* (2021), Tambara (2022) relatam resultados promissores para propriedades mecânicas e propriedades com relação a durabilidade do concreto. Entretanto, sua utilização frente à fissuração causada por RAA é um assunto pouco retratado, sendo discutido nos estudos de Munhoz *et al.* (2021) e Vilela *et al.* (2021).

Portanto a necessidade da redução de custos voltados à manutenção de estruturas em concreto onde há a ocorrência de RAA justifica o estudo com enfoque na utilização de aditivos cristalizantes como um método de autocura autógena do concreto. A utilização desse tipo de concreto apresenta um custo mais elevado para produção, porém a longo prazo apresenta um valor considerável de economia em investimentos de reparos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos tópicos 2.1 a 2.6 é apresentada a revisão bibliográfica dos temas tratados na pesquisa.

2.1 O concreto e suas manifestações patológicas

O método construtivo mais utilizado no Brasil é o concreto armado, isso se deve ao menor custo para sua produção tão como a sua maior resistência à agressividade causada pelo ambiente de inserção e à água. Contudo, mesmo com a elaboração de projetos de execução, com intuito de beneficiar a vida útil da estrutura, a negligência na realização do serviço, bem como a utilização de materiais inadequados, podem causar danos a estrutura, se tornando necessário o acompanhamento a partir de vistorias e manutenções periódicas a fim de garantir um melhor desempenho à estrutura (BOLINA *et al.*, 2019).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a durabilidade do concreto se da na interação do material com o ambiente em que se encontra, onde é caracterizado durável quando as suas propriedades e características iniciais são mantidas após entrar em contato com o ambiente para qual é destinado. A durabilidade do concreto então, pode ser traduzida no tempo de duração da estrutura cumprindo seu papel de projeto, essa propriedade do concreto também pode ser denominada vida útil.

Tiecher (2006) afirma que o concreto, material amplamente utilizado no mundo, é aplicado nos mais diversos ambientes, o que pode acarretar o desencadeamento de manifestações patológicas. Assim, segundo Saliba e Junior (2019), manifestações patológicas na construção são ocorrências nos elementos que constituem a edificação, como por exemplo fissuras, trincas, rachaduras, eflorescências, corrosão de armadura, etc.

Segundo Dal Molin (1988), a aparição de fissuras não é um problema simples de se resolver, pois as causas delas variam muito de caso para caso, dificultando a realização de ações preventivas. Para Morais *et al.* (2020), as fissuras são manifestações patológicas que servem como porta de entrada para outras, como a corrosão de armaduras, que para o autor, é um fenômeno perigoso para a estrutura em si e para seus usuários.

Um dos fenômenos que promovem a microfissuração de concretos ocorre pela Reação álcali-agregado (RAA). Esse fenômeno envolve pressões internas geradas por um gel que incha ao absorver moléculas de água (HOU *et al.*, 2004). Segundo Lopes (2004), as fissuras formadas pela RAA assumem padrão de fissuras de mapeamento, podendo demorar vários anos para que se tornem macro-fissuras nas estruturas.

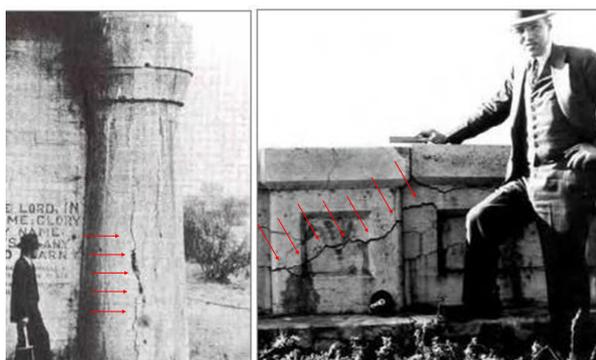
2.2 Reação Álcali-Agregado e os mecanismos de expansão

A microfissuração por Reação álcali-agregado é uma manifestação patológica encontrada em elementos de concreto onde, através de reações químicas internas envolvendo os álcalis presentes no cimento Portland e minerais reativos que compõem os agregados, é formado um produto que possui características expansivas quando em contato com água, podendo comprometer a estrutura atingida (HASPARYK, 2005).

O começo dos estudos sobre a reação álcali-agregado se deu por Stanton, em 1940 no estado da Califórnia, quando foi identificada uma reação deletéria envolvendo os álcalis presentes no Cimento Portland e a sílica dos agregados, dando origem ao nome reação álcali-agregado. Foi constatado por meio de experimentos que a reação podia formar eflorescências brancas e causar expansão e fissuração. Durante as décadas de 1920 e 1930 foram registrados vários casos em estruturas no Sul da Califórnia, comprovando as ações da RAA (STANTON, 1940 apud Santos (2021)).

Na Figura 1 pode-se observar casos de RAA em elementos de concreto.

Figura 1 – Presença de fissuração causada por RAA nos estudos de Stanton.



Fonte: Califórnia Department of Transportation, apud Mehta e Monteiro (2008, p. 171).

A partir dos primeiros estudos, diversas instituições iniciaram pesquisas sobre a RAA, como por exemplo: *Army Corps of Engineers*, *Portland Cement Association* (ambas nos E.U.A), *Australian Council for Scientific and Industrial Research*, na Austrália, e também na Dinamarca com o *Danish National Committee*, tendo como alguns de seus objetivos entender os processos da reação, buscar conhecimento com relação a quais tipos de rochas contribuíam para a RAA e associar tipos de agregado com tipos diferentes de cimento para medir os respectivos potenciais reativos (SILVA, 2007b).

Segundo Paulon (1981, apud Silva, 2007b), a primeira publicação técnica sobre a RAA no Brasil foi feita por Gitahy, em 1963, quando foi verificada a reatividade nos agregados disponíveis para a construção da barragem de Jupia, no Rio Paraná (SP). Porém, devido a impossibilidade da utilização de outros tipos de agregados, a solução encontrada foi a utilização de 35% de pozolana artificial e um uso limitado de álcalis no cimento devido ao agregado estudado ser reativo. Hasparyk (2005) relata manifestação de RAA na UHE Furnas, observadas a partir do ano de 1976, onde as

principais ocorrências foram fissuração em elementos como pilares do vertedouro e em blocos de ancoragem, e desnivelamento do coroamento entre muro central e blocos adjacentes. Ainda para a autora há mais de 140 casos de barragens afetadas por RAA no meio técnico, porém além da manifestação nesse tipo de obra, a reação passou a ser relatada em fundações de edificações brasileiras.

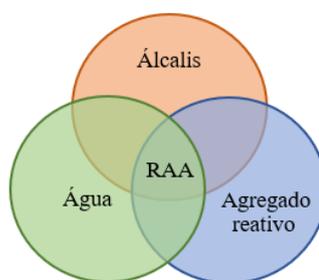
Por se tratar de uma reação que ocorre na presença de umidade, estruturas como fundações e pontes são as mais suscetíveis (MEHTA *et al.*, 1994). Para Silva (2007b), o interesse em estudar a reação álcali-agregado no Brasil aumentou nos últimos anos devido ao grande número de incidências, do risco que representa e do seu elevado custo de manutenção. Um exemplo de gasto elevado com manutenção de danos causados por RAA é o relatado pelo Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), onde é relatado que foram gastos aproximadamente trezentos e cinquenta milhões de dólares americanos em reparos à estruturas em que a reação se manifestou (CBDB, 1999, apud SILVA, 2007b).

Oliveira (2007) afirma que após o colapso da estrutura do edifício Areia Branca, localizado na região metropolitana de Recife PE, uma importância maior foi dada à infraestrutura das edificações, onde após vistorias em edifícios vizinhos e perícia no edifício Areia Branca foi comprovada a presença de reação álcali-agregado nos elementos de fundação.

Para Lopes (2004), para que ocorra a RAA, é necessária a presença de três fatores: Álcalis presentes no cimento Portland, sílica reativa presente nos agregados e umidade. Caso não existam quantidades suficientes de algum dos três a reação não ocorrerá.

O esquema representado na Figura 2 ilustra a interação dos fatores necessários para a ocorrência da RAA.

Figura 2 – Esquema ilustrativo da formação da RAA.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008, p. 186)

De acordo com Tiecher (2006), os íons alcalinos, como sódio (Na^+) e potássio (K^+), juntamente com os íons hidroxila (OH^-) e alguns minerais componentes dos agregados são envolvidos para que ocorra a RAA. Para Couto *et al.* (2008), os álcalis são em sua maioria provenientes do Cimento Portland, porém podem vir de outras fontes como a água de amassamento, aditivos químicos e adições minerais.

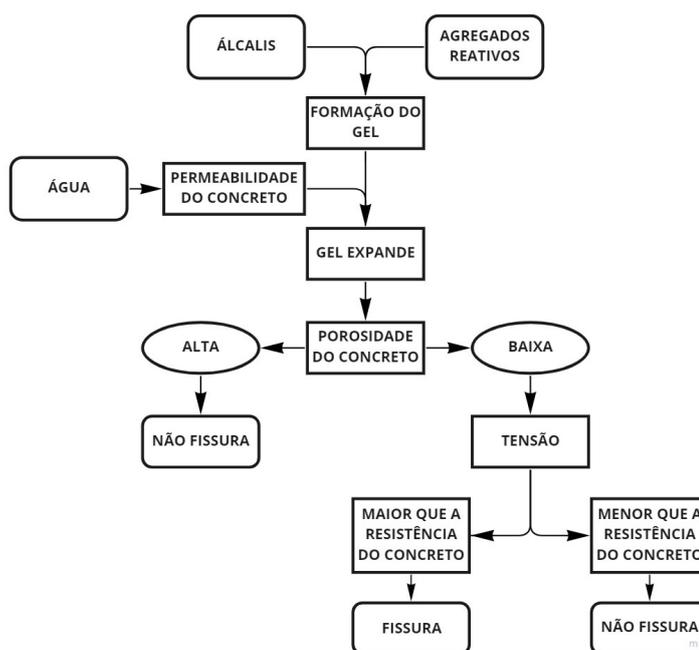
Segundo Peterson (2000), os íons em questão estão presentes no clínquer constituinte do Cimento Portland devido ao processo de calcinação, onde durante as elevadas temperaturas de produção K^+ e Na^+ são vaporizados e condensados posteriormente durante o transporte. Parte dos álcalis ficam na superfície do clínquer, enquanto outra parte se faz presente no seu interior. Ainda, para o autor, os álcalis superficiais se tornam disponíveis de maneira mais rápida, enquanto os mais internos terão uma disponibilidade gradativa com o processo de hidratação.

O produto da reação entre os álcalis e a sílica reativa, juntamente com umidade, é um gel alcalino com características higroscópicas, que ao entrar em contato com água aumenta de volume. A composição do gel varia de acordo com a composição dos materiais que reagem (POOLE, 1991). A reação ocorre de maneira espontânea quando presente em ambiente propício e após seu início, não há como pará-la (VALDUGA, 2002).

Valduga (2002) afirma que o gel alcalino é gerado a partir da movimentação dos cátions na tentativa de equilibrar a estrutura da sílica que está sofrendo ataques dos íons hidroxilas. Esses ataques têm origem devido ao elevado pH no processo de hidratação da mistura que contém os álcalis. Esse gel tem características higroscópicas, portanto atrai moléculas aquosas, e ao absorver essas moléculas o gel aumenta de volume, gerando tensões internas devido ao seu confinamento dentro da matriz cimentícia, podendo ocasionar fissuração (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Na Figura 3 é apresentado um fluxograma das etapas da reação álcali-agregado.

Figura 3 – Fluxograma das etapas da reação álcali-agregado



Fonte: Adaptado de Valduga (2002, p. 16)

2.3 Tipos de reação álcali-agregado

Existem três tipos de RAA, que segundo Couto *et al.* (2008) se diferem de acordo com a característica do material reativo encontrado, são elas a Reação álcali-sílica (RAS), Reação álcali-silicato (RASS) e a Reação álcali-carbonato (RAC).

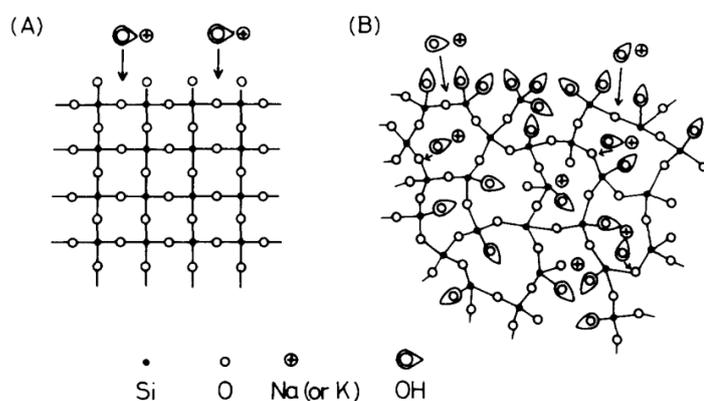
2.3.1 Reação álcali-sílica (RAS)

De acordo com Pessi (2016), a reação álcali-sílica é a mais comumente relatada nos estudos sobre RAA, além de ser a mais frequente e que ocorre de forma mais rápida. Para Fournier e Bérubé (2000), a reação é desencadeada pelo aumento da solubilidade e da instabilidade da sílica em um meio alcalino, o autor ainda divide a disposição da sílica presente nos agregados em duas categorias:

1. Rochas compostas pelos minerais Opala, tridmita, cristobalita e vidro vulcânico: Para a RAS envolvendo agregados com essa composição a manifestação das patologias causadas é mais rápida, acontecendo dentro de alguns anos após a construção do elemento de concreto.
2. Rochas compostas pelos minerais Quartzo ou algumas variedades de Quartzo macrogranular: Para a RAS envolvendo os agregados com essa composição a manifestação das patologias causadas é mais lenta, demorando de 10 a 25 anos para apresentarem um grau significativo.

Segundo Mizumoto (2009), a sílica é presente nos agregados reativos como dióxido de silício (SiO_2) e pode estar disposta de diversas formas, dentre elas a forma cristalina (Figura 4 (A)) e a forma amorfa (Figura 4 (B)). O autor afirma também que quando em forma amorfa, o SiO_2 é mais reativo quimicamente em relação a conformação cristalina, pois sua estrutura desordenada facilita a sua interação com as hidroxilas.

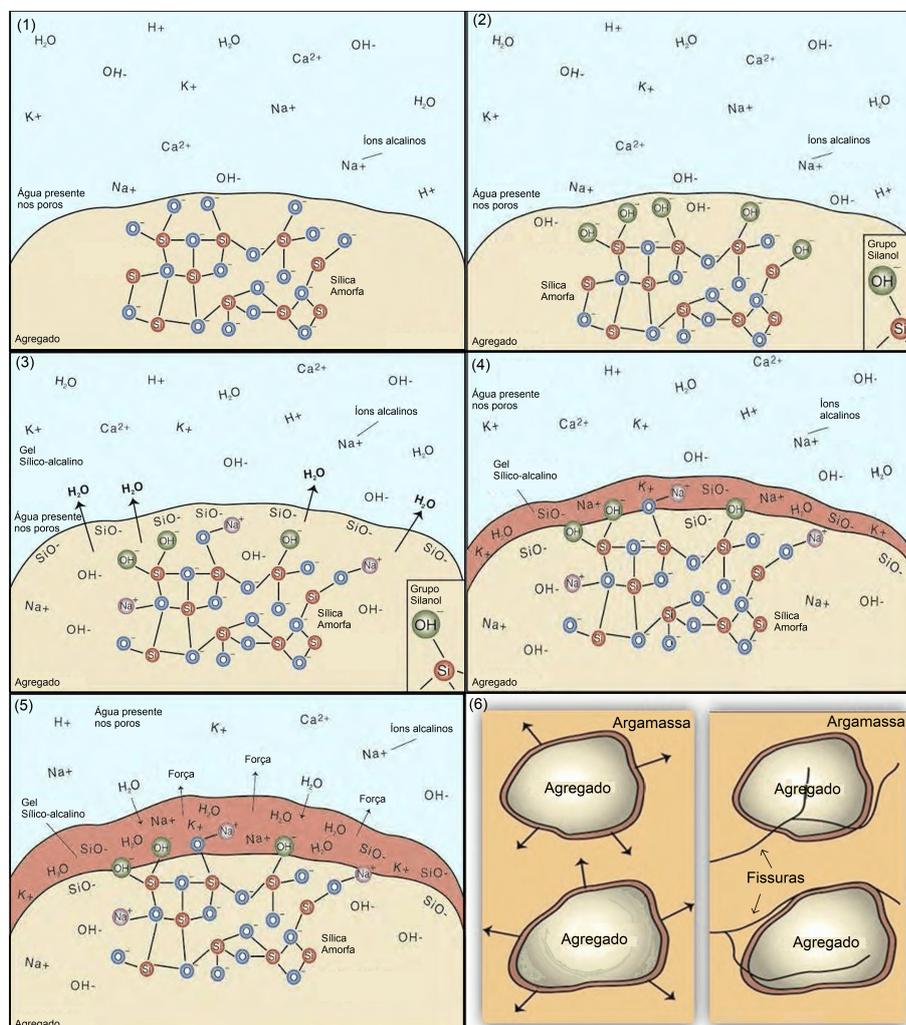
Figura 4 – Estrutura do dióxido de silício presente nos agregados



Fonte: Glasser e Kataoka (1981, p. 2)

Para Couto *et al.* (2008), após o ataque dos íons hidroxila e a incorporação dos íons alcalinos Na^+ e K^+ na estrutura da sílica reativa, o gel expansivo é formado. Na Figura 5 é apresentado o processo de formação do gel na reação álcali-sílica.

Figura 5 – Processo de formação do gel da RAS



Fonte: Adaptado de Collins *et al.* (2007) apud Mizumoto (2009, p. 35-37)

(1) Pasta de cimento envolvendo agregado reativo; (2) Íons hidroxila realizando ataque sobre a superfície do agregado; (3) Dissociação de SiOH; (4) Formação do gel ao redor do agregado; (5) Expansão do gel após absorção de moléculas de água; (6) Formação de fissuras após a expansão do gel álcali-sílico.

Hasparyk (2005) cita que segundo a literatura a formação do gel se dá em duas fases. A primeira fase da RAS se dá no ataque realizado pelos íons hidroxilas à superfície do agregado reativo, mais especificamente ao grupo silanol (Si-OH), liberando SiO⁻ e água. Em seguida os íons Na^+ são atraídos à estrutura que agora está desbalanceada devido a presença de SiO⁻, esse segundo processo é o responsável pela formação do gel (TURRIZIANI, 1986; STIEVENARD-GIREAUD, 1987; HOBBS, 1988; BULLETIN 79,1991; HELMUTH & STARK, 1992; CAPRA *et al.*, 1995; FURNAS, 1997; apud HASPARYK, 2005). Isso pode ser observado nas equações 2.1 e 2.2.





A segunda fase da reação também se dá em função do ataque de hidroxilas, porém dessa vez ao grupo siloxano (Si-O-Si). Isso pode ser observado na equação 2.3. Pode-se observar então, um ciclo de formação do gel sílico-alcálico.



2.3.2 Reação álcali-silicato (RASS)

Segundo Valduga (2002), a reação álcali-silicato é uma reação semelhante à RAS, porém mais lenta em razão de os minerais reativos não estarem tão disponíveis na superfície, e sim na matriz e também à presença de quartzo deformado. Ela é resultado da interação entre hidroxilas e silicatos presentes em rochas sedimentares (argilitos, siltitos, folhelhos argilosos e grauvacas), ígneas (granitos) e metamórficas (gnaisse e quartzitos) e é listada como a reação que mais ocorre no Brasil. Porém para a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), a reação álcali-agregado passou a ser dividida apenas em dois tipos, onde a reação álcali-silicato é considerada um tipo lento de reação álcali-sílica.

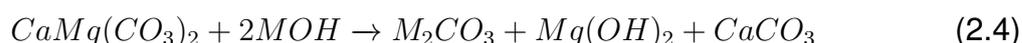
Conforme Gillott (1975), rochas como argilitos e grauvacas geralmente contêm quartzo, feldspato, filossilicatos e, às vezes, carbonato. O produto da RASS foi encontrado, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em meio aos grãos de feldspato e quartzo, minerais esses que são considerados os maiores causadores da reação (SILVA, 2007a; SILVA, 2007b). De acordo com Gallo *et al.* (2007), o produto da RASS é um gel, que assim como o presente na RAS possui baixa aderência, servindo como um elemento de má ligação entre o agregado e a matriz cimentícia que pode expandir em contato com a água, ocasionando fissuração e gerando baixa resistência à estrutura.

2.3.3 Reação álcali-carbonato (RAC)

De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), a reação álcali-carbonato acontece entre hidróxidos alcalinos provenientes do cimento ou outras fontes e agregados calcários dolomíticos argilosos, onde ocorre a desdolomitização que pode causar expansão nas condições ideais. Caso não cause expansão deletéria não será considerada reação álcali-carbonato. A RAC se difere da RAS e da RASS devido a não formação de gel (PAULON, 1981 apud SILVEIRA, 2006). Para Gallo *et al.* (2007), o produto final da reação álcali-carbonato possui menor volume comparado aos reagentes, porém a expansão ocorre na continuidade da reação, que só cessará após toda a dolomita disponível reagir ou então até a concentração de álcalis ser reduzida quantidade suficiente por outras reações.

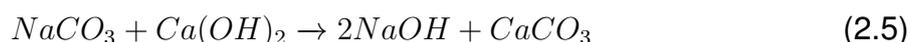
Segundo Ozol (1994), diferente da RAS, cuja fissuração se dá pela expansão do gel produzido pela reação, a RAC tem sua fissuração causada pela expansão e fissuração do próprio agregado reativo. Tiecher (2006) afirma que mesmo tendo uma importância elevada no exterior, no Brasil ainda não foi registrado nenhum caso de RAC.

Segundo Hadley (1961), a reação ocorre seguindo a equação 2.4, que representa a interação da dolomita com os álcalis do cimento, formando brucita, carbonato alcalino e carbonato cálcico.



M pode representar K, Na ou Li.

No concreto, o produto alcalino da dedolomitização reage com os produtos gerados pela hidratação do cimento, regenerando os álcalis e seguindo a reação de dedolomitização, até toda dolomita reagir ou então se esgotarem os álcalis do cimento. A segunda reação pode ser observada na equação 2.5 (HADLEY, 1961).



2.4 Fatores de influência da reação álcali agregado

Para Tiecher (2006), a ocorrência da RAA depende de diversos fatores que tem relação direta com os materiais que fazem parte da composição do concreto, com as condições em que se encontra inserido no ambiente e com agentes que inibem a reação. Além dos três fatores observados na Figura 2, Neville (2016) afirma que a permeabilidade da pasta de cimento tem alta importância na reação devido ao controle que se dá na movimentação dos fluidos no concreto (água, e gel).

Abaixo serão tratados de maneira mais detalhada os agentes de influência da RAA.

2.4.1 Álcalis do cimento

Segundo Poole (1991), a RAA acontece devido, dentre outros fatores, da presença de álcalis que são geralmente advindos do Cimento Portland. Ainda para o autor os álcalis encontrados no cimento procedem da matéria prima utilizada para produzir o clínquer, na qual pode haver a existência dos minerais mica ou illita, servindo como fonte de potássio na composição ou ainda feldspato, enriquecendo o cimento de sódio, ou potássio ou ambos componentes. A proporção de óxidos de sódio e potássio pode ser representada através da equação 2.6, que se denomina cálculo do equivalente de sódio.

$$Na_2O_{(eq)}(\%) = Na_2O(\%) + 0,658 * K_2O \quad (2.6)$$

Caso a única fonte de álcalis do concreto for o cimento, a RAA pode ser impedida com o controle do número de álcalis dessa origem, limitando a sua quantidade a até 0,6%, o que, em termos de número equivalente de sódio, resulta em um máximo de 3 quilogramas de álcalis para cada metro cúbico de concreto composto por agregado reativo (NEVILLE, 2016).

2.4.2 Agregados reativos

O concreto é formado por materiais sólidos e líquidos, onde cerca de 70% de sólidos são agregados, materiais esses que influenciam na durabilidade do concreto. Esses fatores de influência dependem da formação da rocha mãe e dos processos na qual a mesma é submetida até chegar no agregado utilizado na produção do concreto (TIECHER, 2006). De acordo com Nogueira (2010), tipo, tamanho, forma, composição e área específica dos grãos são características dos agregados que influenciam na RAA.

Segundo Poole (1991), utilizar os tipos de rocha para classificar a reatividade do agregado é errado, o que importa é a composição da rocha, onde mesmo havendo a presença de sílica, os arranjos do composto que mais influenciam são as estruturas amorfas ou vítreas. A gama de tipos de rocha utilizados como agregados é muito grande e também sabe-se que a maioria das rochas são compostas por mais de um tipo de mineral, aliando isso ao fato de que uma quantidade de apenas 2% de componentes reativos já é suficiente para causar danos no concreto, para declarar um agregado como sendo não reativo demanda uma extensa análise de registros e dados de ensaios.

A NBR 15577-3 (ABNT, 2018) apresenta uma lista de minerais e rochas que apresentam suscetibilidade à RAA. Esses materiais estão expressos nas Tabela 1 e 2. Ainda pela norma, pode ser caracterizado como reativo um agregado que, após passar pro ensaios petrográficos, apresentar uma composição que contenha valores de minerais superiores à 5% de quartzo granular ou deformado, 3% de calcedônia, 1% de tridimita ou cristobalita, 3% de vidro vulcânico e 0,5% de opala.

2.4.3 Umidade e Temperatura

Segundo Forster *et al.* (1999), para que a reação ocorra, é necessária uma taxa de umidade interna no concreto superior à 80%, caso contrário a reação irá cessar. De acordo com Poole (1991), dentro dos teores de umidades necessários para a ocorrência da RAA, em ambientes mais úmidos a reação se desenvolve de maneira mais rápida, isso se explica pela maior quantidade de moléculas de água absorvidas pelo gel alcalino. A única maneira de interromper a Reação álcali-agregado

Tabela 1 – Minerais e rochas suscetíveis à Reação Álcali-Agregado (Parte 1).

Minerais reativos, com cristalinidade baixa ou sílica metaestável e vidros vulcânicos		
Material reativo	Rochas de ocorrência	
	Rochas sedimentares	Rochas vulcânicas
Opala, tridmita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico.	Rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito	Rochas vulcânicas com vidro ou vitrofiricas: rochas ácidas, intermediárias ou básicas como riólito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítrea, além de alguns basaltos

Fonte: Adaptado de NBR 15577-3 (ABNT, 2018, p.7)

Tabela 2 – Minerais e rochas suscetíveis à Reação Álcali-Agregado (Parte 2).

Rochas potencialmente reativas contendo quartzo	
Material reativo	Tipos de rocha
Calcedônea, quartzo micro e criptocristalino.	Chert, veio de quartzo, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicoso e calcário com quartzo microgranular disperso. Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino.
Quartzo macrogranular fraturado e/ou deformado, podendo conter agregados de quartzo microcristalino no contato do grão (textura mortar).	Outras rochas que contenham quartzo deformado, microcristalino ou criptocristalino, tais como: <ul style="list-style-type: none"> • Rochas ígneas: granito, granodiorito e charnockito. • Rochas sedimentares: grauvaca, siltito, argilito, folhelo, calcário silicoso e arcóseo. • Rochas metamórficas: gnaisse, quarzo-micaxisto, quartzito, filito, ardósia, rochas miloníticas e cataclásticas.

Fonte: Adaptado de NBR 15577-3 (ABNT, 2018, p. 7)

depois que ela começa é cortando a fonte de alimentação do gel, o que implica na secagem e prevenção de futuras molhagens do concreto, impedindo assim a expansão do gel (NEVILLE, 2016). Vale ressaltar, também comentado pelo autor que o efeito de molhagem e secagem alternado é considerado um efeito prejudicial para a estrutura,

pois induz à uma migração dos íons alcalinos da parte mais úmida para a parte mais seca.

Juntamente com a umidade, a temperatura serve como um catalizador para a RAA, pois é dito que temperaturas elevadas influenciam diretamente em reações químicas (VALDUGA, 2002). Para Neville (2016), o aumento da temperatura pode influenciar na RAA diminuindo a taxa de umidade necessária para a sua ocorrência, isso pode ser explicado considerando que o aumento da temperatura diminui a solubilidade do Ca(OH) e aumenta a da sílica.

Segundo Swamy e Al-Alasi (1988, apud Thieche, 2006), houve diferença entre corpos de prova curados à uma temperatura de 20 °C e de 38 °C, onde a segunda situação apresentou resultados inferiores em índices de resistência à compressão e também expansão e fissuração em uma taxa elevada.

2.4.4 Aditivos químicos e Adições minerais

As adições minerais são utilizadas no concreto com alguns propósitos, entre eles a diminuição de seu custo e o controle da expansão ocasionada pelo produto da RAA (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Segundo Fraga *et al.* (2017), para a reação álcali-agregado, a adição mineral pozolânica é uma forma encontrada para a sua mitigação, onde esse composto pode ser encontrado em diversas fontes, como cinza de casca de arroz, cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa, metacaulim, etc. O autor ainda comenta que para que a adição tenha resultado favorável na mitigação da RAA, deve ser respeitado um teor ótimo, caso contrário terá um impacto negativo.

De acordo com Diamond (1984, apud Tiecher, 2006), o benefício das adições minerais se dá por meio da reação da sílica das adições com os álcalis do cimento Portland, formando produtos não expansivos. Essas reações ocorrem antes da reação da sílica do agregado com os álcalis do cimento (RAA).

Segundo Neville (2016), os aditivos químicos são utilizados no concreto pois melhoram propriedades físicas e podem melhorar sua viabilidade econômica. Em busca da utilização de adições minerais para a mitigação da reação álcali-agregado, devido a demanda de uma maior relação água/cimento, o uso de aditivos que melhorem a trabalhabilidade do concreto são utilizados, porém o uso de aditivos superplastificantes acabam agindo de maneira prejudicial, pois diminuem o teor de ar incorporado, fazendo com que a porosidade do concreto seja menor. Isso implica no aumento das tensões internas geradas pelo gel que não possui espaço suficiente para se acomodar (SILVA, 2015).

Por outro lado, nos estudos de Mo *et al.* (2005) comprova-se que o uso de LiOH como aditivo no traço, adicionado em um teor de 2,5% a 3,0% ajudam na mitigação da RAA, funcionando de maneira à ocupar os íons Li⁺ antes dos íons K⁺ e Na⁺, formando um gel não expansivo e esgotando a sílica do agregado, dificultando a formação do gel

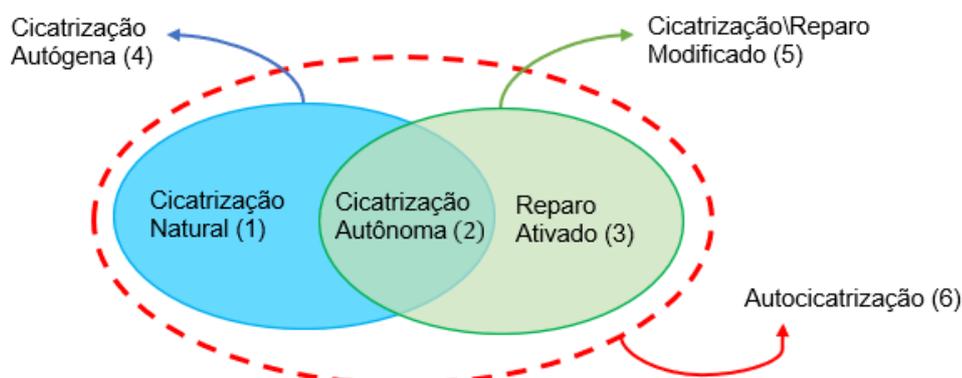
expansivo formado pela RAA. Quanto mais alcalino for o agregado, mais efetivo será o LiOH na mitigação da Reação.

2.5 Self-healing no concreto

A capacidade do concreto selar suas próprias fissuras é um fenômeno antigo, porém estudos sobre seu funcionamento para atuar na mitigação de danos à estrutura são mais recentes (BIANCHIN, 2018). RILEM-221-SHC (2013) usa como exemplo tecidos humanos ou de plantas, que após sofrerem danos têm poder de se autocicatrizarem, para introduzir o tema de *self-healing* no concreto. Na obra ainda o processo de autocicatrização é descrito em dois tipos, a autocicatrização autógena, e a autocicatrização autônoma.

Para Igarashi *et al.* (2009), o processo de autocicatrização pode ser dividido mais detalhadamente, considerando os modelos de Cicatrização natural, Cicatrização autônoma e Reparo ativado, estando esses inseridos em grupos de Cicatrização autógena ou Cicatrização/Reparo modificado, todos fazendo parte de um Conjunto de Autocicatrização/Reparo, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Modelos de Autocicatrização do concreto.

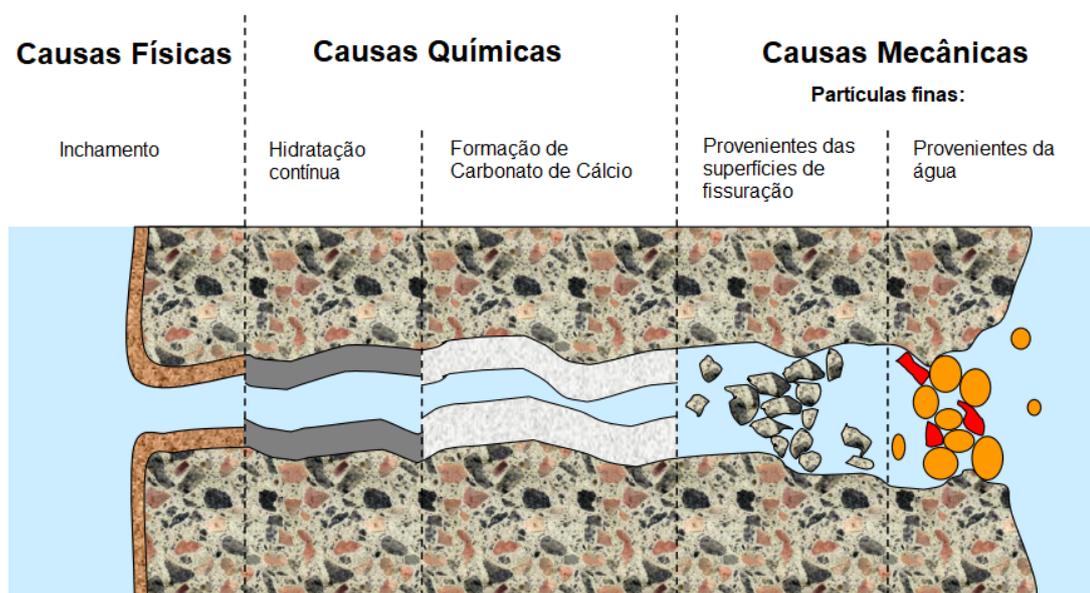


Fonte: Adaptado de Igarashi *et al.* (2009, p. 94)

2.5.1 Autocicatrização autógena

A autocicatrização autógena é caracterizada pelo processo de *self-healing* que ocorre utilizando materiais e componentes já existentes no concreto, que não necessariamente são destinados à esse fenômeno. O fechamento de uma fissura com o passar do tempo pode ser tomado como exemplo de autocicatrização autógena, onde os processos podem ocorrer por três causas distintas, sendo elas causas físicas, causas químicas e causas mecânicas, como indicado na Figura 7 (RILEM-221-SHC, 2013).

Figura 7 – Tipos de Autocicatrização Autógena.



Fonte: Adaptado de RILEM-221-SHC (2013, p. 65).

As causas físicas ocorrem por meio do inchamento da pasta de cimento próxima a fissura, aumentando o volume e por consequência estreitando a abertura da fissura. Esse estreitamento chega a reduzir 10% do valor total de fluxo de fluidos na abertura. A primeira causa química dada por hidratação contínua pode ser explicada por meio do recurso de potencial inerte de autocura, onde uma porcentagem de componentes do cimento se encontram anidros, por consequência sem reagir, o que ocasiona uma hidratação tardia de certos grãos de cimento após o surgimento de fissuras na matriz. A segunda causa química consiste na formação de cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3) que precipitam na fissura, a reação ocorre entre os íons de cálcio (Ca^{2+}) da água que se encontra nos poros do concreto com os íons carbonato (CO_3) da água que se encontra na abertura. Vale ressaltar que essa reação depende de fatores como temperatura, pH e concentração dos íons reagentes. As causas mecânicas, tratadas com menos importância, consistem no preenchimento de fissuras com partículas finas que se depositam no local, geradas a partir do próprio processo de fissuração ou por partículas carreadas pela água (REINHARDT *et al.*, 2013; BREUGEL, 2007).

Exemplo de Autocicatrização autógena pode ser observada nos estudos de Brauner (2018), onde a utilização de baixas relações água/cimento combinadas com processos de molhagem e secagem de concretos fissurados resultou no fechamento das fissuras devido à presença de grande quantidade de grãos anidros de cimento, esse processo se encaixa na autocicatrização autógena de causa química por hidratação contínua.

2.5.2 Autocicatrização Autônoma

Venquiaruto (2017) afirma que a Autocicatrização autônoma acontece em conjunto com a adição de materiais que não se fazem presentes no sistema com o intuito de propiciarem a ocorrência do fenômeno. Para Igarashi *et al.* (2009), esse processo ocorre por meio da adição de materiais que complementem a mistura, promovendo uma maior quantidade de materiais cimentantes o que faz com que as fissuras sejam preenchidas em ambientes que contenham umidade, esses materiais adicionados podem se tratar de cinza volante, aditivos expansivos, etc. Segundo Souza *et al.* (2021), a utilização de silicato de sódio neutro como aditivo no traço do concreto, seja dissolvido na água de amassamento, ou posteriormente aspergido, apresenta propriedades cicatrizantes para o fechamento de fissuras no material em que foi acrescentado.

Um dos aditivos expansivos utilizados trata-se do aditivo cristalizante, que, segundo Moreira (2016), aumenta as características impermeáveis do concreto através do fechamento de fissuras por meio da percolação de cristais, o que faz diminuir a taxa de exposição do concreto à agentes agressivos presentes no meio de inserção, isso gera uma maior vida útil em novos concretos e em estruturas já existentes.

Ferreira (2017) afirma que a utilização do aditivo cristalizante ocasionou a diminuição da absorção de água em um corpo composto de materiais cimentícios, porém sem melhorias nas propriedades mecânicas. Oliveira (2019) compara diferentes teores de aditivo cristalizante incorporados no traço de pastas de cimento Portland, onde foi constatada uma melhora na resistência à compressão, juntamente da diminuição da porosidade do material.

Estudos recentes relacionados a autocicatrização autônoma com a utilização de aditivo cristalizante podem ser observados no item 2.6.

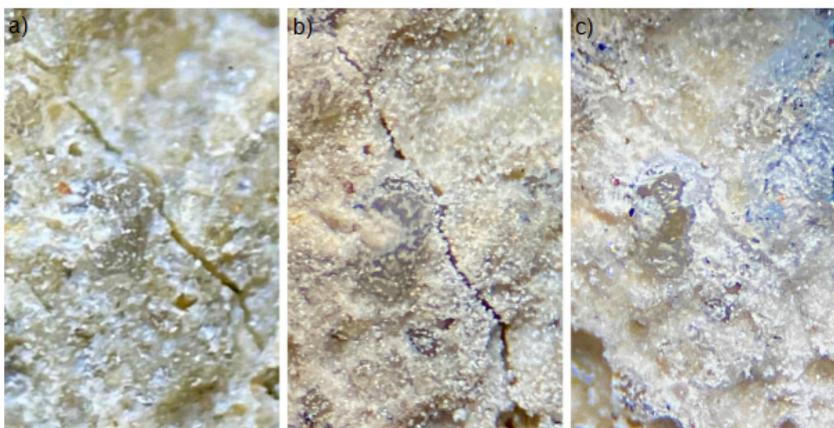
2.5.3 Reparo Ativado

O reparo ativado como cicatrização do concreto é definido pelo uso de materiais misturados no concreto durante sua produção com a função de estancar as aberturas de maneira automática, como exemplo desses materiais podemos citar a utilização de bactérias (IGARASHI *et al.*, 2009). A colmatação das fissuras se dá por meio da sintetização de minerais inorgânicos por células bacterianas, que resulta na precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), isso se deve ao metabolismo das bactérias presentes. Esse processo é chamado de biomineralização (ACHAL *et al.* apud KOGA; SANTOS, 2020).

Ehrenbring (2020) constatou o preenchimento de fissuras de até 900 μm por meio de adições de soluções bacterianas, contendo a bactéria denominada *Bacillus subtilis* AP91 encapsulada em perlita expandida. Para Bonifácio *et al.* (2022), a utilização do mesmo tipo de bactérias no concreto é uma prática benéfica, pois apresentou, além

do fechamento de fissuras, que já causa um aumento na durabilidade de estruturas, aumento de sua resistência à compressão. Contudo o autor ressalta o elevado pH do composto, necessitando maiores estudos de aplicação para o Concreto Armado. Na Figura 8 é possível observar o fechamento de uma fissura durante um período de 45 dias, onde o carbonato de cálcio precipitado é observado tanto no interior da fissura como na superfície do corpo de prova (ZAKRZEWSKI, 2022).

Figura 8 – Fechamento de fissura por carbonato de cálcio precipitado.



Fonte: Adaptado de Zakrzewski (2022, p. 39).

a) Fissura aberta; b) Fissura em processo de selagem; c) Fissura selada após 45 dias.

2.6 Tecnologia *self-healing* por meio de aditivos cristalizantes

O aditivo cristalizante é um aditivo químico com a finalidade de impermeabilizar o concreto ao qual é adicionado. Essa impermeabilização ocorre com a formação de cristais insolúveis dentro dos capilares presentes no concreto, fazendo assim o barramento da passagem de água (Manejo Impermeabilizações, 2020). Esse processo de impermeabilização, segundo Ferrara *et al.* (2014), se propaga por todo o material de concreto e acontece por meio do consumo de umidade pelo aditivo cristalizante na formação de cristais. Esse processo pode também ocorrer de maneira tardia, após o surgimento de fissuras e novas incidências de percolação de água, o que causa o fechamento de futuras fissurações. Isso aumenta a vida útil de uma estrutura, já que o concreto geralmente sofre degradação devido a penetração de água juntamente com agentes agressivos (MUHAMMAD *et al.*, 2015).

A aplicabilidade de aditivos cristalizantes com objetivo de autocicatrização é um tema bastante estudado nos dias atuais. Pesquisas variando tipos de aditivos cristalizantes, teores desses aditivo, tipos de cimento combinados com aditivos cristalizantes, tipos de cura, inserção do aditivo no traço e utilização do aditivo como tratamento superficial são exemplos encontrados (JIANG *et al.*, 2015; MOREIRA, 2016; FERREIRA, 2017; BIANCHIN, 2018; LIMA *et al.*, 2021; JANTSCH *et al.*, 2021; TAMBARA, 2022).

2.6.1 Aditivos cristalizantes como mitigadores de fissuras em concreto

Jiang *et al.* (2015) declara que aditivos cristalizantes possuem capacidade de fechamento de fissuras, que ocorre lentamente com a presença de água, sendo que resultados em cura com água parada foram mais efetivos se comparados com água corrente. O autor também afirma que o aditivo combinado com outras adições minerais apresenta um resultado de cicatrização mais eficaz.

Moreira (2016), através de estudos comparativos entre diferentes tipos de cimento Portland com aplicação de aditivo cristalizante comprova que o aditivo atua na autocicatrização do concreto de tal forma a diminuir em até 44% a ascensão de água em um corpo de prova submetido ao ensaio de penetração de água sob pressão. Ademais a autora constata que o aditivo apresenta diferentes resultados conforme o tipo de cimento Portland utilizado.

De acordo com Ferreira (2017), o uso do aditivo cristalizante direto na matriz da argamassa produzida resultou em uma menor permeabilidade do concreto produzido perante o ensaio de absorção por capilaridade. O processo de formação dos cristais foi observado pelo autor a partir de 28 dias em processo de cura por imersão em água, já em processos de cura com ciclos úmidos e secos a formação de cristais nas fissuras não foi registrado. Além disso, o estudo de Ferreira (2017) analisou a aplicação de aditivo cristalizante incorporado a um traço de argamassa diretamente na fissura, o que resultou na vedação da fissura sem ocorrência de novas fissuras no local.

Segundo Bianchin (2018), a utilização de 1% de aditivo cristalizante em traços de concreto apresentaram uma melhora de até 28,4% na resistência à compressão na idade de 56 dias, em um concreto com relação água/cimento 0,43, comparado ao concreto de referência sem o aditivo. Perante os ensaios de penetração de íons cloreto o concreto com aditivos apresentou resultados semelhantes ao concreto referência independente das relações a/c e idades de ensaio. Vale ressaltar que os corpos de prova de concreto ensaiados foram fissurados na idade de 7 dias com 85% da carga de ruptura.

Para Lima *et al.* (2021), vários fatores influenciam na eficácia da utilização de aditivos cristalizantes no concreto, porém a água é o fator que se destaca dentre todos, isso devido à necessidade da presença de água na ocorrência do processo de cristalização das fissuras, portanto resultados em meio aquoso foram mais expressivos na ocorrência de *Self-Healing*. Além disso, o autor relata que a cicatrização ocorre em fissuras com aberturas de até 0,4mm, junto a isso o aumento de resistências e a não necessidade de manutenção periódica, com um inconveniente de custo de produção mais elevado comparado ao concreto convencional.

Jantsch *et al.* (2021) afirma que a aplicação de aditivos cristalizantes em argamassas estabilizadas por meio de aditivos contribuiu para o aumento da resistência das argamassas ensaiadas. Junto a isso, o autor relata que a estanqueidade dos corpos

de prova em até 50% utilizando o aditivo aplicado na superfície dos corpos de prova.

Conforme Tambara (2022), estudando a aplicação de aditivos cristalizantes em concretos e realizando ensaios de controle referentes a resistência à compressão axial e a absorção de água por capilaridade, com relação à resistência à compressão dos corpos de prova, tanto em corpos de prova pré-fissurados em primeiras idades, quanto em corpos de prova sem passar por esse procedimento, tiveram um aumento de suas resistências comparados ao traço de referência. Com relação à absorção de água por capilaridade, o autor afirma que, do período de 28 dias à 76 dias de moldagem, os resultados obtidos foram semelhantes ao concreto referência, concluindo que os aditivos cristalizantes apresentam um potencial promissor na utilização com propósito de melhorias mecânicas e de durabilidade.

2.6.2 Aditivos cristalizantes na Reação Álcali-Agregado

Segundo Munhoz *et al.* (2021), a utilização de aditivo cristalizante em meio a RAA pode ser algo benéfico, já que o aditivo trabalha como um redutor de permeabilidade, retirando a fonte de álcalis da reação com os agregados. Contudo, a composição do aditivo contribui na aceleração da reação, onde no estudo, perante avaliação de teores de 1% e 3% do aditivo, a contribuição para o fechamento de fissuras de ambos foi a mesma, porém na maior porcentagem o aditivo influenciou diretamente na propagação da RAA. Um contraponto da autocura em concretos afetados por RAA seria o surgimento de novas fissuras em função da reação. A fissuração em barras de argamassa ocorreu por meio da RAA, através do ensaio acelerado, utilizando agregados caracterizados como potencialmente reativos.

Vilela *et al.* (2021) relata que adicionando teores de 1% e 3% de aditivo cristalizante na mistura a resistência à compressão do material se elevou em comparação a um traço de referência sem o aditivo. O estudo buscou fissurar barras de argamassa por Reação álcali-agregado, porém os agregados utilizados foram classificados como potencialmente inócuos, isso pode ter influência na ocorrência de self healing por meio do aditivo cristalizante. Vale ressaltar que o ensaio acelerado em barras de argamassa, executado pelo autor, foi baseado na norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018), porém com solução básica em temperatura ambiente, podendo causar interferência nos resultados, já que o fator temperatura tem influência na ocorrência da reação, como visto no tópico 2.4.3.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados os materiais utilizados e os métodos adotados na realização deste trabalho, além das técnicas adotadas para efetuar a pesquisa.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa estão descritos de maneira detalhada nos tópicos 3.1.1 a 3.1.3.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland selecionado para a realização dos estudos foi o CPV-ARI, proveniente da cidade de Curitiba-PR, doado pela Empresa 2AT Engenharia. A escolha desse tipo de cimento se deu pelo grau de pureza semelhante ao CP I com a finalidade de não ter influência em qualquer processo de mitigação da Reação Álcali Agregado, como visto no tópico 2.4.4. A caracterização físico/química do cimento é descrita nas Tabelas 3 e 4, disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 3 – Propriedades físicas do cimento CPV-ARI

Propriedades físicas	Valor	
Superfície específica - Blaine (cm ² /g)	4.400	
Tempo de pega	Início (min)	180
	Fim (min)	240
Finura na peneira #200 (%)	0,10	
Finura na peneira #325 (%)	0,80	
Consistência normal (%)		29,4
	1 dia	23,0
	3 dias	37,1
	7 dias	43,2
	28 dias	52,3
Resistência à Compressão (MPa)		

Fonte: Fabricante.

Tabela 4 – Propriedades químicas do cimento CPV-ARI

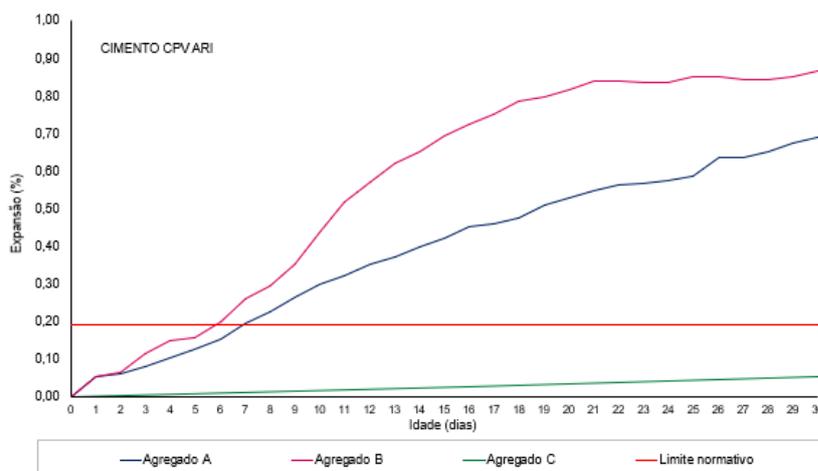
Composto	Concentração (%)
Al ₂ O ₂	4,35
SiO ₂	18,88
Fe ₂ O ₃	2,93
CaO	62,9
MgO	3,00
SO ₃	2,76
Perda ao Fogo	3,64
CaO livre	1,15
Resíduo insolúvel	0,85
Equivalente alcalino	0,71

Fonte: Fabricante.

3.1.2 Agregados

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados três agregados distintos obtidos de diferentes cidades do Rio Grande do Sul. Os agregados nomeados como "Agregado A" e "Agregado B" são areias de brita basáltica, provenientes da região de Alegrete-RS e de Quaraí - RS, respectivamente. Ambos os agregados, foram caracterizados por Dutra (2018), como potencialmente reativos frente ao uso de Cimento Portland CPV-ARI, conforme apresentado na Figura 9. Para a referência, utilizou-se um agregado também classificado por Dutra (2018) como potencialmente inócuo, sendo esse Areia natural do Rio Tietê como Agregado C. Portanto utilizou-se apenas 3 agregados dentre os demais presentes nos estudos do autor.

Figura 9 – Expansão das barras de argamassa em função do tempo para os Agregados com o cimento Portland CPV-ARI.



Fonte: Adaptado de Dutra (2018, p. 41)

A granulometria e a quantidade em massa de agregado a ser utilizada no traço está indicada na Tabela 6 do item 3.2.1. Os agregados utilizados no estudo podem ser observados na Figura 10. Pode ser observada a diferença entre os agregados, sendo os dois primeiros areias de brita e o terceiro areia natural.

Figura 10 – Agregados a serem utilizados no trabalho.



Fonte: Adaptado de Dutra (2018, p. 36)

(a) Agregado de areia de brita de Alegrete - Agregado A; (b) Agregado de areia de brita de Quaraí - Agregado B; (c) Agregado de areia natural do rio Tietê - Agregado C.

3.1.3 Aditivo Cristalizante

O aditivo empregado no traço da argamassa como adição em massa de cimento se trata de um aditivo em pó do tipo cristalizante Penetron Admix, utilizado para promover a autocura de concretos. Os seus componentes, disponibilizados pelo fabricante encontram-se na Tabela 5.

O aditivo cristalizante utilizado pode ser observado na Figura 11.

Tabela 5 – Caracterização química do aditivo cristalizante.

Substância química	Concentração (% em massa)
Cimento Portland	65 a 80
CTS - 15 - 1* (Segredo industrial)	10 a 30
CTS - 15 - 2* (Segredo industrial)	5 a 10
Hidróxido de cálcio e magnésio	1,5 a 6
Óxido de hidróxido de magnésio e cálcio	1,5 a 6
Hidróxido de cálcio	1 a 2

Fonte: Fabricante.

Figura 11 – Aditivo cristalizante utilizado no presente estudo.



Fonte: Elaboração própria.

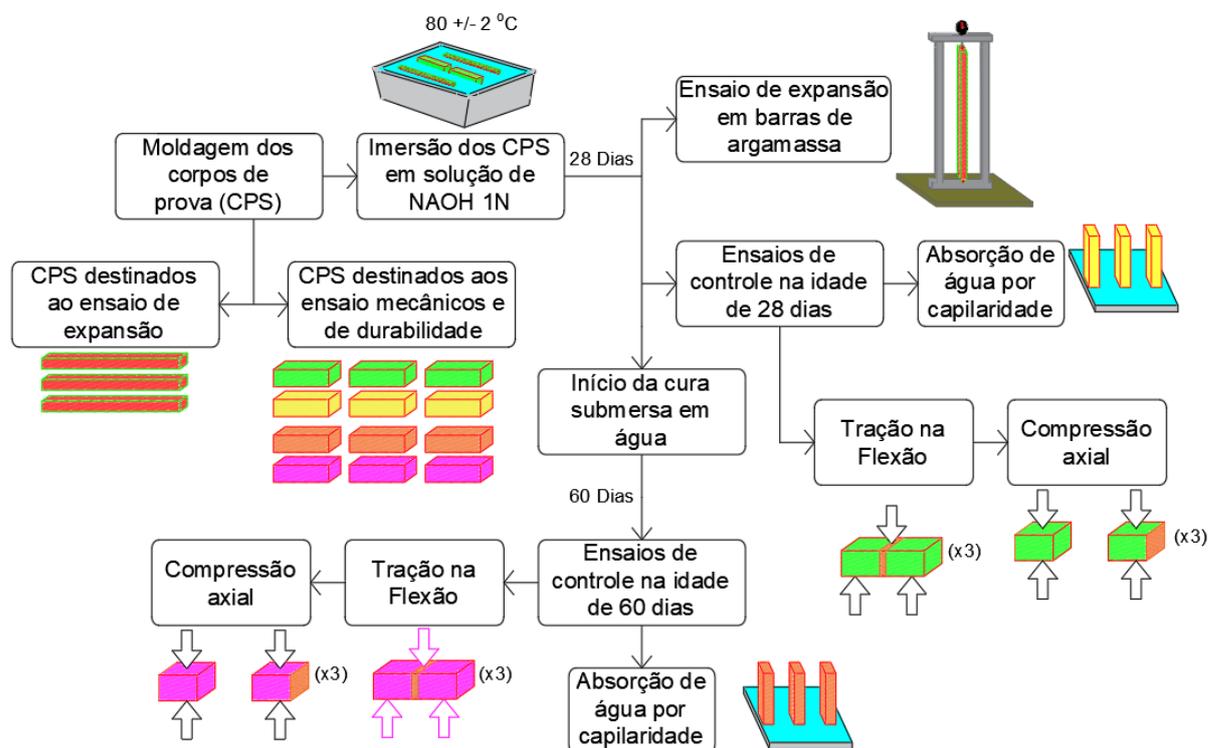
3.2 Programa Experimental

O programa experimental deste trabalho foi elaborado para estudar o efeito de um aditivo cristalizante nas propriedades mecânicas (f_c e f_t) e de absorção de água por capilaridade de argamassas microfissuradas pela ação da RAA em ensaio acelerado. A metodologia está organizada em quatro etapas distintas: Escolha, aquisição e preparação dos materiais; Produção dos corpos de prova; Realização dos ensaios e Obtenção de imagens e resultados. Os procedimentos realizados estão descritos nos itens 3.2.1 a 3.2.4.

Para a presente pesquisa optou-se pela moldagem de barras de argamassa pois o ensaio para o ensaio em concreto houve a limitação do tempo de graduação, já que o ensaio utilizado é o ensaio lento em prismas de concreto e conforme comentado no tópico 2.3.2 a RAA acontece de maneira lenta.

Os passos tomados para a execução desse programa experimental foram configurados conforme a Figura 12.

Figura 12 – Organograma ilustrativo das Etapas 2 e 3 realizadas por traço de argamassa.



Fonte: Elaboração própria.

A realização da Etapa 2 foi compreendida pela moldagem de dois modelos de Corpos de Prova (CPs) conforme o traço definido pela norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018) (descrito no item 3.2.1). O modelo -I - com dimensão de 25mm x 25mm x 285mm foi destinado ao ensaio acelerado de expansão da RAA e o modelo-II - com dimensão de 40mm x 40mm x 160mm foi destinado aos ensaios mecânicos e de durabilidade. 48 horas após a moldagem todos os corpos de prova foram imersos em solução básica de NaOH 1N a uma temperatura controlada de 80 ± 2 graus Célsius, o modelo I permaneceu em submersão até a idade de 30 dias, enquanto o modelo II foi retirado aos 28 dias para realização dos ensaios mecânicos e de durabilidade. Essa etapa de imersão das amostras em NaOH 1N teve por objetivo favorecer a microfissuração das argamassas pelo desenvolvimento das reações aceleradas de RAA. No decorrer desse intervalo, dando início a Etapa 3, os corpos de prova do modelo I (destinados ao ensaio de expansão) foram monitorados quanto a sua variação dimensional de 2 em 2 até a idade de 30 dias.

Após o período de imersão de 28 dias, as amostras do modelo -II foram resfriadas ao ar ambiente por um período de 8 horas. Na sequência, as barras de argamassa destinadas aos ensaios mecânicos e de durabilidade foram divididas em dois grupos. Um dos grupos foi ensaiado nas idades de 28 dias (grupo 1) e o outro grupo na idade de 60 dias (grupo 2). Metade dos corpos de prova do grupo 1 passaram pelo ensaio de absorção por capilaridade, enquanto a outra metade por ensaios de tração na flexão

e compressão axial. O grupo 2 passou pelos mesmos processos, porém durante o período de 28 dias a 60 dias, os corpos de prova permaneceram em cura submersa em água em temperatura ambiente, finalizando a Etapa 3. A inserção das amostras para a cura submersa permitiu avaliar se em maiores idades o aditivo cristalizante atuou de forma eficiente na minimização dos danos gerados pela fissuração ocasionada pela RAA.

Os processos descritos no organograma estão percorridos nos itens 3.2.1 a 3.2.3.

3.2.1 Produção das Argamassas

Foram produzidas argamassas para os dois modelos de barras citados no item 3.2, como é indicado na Figura 12, destinados a diferentes ensaios. A composição granulométrica dos agregados do traço, formada por 5 granulometrias totalizando 990g, pode ser observado na Tabela 6. A quantidade de Cimento Portland é porcionada de 1 parte para 2,25 partes de agregado, resultando em uma massa de cimento de 440g, a relação água cimento (a/c) é de 0,47 (206,8g de água destilada ou deionizada). Portanto o traço da argamassa utilizado para a realização desse trabalho é 1:2,25 a/c 0,47. O traço é estipulado pela norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

Tabela 6 – Composição granulométrica dos agregados para barras de argamassa segundo NBR 15577-4.

Peneira com abertura de malha (ABNT NM ISO 3310-1:2010)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75mm	2,36mm	10	99,0
2,36mm	1,18mm	25	247,5
1,18mm	600 μ m	25	247,5
600 μ m	300 μ m	25	247,5
300 μ m	150 μ m	15	148,5

Fonte: NBR 15577-4 (ABNT, 2018, p.7)

O modelo I, conforme já apresentado na seção 3.2, é caracterizado por barras de argamassa com seção transversal quadrada de 25mm \pm 0,7mm e 285mm de comprimento, com comprimento efetivo de leitura de 250mm \pm 2,5mm ocasionado pelos pinos metálicos localizados nas extremidades das barras de argamassa cuja presença possibilita a medição das barras. Esse modelo passou pelo ensaio de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado de RAA, previsto pela norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018). O modelo II é caracterizado por barras de argamassa com seção transversal quadrada de 40mm \pm 0,4mm, com comprimento de 160mm \pm 0,8mm. Esse modelo passou pelos ensaios de absorção de água por capilaridade regido pela NBR 9779 (ABNT, 2012), ruptura por tração na flexão e ruptura por compressão axial, regidos pela NBR 13279 (ABNT, 2005).

Para a produção das argamassas, separou-se previamente os agregados, o Cimento Portland com o aditivo cristalizante adicionado a 2% da massa do cimento e a água nas frações corretas. Os materiais podem ser observados na Figura 13.

Figura 13 – Materiais utilizados para a moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Elaboração própria.

O processo de produção das argamassas está ilustrado por meio da Figura 14.

Figura 14 – Produção de argamassa segundo a norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018).



Fonte: Elaboração própria.

(1) Adição da água no recipiente; (2) Mistura da pasta de água e cimento; (3) Adição dos agregados em processo de mistura lenta; (4) Mistura rápida da argamassa; (5) Processo de descanso da argamassa; (6) Último processo de mistura da argamassa.

Portanto foram produzidas três misturas de argamassa correspondentes aos três tipos de agregado utilizados na pesquisa. A Mistura A-1, a Mistura B-2 e a Mistura C-3 produzidas a partir dos agregados A, B e C respectivamente. Todas as misturas

foram produzidas com o traço 1:2,25 e adição de 2% de aditivo cristalizante com base na massa de Cimento Portland. As argamassas produzidas podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Misturas produzidas para os ensaios do programa experimental.

Nome da Mistura	Agregado Utilizado
Mistura A-1	Agregado A
Mistura B-2	Agregado B
Mistura C-3	Agregado C

Fonte: Elaboração Própria.

3.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Após a produção das argamassas, realizou-se a moldagem dos corpos de prova do modelo I seguindo os passos da norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018), respeitando os processos de preparo dos agregados, seleção e preparo do cimento-padrão, dosagem da argamassa, mistura da argamassa, moldagem das barras de argamassa e cura inicial. Foram moldadas 3 barras de argamassa para cada um dos agregados, totalizando 9 corpos de prova. O processo de moldagem pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Produção de argamassa modelo I segundo a norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018).



Fonte: Elaboração própria.

- (1) Adição da argamassa no molde; (2) Adensamento da primeira camada; (3) Adensamento da segunda camada; (4) Moldagem finalizada.

A moldagem dos corpos de prova do modelo II se deu de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), respeitando os processos de preparo dos moldes, preparo das argamassas, e moldagem dos corpos de prova. Foram moldadas 6 barras de argamassa por idade de ensaio para cada um dos agregados, totalizando 12 corpos de prova por ensaio para cada um dos três agregados. O processo de moldagem pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Produção de argamassa modelo II segundo a norma NBR 13279 (ABNT, 2005)



Fonte: Elaboração própria.

(1) Adição da primeira camada de argamassa no molde; (2) Adensamento da primeira camada; (3) Adição da segunda camada de argamassa no molde; (4) Adensamento da segunda camada / Moldagem finalizada.

Ao todo foram moldados 45 corpos de prova entre modelos I e II, passando por um processo de cura em ambiente de câmara úmida por 48 horas. Os corpos de prova em estágio de cura podem ser observados na Figura 17.

Figura 17 – Barras de argamassa passando por processo de cura em câmara umida.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.3 Ensaios de controle

Os ensaios de controle deste trabalho foram efetuados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC), situado na Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete. Neste tópico serão abordados detalhadamente os ensaios realizados neste trabalho.

3.2.3.1 Ensaio acelerado de RAA e indução de microfissuras por RAA

Como mostrado na Figura 12, a primeira etapa prevista por norma foi executada com os dois modelos de barras de argamassa, e consistiu na imersão total das barras em uma solução básica de NaOH ($1 \pm 0,1$)N com temperatura de $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$. A execução da primeira etapa pode ser observada na Figura 18.

Para as barras de modelo I (Figura 18(a)) a solução de NaOH a 80C foi utilizada para a realização do ensaio acelerado de reação álcali-agregado de acordo com a norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

Figura 18 – Imersão das barras de argamassa em Solução básica de NaOH



Fonte: Elaboração Própria.

(a) Barras modelo I imersas em Solução para ensaio acelerado; (b) Barras modelo II imersas em solução para indução de microfissuras por RAA.

A segunda etapa do ensaio acelerado de RAA para as barras de modelo I se caracterizou pela realização de leituras de comprimento a partir de um pino padrão localizado em ambas extremidades dos corpos de prova. As leituras ocorreram em intervalos de 2 dias durante 30 dias. Para a realização das leituras foram retirados, um de cada vez, da solução, efetuada a leitura e retornados para a solução. A execução de leituras de expansão pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 – Realização de leituras do ensaio de expansão em barras de argamassa.



Fonte: Elaboração própria

As barras do modelo II permaneceram em imersão até a idade de 28 dias (Figura 18(B)), quando foram retiradas da solução, e resfriadas ao ar ambiente. Metade dos corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias e a outra metade foi acondicionada em cura submersa até a idade de 60 dias.

3.2.3.2 Ensaio de Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade decorreu em 3 corpos de prova por traço, nas idades de 28 e 60 dias, como indicado na Figura 12. Seguindo os moldes da norma NBR 9779 (ABNT, 2012), porém utilizadas barras de argamassa modelo II para sua realização. O ensaio consistiu na imersão parcial dos corpos de prova em água com nível constante de (5 ± 1) mm, medindo as massas dos CPs nas seguintes condições: secos previamente em estufa, após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h de exposição à água. A execução do ensaio pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 – Realização do ensaio absorção de água por capilaridade.



Fonte: Elaboração própria

3.2.3.3 Ensaio de tração na flexão

O ensaio de tração na flexão ocorreu nos 3 corpos de prova do modelo II restantes por traço, nas idades de 28 e 60 dias, como indicado na Figura 12, respeitando as tolerâncias de ensaio e seguiu os moldes da norma NBR 13279 (ABNT, 2005). A execução do ensaio pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 – Realização do ensaio de ruptura por tração na flexão.



Fonte: Elaboração própria

A realização do ensaio de tração na flexão se deu por meio da ruptura dos corpos de prova através da prensa EMIC GR048, aplicando uma carga de (50 ± 10) N/s.

3.2.3.4 Ensaio de compressão axial

Após realizado o ensaio de tração na flexão, a barra de argamassa rompeu-se gerando duas metades, em sequência utilizadas para a determinação da resistência à compressão axial da argamassa (Figura 12). A execução do ensaio pode ser observada na Figura 22.

Figura 22 – Realização do ensaio de ruptura por tração na flexão.



Fonte: Elaboração própria

A realização do ensaio de compressão axial se deu por meio da ruptura dos corpos de prova através da prensa EMIC GR048, aplicando uma carga de (500 ± 50) N/s.

3.2.4 Obtenção/compilação de resultados e imagens

Os resultados dos ensaios realizados têm a similaridade da variação com o tempo, pois dependem dele para o desencadeamento da reação do aditivo cristalizante na minimização do dano ocasionado pela Reação Álcali-Agregado.

Para o ensaio de expansão em barras de argamassa, as leituras de expansão nas barras obtidas estão plotadas no gráfico de expansão versus idade, exposto na Figura 23. Um agregado é considerado reativo quando ultrapassa o limite normativo. Os cálculos foram realizados de acordo com a norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

Para o ensaio de absorção por capilaridade, através das massas registradas nos tempos previstos, foi calculado um índice C que representa a absorção de água por capilaridade, expressa na unidade de grama por centímetro quadrado (g/cm^2). Os cálculos foram realizados de acordo com a norma NBR 9779 (ABNT, 2012).

Para o ensaio de tração na flexão, o resultado se deu seguindo a equação da norma NBR 13279 (ABNT, 2005), que relaciona a carga aplicada à barra com a distância entre os apoios, resultando um valor na medida de megapascal (MPa).

Para o ensaio de compressão axial o resultado se deu seguindo a equação da norma NBR 13279 (ABNT, 2005), que relaciona a carga aplicada à barra com a área da seção comprimida da barra, resultando um valor na medida de megapascal (MPa).

Para a comparação dos resultados obtidos, foram realizadas duas análises estatísticas distintas, a ANOVA com fator único, que analisa uma única variável em função de uma média e verifica se há então diferença significativa entre o valor encontrado e o valor da média, e o Teste de Duncan, que compara amplitudes de um conjunto de médias calculadas à uma amplitude mínima calculada. Portanto os dois testes analisam parâmetros diferentes.

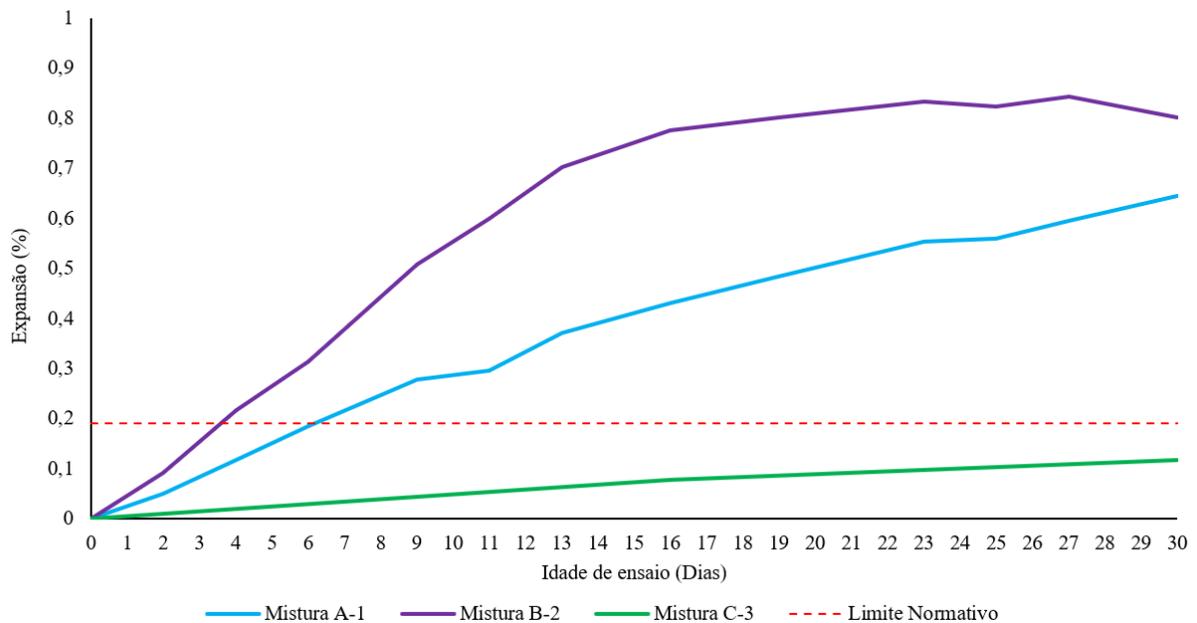
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos com a realização dos ensaios apresentados no tópico 3.2.3.

4.1 Ensaio acelerado de RAA

Conforme abordado no tópico 3.2.3.1, o ensaio acelerado de RAA ocorreu em sua totalidade (etapas 1 e 2) nas barras de argamassa modelo I. Como resultado do ensaio, regulamentado pela norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018), obteve-se o gráfico expresso na Figura 23, com eixo X referente aos dias de leitura e eixo Y referente à porcentagem de expansão com base no tamanho inicial da barra.

Figura 23 – Resultados médios do ensaio de expansão em barras de argamassa Modelo I.



Fonte: Elaboração própria

Onde as Misturas A-1, B-2 e C-3 foram produzidas com diferentes agregados (conforme a tabela 7).

Analisando o gráfico da Figura 23, os resultados obtidos foram dentro do esperado com relação a reatividade dos agregados, já caracterizados previamente por Dutra (2018). Os agregados A e B confirmaram ser potencialmente reativos e o agregado C potencialmente inócuo frente ao uso de cimento CP-V ARI, conforme já comentado no tópico 3.1.2. Além disso, pode-se observar na Figura 23, referente à Mistura B-2, uma queda na expansão nas últimas idades, isso pode ser explicado devido às deformações

sofridas pelas barras (encurtamento), condição que acabou refletindo nas leituras. Essa deformação pode ser observada na Figura 24.

Figura 24 – Deformação em barra de argamassa Modelo I confeccionada com a Mistura B-2 após o ensaio acelerado de RAA.



Fonte: Elaboração própria

Além da expansão, como previsto, ocorreu microfissuração nas barras moldadas com as Misturas A-1 e B-2. As microfissuras foram identificadas nas barras de argamassa produzidas com a Mistura A-1 na idade de 14 dias de ensaio acelerado. Para os corpos de prova moldados com a Mistura B-2, a identificação foi mais precoce, com as microfissuras sendo visualizadas na idade de 06 dias de ensaio. Os corpos de prova moldados com a Mistura C-3 não apresentaram microfissuras. As barras microfissuradas, bem como a evolução das microfissuras podem ser observadas nas Figuras 25 e 26, tratando das Misturas A-1 e B-2 respectivamente.

Figura 25 – Microfissuras aparentes em barras de argamassa Modelo I - Mistura A-1.



Fonte: Elaboração Própria.

(a) Microfissura aos 14 dias; (b) Microfissuras aos 30 dias.

Figura 26 – Microfissuras aparentes em barras de argamassa Modelo I - Mistura B-2.



Fonte: Elaboração Própria.

(a) Microfissura aos 06 dias; (b) Microfissuras aos 30 dias.

É representado na Figura 27 um corpo de prova produzido com a Mistura C-3, sem a presença de microfissuração. A imagem reforça a não reatividade do Agregado C, corroborando com os resultados de Dutra (2018).

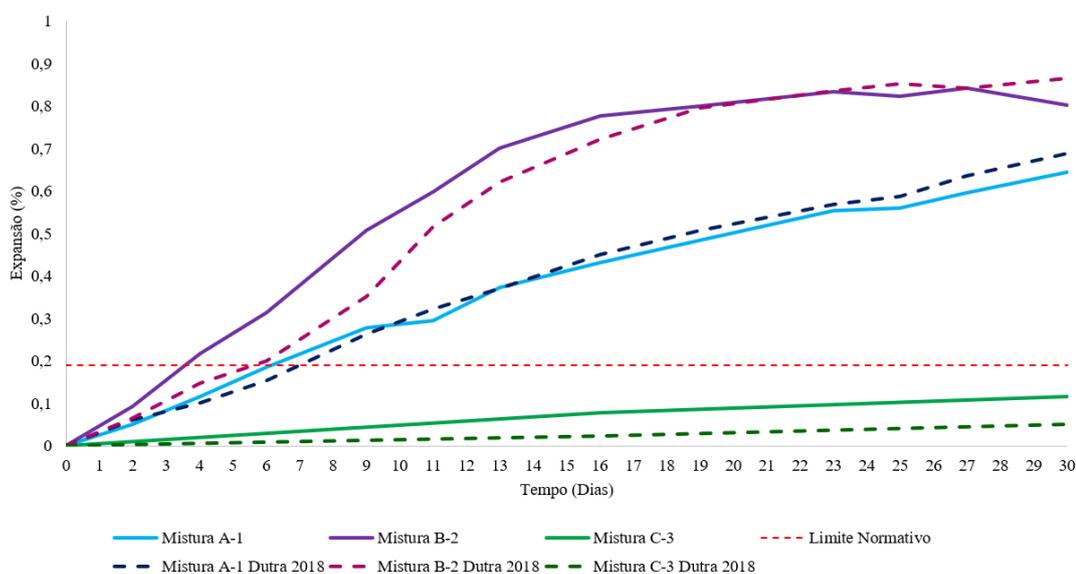
Figura 27 – Barra de argamassa Modelo I - Mistura C-3 sem a presença de microfissuras.



Fonte: Elaboração Própria.

Ainda, como indicado no programa experimental (tópico 3.2), foram comparados os resultados de Dutra (2018) aos resultados obtidos nesse estudo, a fim de avaliar a influência da presença do aditivo cristalizante no desencadeamento reação álcali-agregado. O gráfico de comparação entre os resultados está representado na Figura 28.

Figura 28 – Comparação de resultados de expansão em barras de argamassa.



Fonte: Elaboração própria

Com base no gráfico (Figura 28), são observados comportamentos distintos para as três misturas investigadas neste estudo (traços com aditivo cristalizante) em comparação às misturas sem aditivo cristalizante estudadas por Dutra (2018).

- A Mistura A-1 apresentou pouca diferença entre o traço sem aditivo e o traço com aditivo cristalizante, uma vez que as curvas de expansão estão próximas da sobreposição. Para Dutra (2018), a mistura produzida com o Agregado 1 atingiu o limite normativo de expansão na idade de 7 dias de ensaio. Nesta pesquisa, a Mistura A-1 atingiu o limite normativo na idade de 6 dias de ensaio, caracterizando a reatividade do agregado aproximadamente na mesma idade determinada por Dutra (2018) para a mistura sem aditivo cristalizante.
- A Mistura B-2 apresentou uma maior influência do aditivo nas primeiras idades de ensaio, uma vez que podemos observar no gráfico da Figura 28 uma curva mais inclinada, indicando uma taxa de expansão superior ao traço sem aditivo. Porém a partir da idade de 15 dias a inclinação diminuiu, indicando estabilidade na expansão das barras. Para Dutra (2018), a mistura produzida com o Agregado 2 atingiu o limite normativo aos 6 dias de ensaio. Para a Mistura B-2 o mesmo limite foi atingido aos 4 dias de ensaio, mostrando uma taxa de expansão inicial mais elevada para o traço contendo o aditivo cristalizante em comparação ao traço sem o uso do aditivo.
- A Mistura C-3 apresentou ação do aditivo cristalizante na expansão das barras durante todo o período de ensaio, finalizando com valores pouco mais de 2 vezes superiores comparados aos do traço sem o aditivo. Porém apesar da maior

expansão em relação à referência sem aditivo cristalizante, a mistura com o agregado C foi a única que permaneceu inócua ao final do ensaio acelerado de RAA, corroborando com os resultados obtidos por Dutra (2018).

Os resultados podem ter sofrido influência das condições de ensaio, onde não foram executados em uma sala com umidade e temperatura controlados.

Um comparativo entre os resultados estudados pode ser observado na Tabela 8, analisando as idades recomendadas pela norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

Tabela 8 – Resultados médios de expansão em barras de argamassa nas idades de 16 e 30 dias.

Mistura	16 Dias	30 Dias
Mistura A-1	0,432%	0,644%
Mistura A-1 Dutra (2018)	0,452%	0,689%
Mistura B-2	0,777%	0,801%
Mistura B-2 Dutra (2018)	0,723%	0,865%
Mistura C-3	0,079%	0,117%
Mistura C-3 Dutra (2018)	0,024%	0,051%

Fonte: Elaboração própria.

Analisando os dados presentes na Tabela 8, é observada uma proximidade entre os resultados encontrados nesse estudo e nos estudos de Dutra (2018), indicando pouca influência da presença de aditivo cristalizante nos traços na expansão causada pela reação álcali-agregado pelo ensaio acelerado. Isso é um bom indicativo no uso desse tipo de aditivo frente à agregados potencialmente reativos com relação a RAA, devido ao fato de que mesmo que ocorra mais rapidamente em alguns casos (Mistura B-2), com o passar do tempo a taxa de expansão tende a se estabilizar tanto sem a presença do aditivo cristalizante, como com sua presença, mostrando que a composição do aditivo cristalizante parece não afetar negativamente a fissuração causada pela RAA.

4.2 Microfissuras induzidas por ação química - RAA

Em paralelo ao ensaio de expansão em barras de argamassa no modelo I, as barras do modelo II, conforme o tópico 3.2.3.1, passaram pela primeira etapa do ensaio acelerado de RAA, a fim de provocar microfissuração nas barras proporcionando a atuação do aditivo cristalizante.

As microfissuras ocasionadas pela primeira etapa do ensaio acelerado de RAA foram localizadas nos corpos de prova moldados com as Misturas A-1 e B-2. Os corpos de prova produzidos com a Mistura C-3 não apresentaram microfissuras. A situação das barras de argamassa ensaiadas podem ser observadas nas Figuras 29, 30 e 31.

Figura 29 – Barra de argamassa modelo II pós ensaio acelerado de RAA - Mistura A-1.



Fonte: Elaboração Própria.
(a) Face longitudinal; (b) Face Transversal.

Figura 30 – Barra de argamassa modelo II pós ensaio acelerado de RAA - Mistura B-2.



Fonte: Elaboração Própria.
(a) Face longitudinal; (b) Face Transversal.

Figura 31 – Barra de argamassa modelo II pós ensaio acelerado de RAA - Mistura C-3.



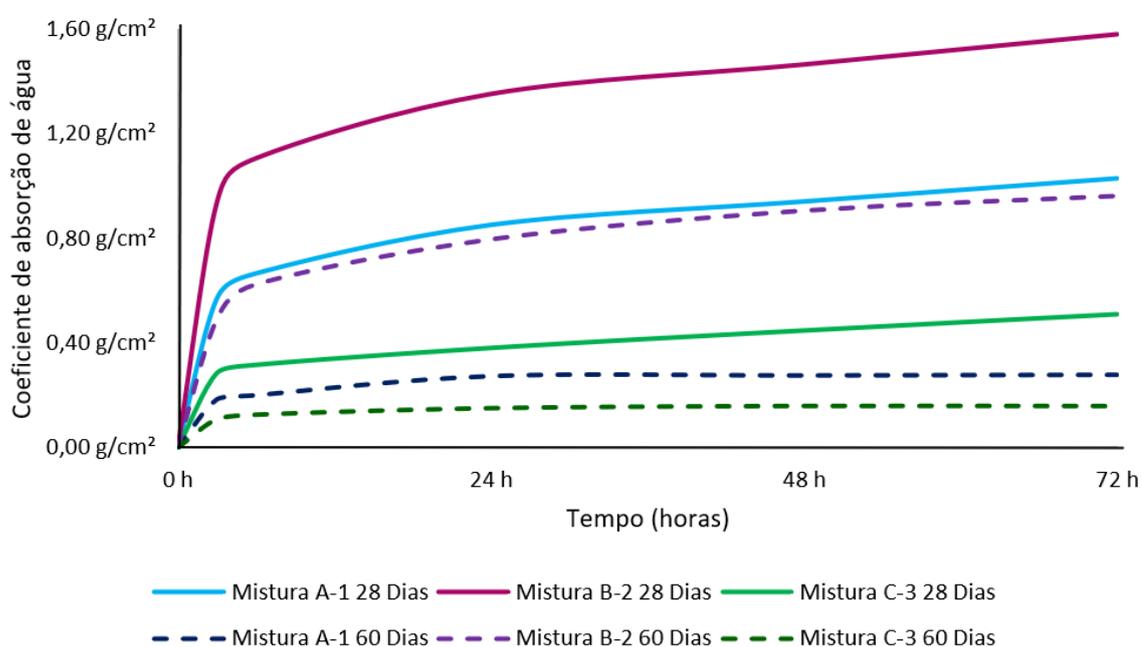
Fonte: Elaboração Própria.
(a) Face longitudinal; (b) Face Transversal.

Os corpos de prova de modelo II microfissurados pela ação química foram destinados a ensaios mecânicos e de durabilidade conforme exposto no tópico 3.2

4.3 Ensaio de Absorção de água por capilaridade

Seguindo conforme apresentado no tópico 3.2.3.2, o ensaio de absorção de água por capilaridade ocorreu em três corpos de prova do modelo II por idade (28 e 60 dias) para cada mistura. O resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade está representado nos gráficos das Figuras 32 e 34. É apresentado na Figura 32 o gráfico da variação da absorção no tempo, e na Figura 34 é exposto o gráfico do comparativo de coeficientes de absorção de água por capilaridade após 72 horas de ensaio.

Figura 32 – Resultado médio do ensaio de absorção de água por capilaridade (1/2).



Fonte: Elaboração Própria.

Vale ressaltar uma pequena queda na absorção da Mistura A-1 60 Dias no período de 48h até 72h, isso pode ser explicado devido à uma pequena perda de massa oriunda da queda de cristais de hidróxido de sódio que se formaram na superfície dos corpos de prova durante o ensaio de absorção de água por capilaridade. Esses cristais foram retirados da amostra durante a etapa de secagem da superfície da amostra. Os cristais podem ser observados na Figura 33.

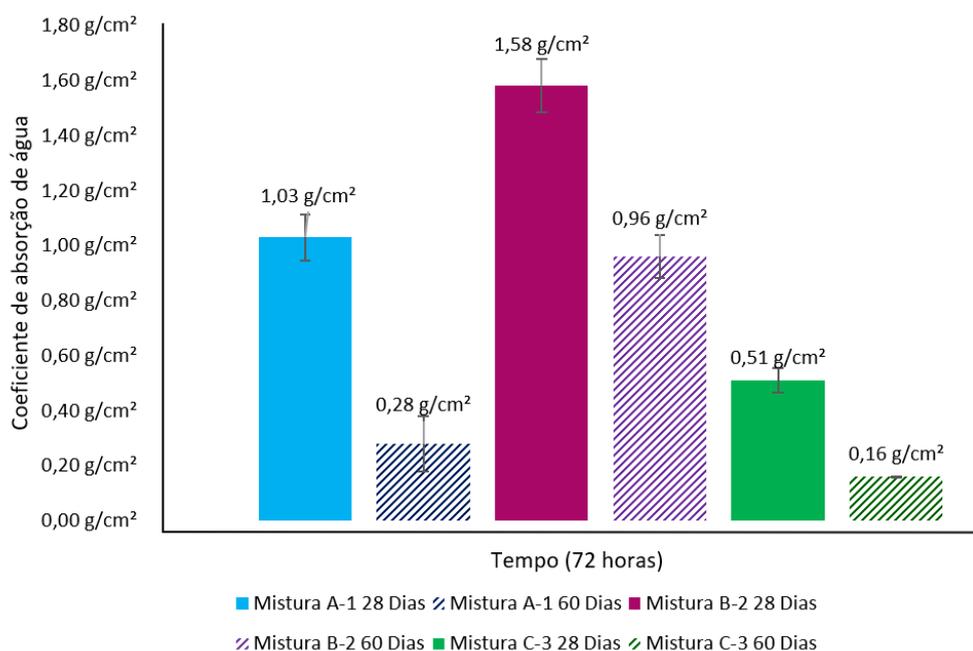
O fenômeno ocorreu nas barras de argamassa moldadas com as três misturas, o que pode indicar uma leve interferência nos resultados de pesagem das barras de argamassa para a realização do ensaio.

Figura 33 – Formação de cristais de hidróxido de sódio na superfície dos corpos de prova em ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 34 – Resultado médio do ensaio de absorção de água por capilaridade (2/2).



Fonte: Elaboração Própria.

Com base nos resultados observados nas Figuras 32 e 34 nota-se uma diminuição da absorção de água por capilaridade dos corpos de prova ensaiados em todas as três misturas comparando os valores obtidos aos 28 dias e aos 60 dias.

Comparando os valores de absorção de água nas idades de 28 e 60 dias obteve-se uma diminuição de 72,81% para as barras de argamassa moldadas com a Mistura A-1, uma diminuição de 39,24% nos corpos de prova produzidos com a Mistura B-2 e uma diminuição de 68,62% nas barras produzidas com a Mistura C-3.

Para um melhor entendimento da influência do tempo (idade de ensaio) na absorção de água das argamassa investigadas foi realizada uma análise ANOVA de um único fator. A análise ANOVA de um único fator é uma análise de variância realizada para verificar se há diferença significativa entre os valores médios analisados de até três populações distintas.

A fim de comprovar a significância dos resultados médios obtidos comparando os valores nas idades de 28 dias e de 60 dias foi efetuada a análise de variância (ANOVA) de um único fator. A variável independente analisada (neste estudo - "Idade de Ensaio") é considerada significativa (com influencia no resultado de absorção de água), quando o valor de (P) da análise for inferior a 0,05. É mostrado nas Tabelas 9, 10 e 11 os resultados obtidos, indicando que a idade de ensaio é considerada significativa. Ou seja, a ação do tempo no aditivo cristalizante atuou de forma importante na diminuição de absorção de água por capilaridade.

Tabela 9 – ANOVA-Fator único - Mistura A-1

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	P
Intercepto	2,570058	1	2,570058	281,8533	0,000074
Idade de ensaio	0,846095	1	0,846095	92,7896	0,000649
Erro	0,036474	4	0,009118	-	-

Onde: SQ - Soma dos Quadrados, GL - Grau de Liberdade, MQ - Médias Quadradas, P - Significância.
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10 – ANOVA-Fator único - Mistura B-2

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	P
Intercepto	9,653602	1	9,653602	615,6476	0,000016
Idade de ensaio	0,571574	1	0,571574	36,4515	0,003795
Erro	0,062722	4	0,015680	-	-

Onde: SQ - Soma dos Quadrados, GL - Grau de Liberdade, MQ - Médias Quadradas, P - Significância.
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 11 – ANOVA-Fator único - Mistura C-3

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	P
Intercepto	0,691901	1	0,691901	390,7206	0,000039
Idade de ensaio	0,183750	1	0,183750	103,7647	0,000523
Erro	0,007083	4	0,001771	-	-

Onde: SQ - Soma dos Quadrados, GL - Grau de Liberdade, MQ - Médias Quadradas, P - Significância.
Fonte: Elaboração própria.

Além da ANOVA, para obter um outro comparativo dos resultados dependentes da idade de ensaio, foi realizado o Teste de Duncan, que é caracterizado pela análise comparativa à uma amplitude mínima significativa calculada, onde os resultados médios que excedem esse valor são considerados significativos. O valor de amplitude mínima significativa calculada pode ser considerado de 0,05. Os dados da análise feita pelo Teste de Duncan podem ser observados na Tabela 12, onde os resultados foram adaptados apenas à comparação para corpos de prova moldados com a mesma Mistura nas diferentes idades de ensaio.

Tabela 12 – Teste de Duncan

Mistura	Idade	A-1 28 Dias	A-1 60 Dias	B-2 28 Dias	B-2 60 Dias	C-3 28 Dias	C-3 60 Dias
A-1	28 Dias	-	0,000067	-	-	-	-
A-1	60 Dias	0,000067	-	-	-	-	-
B-2	28 Dias	-	-	-	0,000097	-	-
B-2	60 Dias	-	-	0,000097	-	-	-
C-3	28 Dias	-	-	-	-	-	0,000936
C-3	60 Dias	-	-	-	-	0,000936	-

Fonte: Elaboração própria.

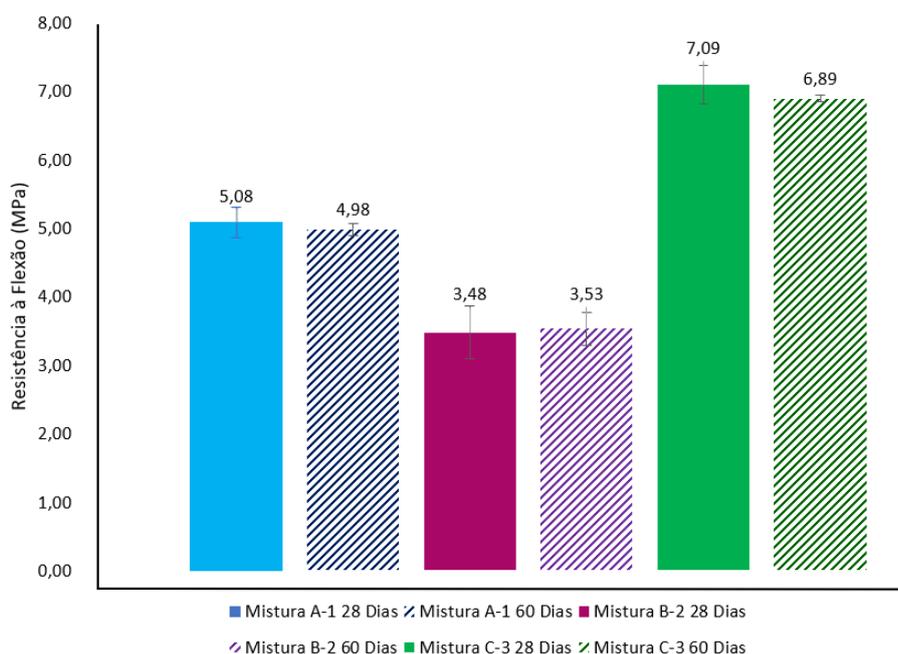
Ao observar os valores de P das Tabelas 9, 10 e 11 nota-se valores inferiores à 0,05 para as três misturas estudadas, assim como para o Teste de Duncan (Tabela 12), o que demonstra significância nos resultados obtidos através do ensaio de absorção de água por capilaridade, assinalando assim uma ação positiva do tempo em relação ao aditivo cristalizante em corpos de prova, contendo e não contendo fissuras.

Os resultados encontrados indicam que em uma situação de manifestação de RAA, o passar do tempo, em corpos cimentícios com o uso de aditivos cristalizantes, tem potencial para minimizar o ataque e promover uma melhora na vida útil de elementos de concreto afetados pela RAA. Os resultados desta pesquisa mostraram que o tempo atuou de forma positiva para o desempenho do aditivo cristalizante, uma vez que reduziu consideravelmente a percolação de água dentro dos capilares dos corpos de prova ensaiados comparando os resultados aos 28 e aos 60 dias, minimizando a ação de um dos elementos essenciais para a ocorrência da RAA, conforme visto no tópico 2.4.3.

4.4 Ensaio de Tração na flexão

Como visto no tópico 3.2.3.3, o ensaio de tração na flexão ocorreu em três corpos de prova modelo II por idade (28 e 60 dias) para cada mistura. Os resultados médios do ensaio de Tração na flexão estão representados no gráfico da Figura 35. Nele se encontram lado a lado os valores obtidos nos ensaios efetuados para cada mistura nas idades de 28 e 60 dias.

Figura 35 – Resultado médio do ensaio de tração na flexão.



Fonte: Elaboração Própria.

Os valores de resistência à tração encontram-se na Tabela 13, junto com seus respectivos desvios padrão.

Ao comparar os resultados de resistência à tração obtidos aos 28 dias e aos 60, para a mistura A-1 houve um decréscimo de 2,08%, para a mistura B-2 houve um aumento de 1,53% e para a Mistura C-3 houve um decréscimo de 2,83%, e , mostrando resultados não significativos.

Tabela 13 – Resultados médios do ensaio de tração na flexão aos 28 e 60 dias.

Mistura	28 Dias		60 Dias	
	Resistência	Desvio Padrão	Resistência	Desvio Padrão
Mistura A-1	5,08 MPa	0,23	4,98 MPa	0,09
Mistura B-2	3,48 MPa	0,38	3,53 MPa	0,24
Mistura C-3	7,09 MPa	0,27	6,89 MPa	0,05

Fonte: Elaboração própria.

Analisando os resultados expressos na Figura 35 e na Tabela 13 pode-se notar uma leve variação da resistência à tração dos corpos de prova, onde para as misturas A-1 e C-3 houve uma queda de resistência e para a mistura B-2 houve um acréscimo, mostrando uma tendência de manutenção na resistência à tração das argamassas ensaiadas. Além disso, houve uma queda nos desvios padrão das amostras, mostrando uma menor variação dos valores obtidos. Essa constância nos resultados de resistência à tração dos corpos de prova podem ser confirmadas por meio da realização de ANOVA com fator único, que mostrou a não significância da idade de ensaio no ganho/perda de

resistência das argamassas. Os resultados da análise estatística estão representados nas Tabelas 18, 19 e 20 no Anexo A.

Nas análises ANOVA (Anexo A) pode-se observar um valor de "p" maior que 0,05 para a variável "idade de ensaio" nas três misturas, indicando que esta variável não apresenta influência significativa nos resultados de resistência à tração obtidos.

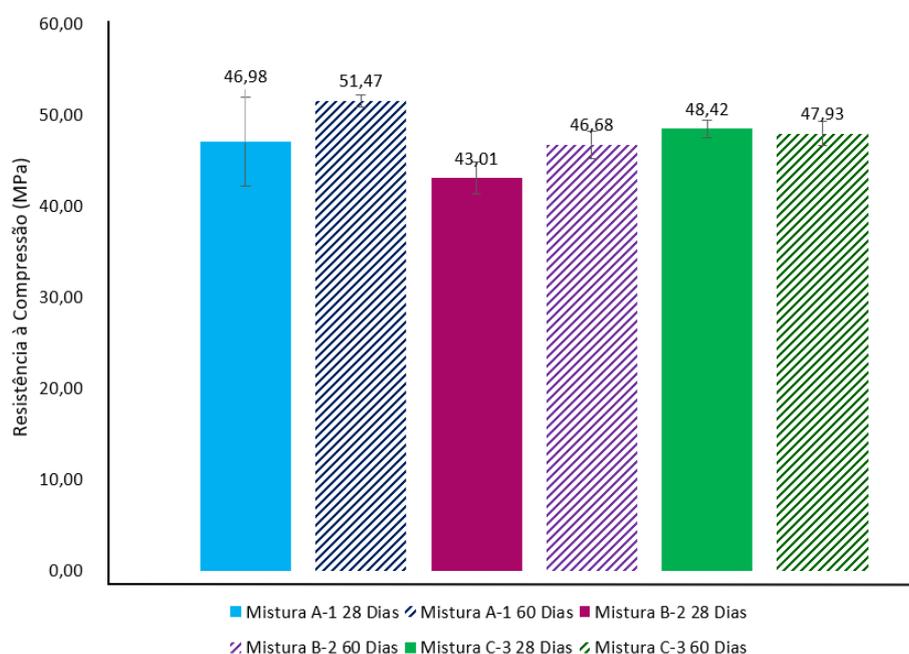
Além disso também foi efetuado o Teste de Duncan, conforme executando também para o ensaio de absorção de água por capilaridade (tópico 4.2). O resultado adaptado da análise está representado na Tabela 21 no Anexo A. Novamente os valores obtidos são superiores à 0,05 portanto não demonstram significância.

Com base no exposto pode-se afirmar que a ação do tempo no aditivo cristalizante não contribuíram significativamente para o aumento da resistência à tração das barras de argamassa ensaiadas. Aliando os resultados ao fato de o cimento utilizado ser o CPV-ARI era esperado que obtivesse uma resistência mais elevadas já nas primeiras idades.

4.5 Ensaio de Compressão axial

Como tratado no tópico 3.2.3.4, o ensaio de compressão ocorreu em seis metades de corpos de prova modelo II por idade (28 e 60 dias) para cada mistura. O resultado do ensaio de Compressão axial está representado no gráfico da Figura 36. Nele se encontram lado a lado os resultados obtidos nos ensaios efetuados para cada mistura nas idades de 28 e 60 dias.

Figura 36 – Resultado médio do ensaio de Compressão axial.



Fonte: Elaboração Própria.

Os valores de resistência à compressão encontram-se na Tabela 14, junto com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de compressão axial aos 28 e 60 dias.

Mistura	28 Dias		60 Dias	
	Resistência	Desvio Padrão	Resistência	Desvio Padrão
Mistura A-1	46,98 MPa	4,88	51,47 MPa	0,69
Mistura B-2	43,01 MPa	1,75	46,68 MPa	1,5
Mistura C-3	48,42 MPa	1,00	47,93 MPa	1,36

Fonte: Elaboração própria.

A partir dos valores expostos no gráfico da Figura 36 e da Tabela 14 foi observado um aumento na resistência à compressão das barras de argamassa moldadas com as misturas A-1 e B-2 comparando as idades de 28 e 60 dias, já para os corpos de prova moldados com a mistura C-3 houve um pequeno decréscimo na sua resistência.

Comparando aos resultados de 28 dias e 60 dias, a Mistura A-1 apresentou um aumento de 9,56% em sua resistência, a mistura B-2 apresentou um aumento de 8,54% na resistência e a Mistura C-3 apresentou um decréscimo de 1,01%. Também com base na Tabela 14 é possível observar uma queda no desvio padrão para a Mistura A-1 e B-2, e um aumento para a Mistura C-3.

Vale evidenciar, conforme mostrado no tópico 4.1, que as amostras que apresentaram fissuração por RAA foram justamente as produzidas com as Misturas A-1 e B-2, o que indica ação do aditivo cristalizante nos corpos de prova microfissurados, enquanto nas amostras produzidas com a Mistura C-3 (não fissuradas) não obteve-se resultados importantes para a resistência à compressão. Ainda é possível observar um aumento levemente mais elevado para a Mistura A-1, que como mostrado na Figura 29 apresenta fissuras de abertura menor comparada a Mistura B-2 (mostrada na Figura 30).

Da mesma maneira em que foi efetuada a análise estatística para os ensaios de Tração na flexão, realizou-se a ANOVA com fator único para os resultados de resistência à compressão obtidos.

Foi verificado que para a Mistura B-2 houve significância no aumento da resistência da idade de 28 dias para 60 dias, isso pode ser observado na Tabela 15.

Tabela 15 – ANOVA-Fator único - Mistura B-2 (Compressão)

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	P
Intercepto	16086,52	1	16086,52	6026,998	0,000000
Idade de ensaio	26,98	1	26,98	10,109	0,019089
Erro	16,01	6	2,67	-	-

Onde: SQ - Soma dos Quadrados, GL - Grau de Liberdade, MQ - Médias Quadradas, P - Significância.
Fonte: Elaboração própria.

Para as outras misturas a variável idade de ensaio não foi significativa e pode ser observada nas Tabelas 22 e 23 no Anexo A. Pode-se notar que o valor encontrado de significância na Tabela 22 é próximo ao valor de 0,05.

Porém para a análise realizada pelo teste de Duncan demonstrou valores significativos (inferiores a 0,05) para as misturas A-1 e B-2, mantendo apenas a mistura C-3 no caráter de manutenção da resistência à compressão. Os resultados adaptados conforme a necessidade da análise estão representados na Tabela 16.

Tabela 16 – ANOVA-Teste de Duncan (Compressão).

Mistura	Idade	A-1 28 Dias	A-1 60 Dias	B-2 28 Dias	B-2 60 Dias	C-3 28 Dias	C-3 60 Dias
A-1	28 Dias	-	0,0269	-	-	-	-
A-1	60 Dias	0,0269	-	-	-	-	-
B-2	28 Dias	-	-	-	0,0479	-	-
B-2	60 Dias	-	-	0,0479	-	-	-
C-3	28 Dias	-	-	-	-	-	0,779
C-3	60 Dias	-	-	-	-	0,779	-

Fonte: Elaboração própria.

Portanto pode-se concluir que houve um aumento significativo na resistência à compressão das argamassas moldadas com as misturas A-1 e B-2, demonstrando uma ação positiva do tempo no aditivo cristalizante presente nas misturas, mesmo tendo as moldagens utilizando o cimento CPV-ARI.

4.6 Compilação dos resultados

Analisando os resultados médios obtidos através da realização dos ensaios de controle apresentados nos tópicos 4.1, 4.2 e 4.3 houve a elaboração da compilação dos resultados da presente pesquisa, comparando os resultados obtidos na idade de 60 dias aos obtidos na idade de 28 dias, esses dados compilados podem ser observados na Tabela 17.

Tabela 17 – Análise geral dos ensaios de controle.

Mistura	Propriedade	Melhoria	Piora	Manutenção
A-1	Expansão por RAA			X
	Resistência à Tração			X
	Resistência à Compressão	X		
	Absorção de água por capilaridade	X		
B-2	Expansão por RAA			X
	Resistência à Tração			X
	Resistência à Compressão	X		
	Absorção de água por capilaridade	X		
C-3	Expansão por RAA		X	
	Resistência à Tração			X
	Resistência à Compressão			X
	Absorção de água por capilaridade	X		

Fonte: Elaboração própria.

Com base na Tabela 17 faz-se as seguintes considerações:

- Para a Mistura A-1: Há uma melhora provocada pelo aditivo cristalizante no passar do tempo nas propriedades de resistência à compressão e de Absorção de água por capilaridade, e para a expansão por RAA e Resistência à tração houve caráter de manutenção das propriedades.
- Para a Mistura B-2: Há uma melhora provocada pelo aditivo cristalizante no passar do tempo nas propriedades de resistência à compressão e de Absorção de água por capilaridade, e para a expansão por RAA e Resistência à tração houve caráter de manutenção das propriedades.
- Para a Mistura C-3: Há uma melhora provocada pelo aditivo cristalizante no passar do tempo no teste de durabilidade de Absorção de água por capilaridade, para as propriedades mecânicas de Resistência à tração e Resistência à compressão houve caráter de manutenção das propriedades. Para as propriedades de expansão por RAA houve uma piora, porém não em patamares que tornem o agregado C reativo frente ao uso de Cimento Portland CPV-ARI.

Analisando as misturas produzidas, nota-se um melhor desempenho geral do aditivo cristalizante na Mistura A-1, sendo registradas melhorias na absorção de água por capilaridade e na resistência à compressão axial, tendo uma diminuição de 72,81% na taxa de absorção de água e um aumento de 9,56% na resistência à compressão.

4.7 Imagens

Amostras foram coletadas dos corpos de prova modelo II ensaiados nas idades de 28 e 60 dias a fim de fotografar imagens que revelassem microfissuras existentes e eventuais microfissuras seladas pelo aditivo cristalizante. Para a retirada das fotografias foi utilizada uma Lupa com capacidade de aumento de 20 vezes no Laboratório de Reuso de Efluentes e de Água na Agricultura (LAREA) da Unipampa Campus Alegrete. Na Figura 37 pode ser observado o equipamento empregado.

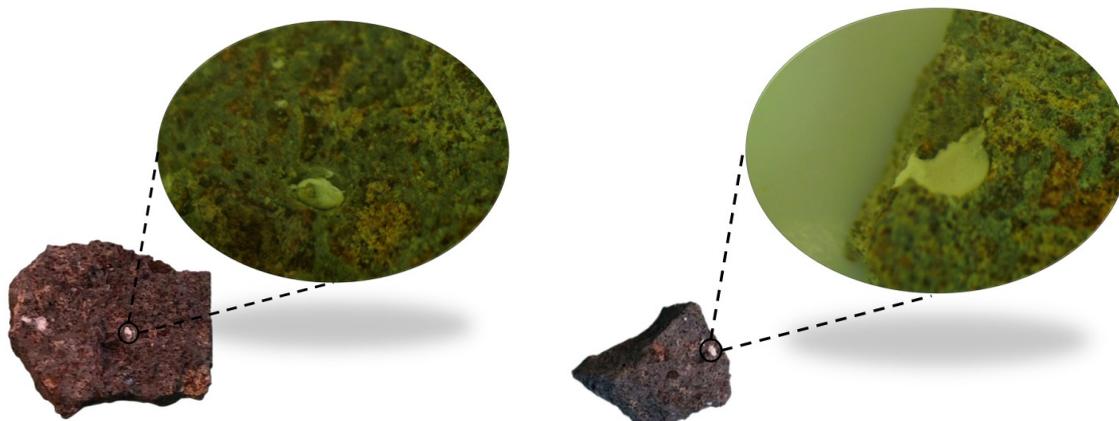
Figura 37 – Lupa utilizada para a retirada das imagens.



Fonte: Elaboração Própria.

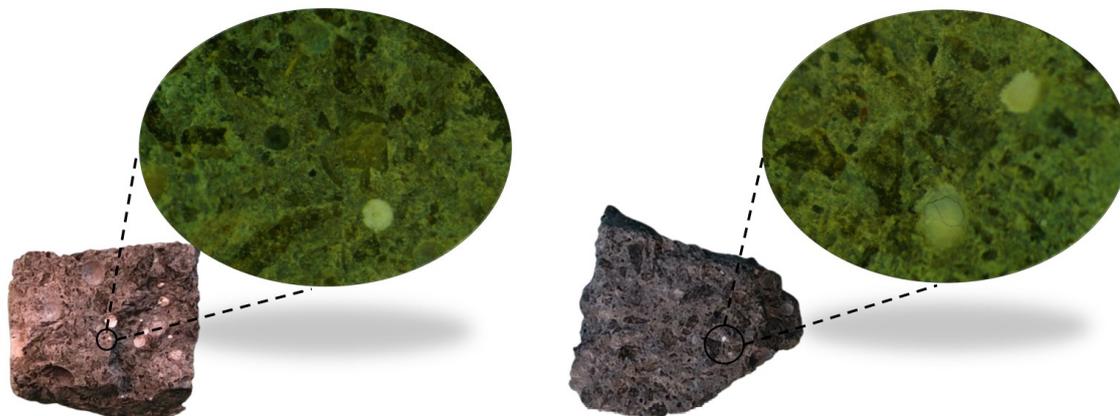
Através das imagens pôde-se notar a presença de vários pontos brancos, esses pontos podem ser observados nas Figuras 38, 39 e 40.

Figura 38 – Pontos brancos identificados em corpos de prova moldados com a Mistura A-1.



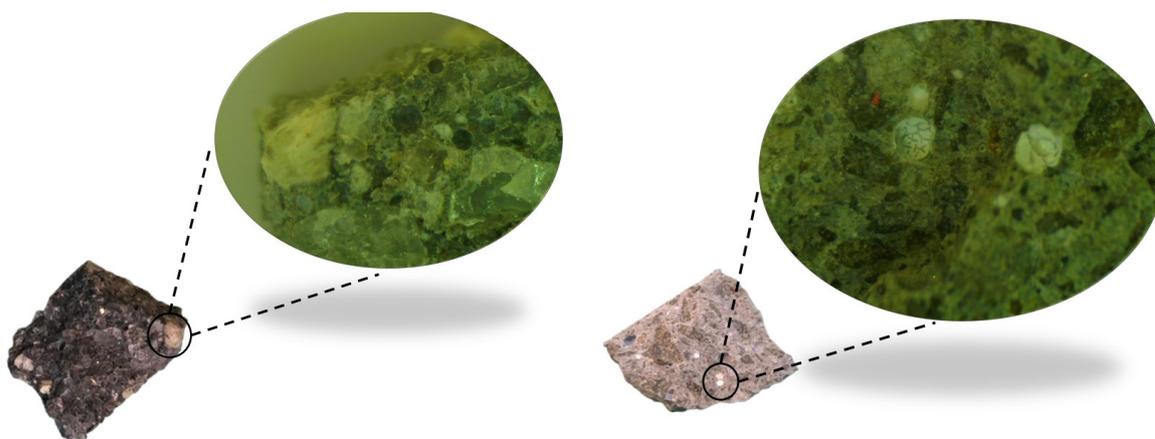
Fonte: Elaboração Própria.
(a) Mistura A-1 28 Dias; (b) Mistura A-1 60 Dias.

Figura 39 – Pontos brancos identificados em corpos de prova moldados com a Mistura B-2.



Fonte: Elaboração Própria.
(a) Mistura B-2 28 Dias; (b) Mistura B-2 60 Dias.

Figura 40 – Pontos brancos identificados em corpos de prova moldados com a Mistura C-3.

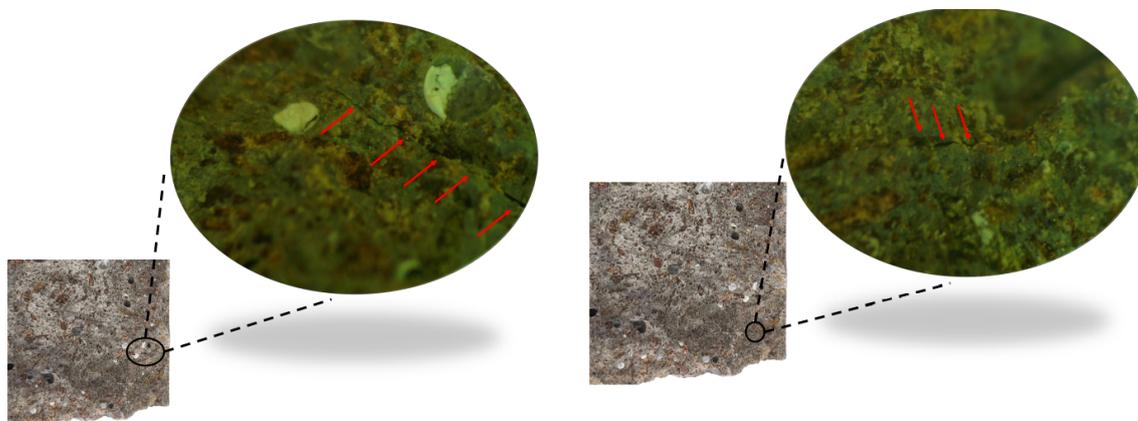


Fonte: Elaboração Própria.
(a) Mistura C-3 28 Dias; (b) Mistura C-3 60 Dias.

Os elementos brancos encontrados nas amostras fotografadas também podem ser identificados de maneira semelhante nos estudos de Aleixo (2018), Al-Kheetan *et al.* (2018), Jantsch (2015), o que pode indicar o desenvolvimento dos cristais disponibilizados por partículas presentes no aditivo cristalizante, que podem ser observadas na Figura 11. Porém não é possível comprovar com exatidão que os pontos destacados se tratem desse material, necessitando de uma melhor análise dos elementos encontrados.

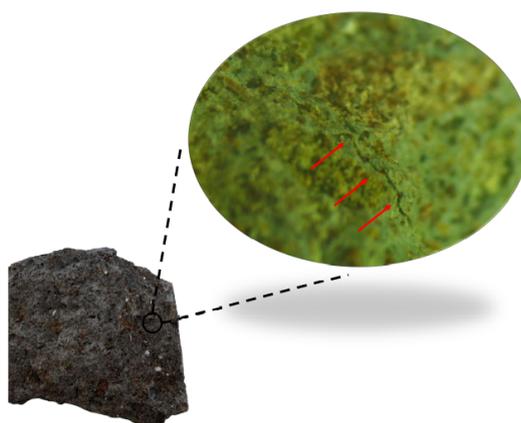
É possível observar microfissuras identificadas nas Figuras 41, 42, 43 e 44.

Figura 41 – Microfissuras identificadas em corpos de prova moldados com a Mistura A-1 aos 28 dias.



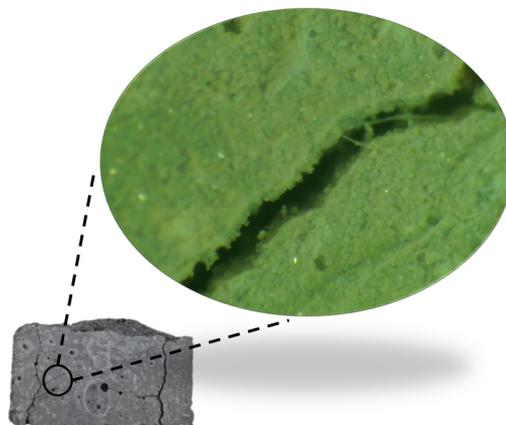
Fonte: Elaboração Própria.
(a) Face longitudinal; (b) Face Transversal.

Figura 42 – Microfissuras identificadas em corpos de prova moldados com a Mistura A-1 aos 60 dias.



Fonte: Elaboração Própria.
(a) Face longitudinal; (b) Face Transversal.

Figura 43 – Microfissuras identificadas em corpos de prova moldados com a Mistura B-2 aos 28 dias.



Fonte: Elaboração Própria.
(a) Face longitudinal; (b) Face Transversal.

Figura 44 – Microfissuras identificadas em corpos de prova moldados com a Mistura B-2 aos 60 dias.



Fonte: Elaboração Própria.
(a) Face longitudinal; (b) Face Transversal.

Ao observarmos as Figuras 41 e 42 pode-se notar microfissuras na parte interna das amostras ensaiadas produzidas com a Mistura A-1, porém na Figura 42, referente à idade de 60 dias, não é possível observar a selagem da fissura por meio da percolação de carbonato de cálcio precipitado pela ação do aditivo cristalizante.

A mesma situação se repete ao analisar-se as Figuras 43 e 44, onde podem ser visualizadas microfissuras na superfície das amostras e também na parte superficial dos corpos de prova produzidos com a Mistura B-2, porém novamente sem a presença de cristais precipitados no interior das microfissuras presentes na Figura 44.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo verificar a eficiência do uso de aditivo cristalizante frente à Reação Álcali-Agregado em agregados caracterizados previamente como reativos utilizando o Cimento Portland CP-V ARI. Para esta avaliação foi realizado o ensaio acelerado de RAA e os ensaios de controle, previstos no tópico 3.2.

Com base nos resultados obtidos no ensaio acelerado de RAA, ao compararmos com os resultados de Dutra (2018) (referência), conclui-se que o aditivo cristalizante adicionado aos traços das Misturas A-1, B-2 não apresenta influência na expansão provocada pela Reação Álcali-Agregado quando comparadas à referência sem a presença do aditivo, e mesmo para a Mistura C-3, não tornou a Mistura reativa à Reação Álcali-Agregado, demonstrando possibilidade do uso desse tipo de aditivo para o tratamento de fissuras com a tecnologia de autocicatrização.

Com relação a resistência à tração, é possível afirmar que a passagem do tempo não beneficiou os corpos de prova ensaiados contendo o aditivo cristalizante, de maneira que os valores médios de resistência à tração das barras de argamassa se conservaram em manutenção quando comparados os valores registrados nas idades de 28 dias e aos 60 dias.

Com relação a resistência à compressão axial, com base nos resultados adquiridos por meio dos ensaios realizados, conclui-se que o passar do tempo para o aditivo cristalizante adicionado nas Misturas do presente estudo demonstrou ser eficaz no ganho de resistência para as Misturas produzidas com agregado reativo (A-1 e B-2) quando comparados os resultados de 28 e 60 dias, porém não apresentou capacidade no ganho de resistência para a Mistura C-3 (não fissurada).

Com relação a absorção de água por capilaridade, o aditivo demonstrou ser eficaz na diminuição da absorção de água com o passar do tempo em todas as Misturas estudadas na presente pesquisa.

Ao observar as imagens obtidas, constata-se que não é possível identificar o fechamento das microfissuras visíveis no equipamento de ampliação utilizado nas condições em que esta pesquisa se aplicou, além disso é possível notar a presença de pontos brancos espalhados pelos corpos de prova, que pode indicar a presença de material cristalizante proveniente do aditivo porém sem embasamento suficiente, necessitando de um aprofundamento maior no tocante à identificação do material observado.

Em resumo, ao compararmos os resultados obtidos nas idades de ensaio estudadas, a passagem do tempo em relação à manifestação das reações proporcionadas pelo aditivo cristalizante demonstrou não influenciar na ocorrência da expansão das barras de argamassa expostas à condições favoráveis de RAA, proporcionou melhorias relacionadas à absorção de água por capilaridade para todas as Misturas estudadas,

agiu positivamente no aumento de resistência à compressão axial das Misturas A-1 e B-2, essas avariadas pela Reação Álcali-Agregado, e manteve a resistência dos corpos de prova moldados com a Mistura C-3, também demonstrou não interferir na resistência à tração dos corpos de prova ensaiados, expressando um caráter de manutenção da resistência. Portanto o aditivo cristalizante mostra-se uma alternativa coerente frente a utilização em agregados reativos para a realização da autocicatrização de fissuras causadas pela Reação Álcali-Agregado.

5.1 Sugestão de trabalhos futuros

Levando em consideração os resultados obtidos nessa pesquisa, alguns questionamentos que podem complementar o presente estudo surgiram, portando a fim de melhorar a compreensão do funcionamento dos aditivos cristalizantes frente à RAA sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Avaliar a ação do aditivo cristalizante durante um período superior em imersão em água a fim de promover mais tempo em condições favoráveis à formação dos cristais;
- Efetuar misturas de argamassa e de concreto com mais tipos de agregados de areias naturais reativas com o propósito de verificar se há interações diferentes entre agregados naturais e industriais;
- Realizar a adição de aditivo cristalizante em concretos afetados por RAA por meio do ensaio lento em prismas de concreto, regido pela NBR 15577-6 e NBR 15577-7 para verificar se há diferença na efetividade do aditivo entre argamassas e concretos;
- Verificar a capacidade de selagem de fissuras do aditivo cristalizante com o passar do tempo;

REFERÊNCIAS

- AL-KHEETAN, M. J.; RAHMAN, M. M.; CHAMBERLAIN, D. A. Development of hydrophobic concrete by adding dual-crystalline admixture at mixing stage. **Structural Concrete**, Wiley Online Library, v. 19, n. 5, p. 1504–1511, 2018.
- ALEIXO, I. V. **Avaliação da influência de diferentes aditivos hidrofugantes nas propriedades das argamassas de revestimentos de paredes**. 2018 — Centro Universitário de Brasília, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.
- _____. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- _____. **NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- _____. **NBR 15577-3: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto**. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- _____. **NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- BIANCHIN, F. H. **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades**. 2018 — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Patologia de estruturas**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2019.
- BONIFÁCIO, D. R. *et al.* Bacillus subtilis uma adição incomum com benefícios inesperados ao concreto. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 14, n. 2, 2022.
- BRAUNER, T. B. Avaliação do fenômeno de autocicatrização em concretos com diferentes relações água/cimento. In: **XXX Salão de Iniciação Científica**. [S.l.: s.n.], 2018.
- BREUGEL, K. V. Is there a market for self-healing cement-based materials. In: **Proceedings of the first international conference on self-healing materials**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–9.
- COUTO, T. A. *et al.* **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2008.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. 1988. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988.

DUTRA, A. I. F. **Reação álcali-agregado: investigação do comportamento de agregados da região sudoeste do rio grande do sul frente a utilização de diferentes tipos de cimentos portland**. 2018 — Universidade Federal do Pampa, 2018.

EHRENBRING, H. Z. **Desenvolvimento de Engineered Cementitious Composites (ECC) autocicatrizantes com diferentes fibras poliméricas e agentes de cicatrização**. 2020. Tese (Doutorado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2020.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; CARSANA, M. A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 68, p. 535–551, 2014.

FERREIRA, M. F. Análise do desempenho mecânico com aditivo cristalizante após o self-sealing e self-healing na resistência à compressão de argamassas. In: **XI Expotec**. [S.l.: s.n.], 2017.

FORSTER, S. W. *et al.* State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity aci 221 . 1 r-98 reported by aci committee 221. In: **ACI 221.1R-98**. [S.l.: s.n.], 1999.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M.-A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, NRC Research Press Ottawa, Canada, v. 27, n. 2, p. 167–191, 2000.

FRAGA, Y. S. B.; ALBUQUERQUE, C. M. M. de *et al.* Efeitos de adições minerais para mitigação de reações álcali-agregado no concreto: estado da arte. **Engineering Sciences**, v. 5, n. 1, p. 1–13, 2017.

GALLO, G. *et al.* Medidas preventivas para a reação álcali-agregado (raa) no concreto. **Concreto, São Paulo**, v. 46, p. 22–28, 2007.

GILLOTT, J. Alkali-aggregate reactions in concrete. **Engineering Geology**, v. 9, n. 4, p. 303–326, 1975. ISSN 0013-7952. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013795275900137>>.

GLASSER, L. D.; KATAOKA, N. The chemistry of ‘alkali-aggregate’ reaction. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 11, n. 1, p. 1–9, 1981.

HADLEY, D. W. Alkali reactivity of carbonate rocks-expansion and dedolomitization. In: **Highway Research Board Proceedings**. [S.l.: s.n.], 1961. v. 40.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

HOU, X.; STRUBLE, L. J.; KIRKPATRICK, R. J. Formation of asr gel and the roles of c-s-h and portlandite. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1683–1696, 9 2004. ISSN 00088846.

IGARASHI, S.-i.; KUNIEDA, M.; NISHIWAKI, T. Technical committee on autogenous healing in cementitious materials. **Committee Report JCI-TC075B**, 2009.

JANTSCH, A. C. A. **Análise do desempenho de argamassas estabilizadas submetidas a tratamento superficial com aditivos cristalizantes**. 2015. 142 f. 2015. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

JANTSCH, A. C. A. *et al.* Avaliação do comportamento de revestimentos em argamassas estabilizadas submetidas a tratamento superficial com aditivos cristalizantes. **Ambiente Construído**, SciELO Brasil, v. 21, p. 81–99, 2021.

JIANG, Z.; LI, W.; YUAN, Z. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 57, p. 116–127, 2015.

LIMA, M. d. S. *et al.* **Estudo comparativo sobre os tipos de autocicatrização do concreto**. 2021 — Universidade Federal do Amazonas, 2021.

LOPES, L. E. **Modelagem mecânica de numérica da Reação Álcali-Agregado com aplicação a barragens de concreto**. 2004. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

Manejo Impermeabilizações. **Aditivo cristalizante**. 2020. Disponível em: <<https://www.manejoimpermeabilizacao.com.br/impermeabilizantes/aditivos-cristalizantes>>. Acesso em: 07 de julho 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.; FILHO, A. C. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. [S.l.]: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. [S.l.]: Ibracon, 2008.

MIZUMOTO, C. **Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**. 2009. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2009.

MO, X. *et al.* Alkali-aggregate reaction suppressed by chemical admixture at 80 c. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 19, n. 6, p. 473–479, 2005.

MORAIS, J. M. P. de *et al.* Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, 2020.

MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento portland: contribuição aos processos de autocicatrização**. 2016. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2016.

MUHAMMAD, N. Z. *et al.* Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 101, p. 80–90, 2015.

MUNHOZ, G. S. *et al.* Effect of improved autogenous mortar self-healing in the alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 117, p. 103905, 2021.

- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto-5ª Edição**. [S.l.]: Bookman Editora, 2016.
- NOGUEIRA, K. A. **Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008**. 2010 — Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- OLIVEIRA, A. de S. **Estudo do Potencial de Aditivo Cristalizante como Estimulador de Autocicatrização de Fissuras de Matrizes Cimentícias**. 2019. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.
- OLIVEIRA, R. O colapso do edifício areia branca e novos conceitos de vistorias de edifícios. **Concreto, São Paulo**, v. 46, p. 18–21, 2007.
- OZOL, M. A. Alkali-carbonate rock reaction. **ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION**, v. 169, p. 372–387, 1994.
- PESSI, G. **Mapeamento sistemático da reação álcali-agregado: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014**. 2016 — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- PETERSON, M. G. **A chemoplastic model for alkali-silica expansion: effect of stress-induced anisotropy**. 2000. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- POOLE, A. B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In: **The alkali-silica reaction in concrete**. [S.l.]: CRC Press, 1991. p. 1–29.
- REINHARDT, H. *et al.* Recovery against environmental action. In: **Self-healing phenomena in cement-based materials**. [S.l.]: Springer, 2013. p. 65–117.
- RILEM-221-SHC, T. 2013. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. Volume RILEM State-of-the-Art Reports**. [S.l.]: Springer, 2013.
- SALIBA, G. C. L.; JUNIOR, A. N. de C. Estudos das manifestações patológicas encontradas em edifícios de belo horizonte e nova lima com até 30 anos de idade. **Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia**, 2019.
- SANTOS, R. d. J. S. d. **Degradação do concreto de fundações submersas por ataques de sulfatos e reação álcali-agregado: uma revisão da literatura**. 2021 — Faculdade Maria Milza, 2021.
- SILVA, C. F. C. d. **Contribuição para eficácia da mitigação da reação álcali-agregado: influência de aditivos superplastificantes nas expansões ao utilizar adições minerais**. 2015. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2015.
- SILVA, G. A. d. **Recuperação de Blocos de Coroamento afetados pela reação Álcali-Agregado**. 2007. Dissertação (Mestrado) — Universidade Católica de Pernambuco, 2007.
- SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso/CHESF: influência da reação nas propriedades do concreto**. 2007. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.

- SOUZA, F. de *et al.* Análise do desempenho de concretos com diferentes métodos de inserção de silicato de sódio neutro para autocicatrização. **XVI Congresso Latinoamericano de Patología de La Construcción**, CONPAT, 2021.
- TAMBARA, R. F. **Autocicatrização de materiais cimentícios com aditivos cristalizantes**. 2022 — Universidade Federal do Pampa, 2022.
- TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. 2006. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo. 2002. 223 f.** 2002. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- VENQUIARUTO, S. D. **Influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (Self-Healing)**. 2017. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.
- VILELA, H. T. P.; FILHO, M. G. T.; NETO, T. C. Efeitos do uso de aditivos cristalizantes na reação álcali-agregado e absorção das argamassas. **Revista ALCONPAT**, Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación . . . , v. 11, n. 1, p. 1–17, 2021.
- ZAKRZEWSKI, M. B. **Propriedades e autocicatrização do bioconcreto por meio da incorporação de bactérias do gênero *Bacillus subtilis* encapsuladas em argila expandida**. 2022 — Universidade Federal da Fronteira Sul, 2022.

ANEXO A – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Tabela 18 – ANOVA-Fator único - Mistura A-1 (Tração)

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	P
Intercept	121,5047	1	121,5047	3272,294	0,000012
Idade de ensaio	0,0135	1	0,0135	0,365	0,588451
Erro	0,1114	3	0,0371	-	-

Onde: SQ - Soma dos Quadrados, GL - Grau de Liberdade, MQ - Médias Quadradas, P - Significância.
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 19 – ANOVA-Fator único - Mistura B-26 (Tração)

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	P
Intercept	73,66415	1	73,66415	719,6474	0,000011
Idade de ensaio	0,00423	1	0,00423	0,0414	0,848776
Erro	0,40945	4	0,10236	-	-

Onde: SQ - Soma dos Quadrados, GL - Grau de Liberdade, MQ - Médias Quadradas, P - Significância.
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 20 – ANOVA-Fator único - Mistura C-3 (Tração)

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	P
Intercept	293,3769	1	293,3769	7537,773	0,000000
Idade de ensaio	0,0605	1	0,0605	1,554	0,0,280607
Erro	0,1557	4	0,0389	-	-

Onde: SQ - Soma dos Quadrados, GL - Grau de Liberdade, MQ - Médias Quadradas, P - Significância.
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 21 – Teste de Duncan (Tração)

Mistura	Idade	A-1 28 Dias	A-1 60 Dias	B-2 28 Dias	B-2 60 Dias	C-3 28 Dias	C-3 60 Dias
A-1	28 Dias	-	0,624	-	-	-	-
A-1	60 Dias	0,624	-	-	-	-	-
B-2	28 Dias	-	-	-	0,805	-	-
B-2	60 Dias	-	-	0,805	-	-	-
C-3	28 Dias	-	-	-	-	-	0,361
C-3	60 Dias	-	-	-	-	0,361	-

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 22 – ANOVA-Fator único - Mistura A-1 (Compressão)

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	P
Intercept	19383,02	1	19383,02	1596,808	0,000000
Idade de ensaio	40,32	1	40,32	3,322	0,118193
Erro	72,83	6	12,14	-	-

Onde: SQ - Soma dos Quadrados, GL - Grau de Liberdade, MQ - Médias Quadradas, P - Significância.
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 23 – ANOVA-Fator único - Mistura C-3 (Compressão)

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	P
Intercept	15914,47	1	15914,47	11910,59	0,000000
Idade de ensaio	0,41	1	0,41	0,31	0,602346
Erro	6,68	5	1,34	-	-

Onde: SQ - Soma dos Quadrados, GL - Grau de Liberdade, MQ - Médias Quadradas, P - Significância.
Fonte: Elaboração própria.