

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS PATO BRANCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGE**

ERICA CAROLINE SZYDLOSKI

**ESTUDO DO POTENCIAL DO CIMENTO SUPERSULFATADO NA MITIGAÇÃO
DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO DAS BARRAS
DE ARGAMASSA**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO – PR

2021

ERICA CAROLINE SZYDLOSKI

**ESTUDO DO POTENCIAL DO CIMENTO SUPERSULFATADO NA MITIGAÇÃO
DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO DAS BARRAS
DE ARGAMASSA**

**Study of the potential of supersulphated cement in the mitigation of alkali
reaction aggregate by the accelerated mortar bar test**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).
Orientador: Profa. Dr^a. Caroline Angulski da Luz

PATO BRANCO- PR

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ERICA CAROLINE SZYDLOSKI

ESTUDO DO POTENCIAL DO CIMENTO SUPERSULFATADO NA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO DAS BARRAS DE ARGAMASSA

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Materiais E Engenharia De Estruturas.

Data de aprovação: 27 de Agosto de 2021

Prof.a Caroline Angulski Da Luz, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Jose Ilo Pereira Filho, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Ronaldo Alves De Medeiros Junior, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 27/08/2021.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas bênçãos e forças diárias.

Aos meus pais, Elizangela e Moacir, sem o incentivo e carinho de vocês certamente essa fase teria sido muito mais difícil, agradeço por todo o amor incondicional, apoio e paciência, por nunca me deixar desanimar, sempre me dando suporte nos momentos mais difíceis, buscando proporcionar a melhor educação e as melhores oportunidades, tanto para mim quanto para minhas irmãs, Valéria e Julia.

À minha orientadora, Caroline Angulski da Luz, por todo o conhecimento compartilhado, disponibilidade e contribuições durante o desenvolvimento de toda a pesquisa.

Aos professores que avaliaram e contribuíram com o desenvolvimento do trabalho: Prof.º Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior e Dr. José Ilo Pereira Filho.

Aos professores do PPEGEC da UTFPR de Pato Branco-PR, por todo o conhecimento repassado.

À técnica do laboratório e alunos de iniciação científica, em especial a Aline, por toda a ajuda, contribuição, disponibilidade e dedicação.

À Central de Análises da UTFPR - Campus Pato Branco pela realização das análises químicas.

Ao CNPq pelo fomento através do Edital Universal 2018.

A todos que direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

EPÍGRAFE

“Há três caminhos para o fracasso: não ensinar o que se sabe, não praticar o que se ensina, não perguntar o que se ignora.”

São Beda.

RESUMO

A RAA se trata de uma reação expansiva entre íons alcalinos, provenientes principalmente do clínquer, e minerais reativos presentes nos agregados. A presença de alumina no cimento forma uma película de proteção que envolve o agregado e dificulta que os minerais reativos se dissolvam e reajam com os íons alcalinos formando os géis expansivos, a presença de cálcio é um fator que agrava o potencial expansivo dos géis. Com base nisso, o cimento supersulfatado (CSS), contendo alto teor de alumina e baixo teor de cálcio, se apresenta como uma possível solução para a RAA, desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento do CSS quando submetido ao contato com um agregado reativo encontrado na região de Pato Branco- PR, analisando a influência do teor de cálcio e de alumina no cimento. Para isso, barras de argamassas foram moldadas para o ensaio de expansão pelo método acelerado, tendo como referência argamassas compostas pelo cimento Portland CP IV e CPV, conhecido por ter, respectivamente, um desempenho bom e um ruim quando submetido a RAA. As peças passaram por análise de resistência mecânica, análise visual, de absorção e microestrutural, para identificação da possível formação do gel expansivo. A partir dos resultados, observou-se que os CSS, cimento com maior teor de alumina e menor teor de cálcio, teve a maior eficácia na mitigação da RAA, se mostrando eficaz no controle das expansões e perda de resistência mecânica.

Palavra-chave: Cimento supersulfatado, reação álcali agregado, alumina, cálcio.

ABSTRACT

The RAA is an expansive reaction between alkaline ions, mainly from clinker, and reactive minerals present in the aggregates. The alumina in the cement forms a protective film that surrounds the aggregate and makes it difficult for reactive minerals to dissolve and react with the alkaline ions that form the expansive gels, the presence of calcium is a factor that aggravates the gels' expansive potential. Based on this, supersulfated cement (CSS), containing high alumina and low calcium content, presents itself as a possible solution for RAA, thus, the objective of this work was to evaluate the behavior of CSS when subjected to contact with a reactive aggregate found in the Pato Branco-PR region, analyzing the influence of calcium and alumina content in the cement. For this, mortar bars were molded for the expansion test by the accelerated method, having as reference mortars composed of Portland cement CP IV and CPV, known for having, respectively, a good and a bad performance when submitted to RAA. The pieces underwent mechanical resistance analysis, visual, absorption and microstructural analysis, to identify the possible formation of the expanding gel. From the results, it was observed that the CSS, cement with the highest alumina content and the lowest calcium content, had the greatest effectiveness in mitigating the RAA, being effective in controlling expansion and loss of mechanical strength.

Keywords: Supersulfated cement, alkali aggregate reaction, aluminum, calcium.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Bloco de fundação de edifício em Recife afetado por RAA,.....	15
Figura 2. A) Bloco de fundação com fissuração mapeada típica da RAA. B) Barragem de Furnas- Vista lateral do pilar vertedouro.....	20
Figura 3. Detalhe do gel exsudado através da fissura na superfície do concreto.	24
Figura 5. Gel rendado.	24
Figura 4. Gel gretado.	24
Figura 7. Gel cristalizado.....	25
Figura 6. Gel cristalizado em forma de rosáceas.	25
Figura 9. Produto de RAA com morfologia em forma de agulha.	25
Figura 8. Produto de RAA identificado como pseudo-rosáceas.	25
Figura 10. Gel cristalino da RAA.	26
Figura 11. Gel esponjoso da RAA.....	26
Figura 12. Capacidade de ligação de água pelo gel de RAA em relação à proporção Ca/Si. (a) água ligada quimicamente. (b) água ligada fisicamente.....	32
Figura 13. A concentração de (a) sódio e (b) potássio na CSH em relação a Ca/Si.	33
Figura 14. Mapeamento dos elementos Al, Si e Na no produto da reação superficial das lâminas de vidro na presença de $Al(OH)_3$	36
Figura 15. Expansão dos prismas de concreto produzidos de cimento com substituição parcial por Al.....	37
Figura 16. MEV das amostras. (a) Amostras compostas de 100% cimento Portland. (b) Amostra composta de 80% cimento portland e 20% Alumina.....	38
Figura 17. Resultados de expansão de amostras com pó de alumínio.	39
Figura 18. Resultados de expansão das barras de argamassa.	39
Figura 19. Tipos de sílica.	40
Figura 20. Imagem 3D de amostras afetadas por RAA após 2, 61, 74 e 136 dias em solução de NaOH 1 M a 50 ° C.	41
Figura 21. MEV das pastas de CSS com 4 horas de hidratação.....	45
Figura 22. MEV das pastas de CSS. C) Após 12 horas de hidratação; D) Após 2 dias de hidratação.....	46
Figura 23. Expansão de micro barras de concreto de CSS.	49
Figura 24. Fluxograma dos ensaios.	52

Figura 25. DRX do sulfato de cálcio <i>in natura</i> e calcinado a 650°C.	55
Figura 26. DRX da escória de alto forno (G: Gipsita; P: Gesso e S: Dióxido de Silício).	55
Figura 27. Variação dimensional das barras do ensaio de reatividade da areia empregado no trabalho.	58
Figura 28. Produto empregado para preparo da solução de NaOH no qual as argamassas foram submersas durante o ensaio.....	59
Figura 29. Caracterização do espalhamento das argamassas. A= CSS85/ B= CSS75/ C= CP V/ D= CPIV.....	61
Figura 30. Barras prismáticas de argamassa moldadas para o ensaio de expansão.	62
Figura 32. Relógio comparador utilizado para realização das leituras das barras. ...	63
Figura 31. Prismas de argamassa desmoldados para o ensaio de expansão.	63
Figura 33. Barras de CSS em solução de NaOH em recipiente de aço inox na estufa.	63
Figura 34. Medição da temperatura da solução de NaOH realizada durante a leitura das barras.	64
Figura 35. Barras do ensaio de expansão transferidas para recipiente plástico aos 42 dias de ensaio, quando foram retiradas da estufa.....	64
Figura 36. A) Moldagem de corpos de prova para ensaio de resistência mecânica. B) Corpos de prova desmoldados.....	65
Figura 37. Filtragem no filtro Büchner	66
Figura 38. Amostras submersas em acetona.....	66
Figura 39. Gráfico de expansão das amostras no ensaio acelerado das barras de argamassa.....	68
Figura 40. Resistências mecânicas das argamassas produzidas com diferentes tipos de cimentos nas idades indicadas em cada gráfico.	71
Figura 42. Análise visual CSS75 aos 28 dias.....	74
Figura 41. Análise visual CSS85 aos 28 dias.....	73
Figura 43. Análise visual CP IV aos 28 dias.....	74
Figura 44. Análise visual do CP V após desmoldagem (a esquerda) e aos 28 dias (a direita).	75
Figura 45. MEV da matriz da argamassa de cimento CP V.	76
Figura 46. MEV da matriz da argamassa de CP IV.....	77

Figura 47. MEV da matriz da argamassa de CSS75.....	78
Figura 48. MEV da matriz de argamassa CSS85.....	79
Figura 49. Identificação dos pontos de EDS para as amostras de CPV, CPV, CSS75 e CSS85.....	80
Figura 50. Gráfico de absorção das argamassas aos 90 dias.	81
Figura 51. Imagens de MEV do CSS75.	100
Figura 52. Imagens de MEV do CSS85.	101
Figura 53. Imagens de MEV do CPIV.	102
Figura 54. Imagens de MEV do CPIV.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.	28
Tabela 2. Composição química do CSS estudado.	49
Tabela 3. Valores médios de pH e concentração de componentes químicos da água dos poros das pastas.	50
Tabela 4. Teor de Al, CaO e equivalente alcalino de CSS e CP IV encontrados na literatura.	51
Tabela 5. Caracterização química dos materiais que compõem o CSS.	53
Tabela 6. Caracterização química do CP IV e CPV.	56
Tabela 7. Granulometria requerida do material para ensaio.	57
Tabela 8. Composição dos cimentos.	59
Tabela 9. Espalhamento das argamassas.	61
Tabela 10. Resumo das análises realizadas.	62
Tabela 12. Médias de expansão aos 14 e 28 dias e classificação e teores de Alumínio (Al) e Cálcio (Ca).	68
Tabela 13. Composição química dos produtos encontrados nos cimentos identificados na Figura 49.	80
Tabela 14. Dados de expansão do CSS75	93
Tabela 15. Dados de expansão do CSS85	94
Tabela 16. Dados de expansão do CPIV	95
Tabela 17. Dados de expansão CP V.	96
Tabela 18. Resultados de resistência mecânica na Cal- CSS75	97
Tabela 19. Resultados de resistência mecânica na solução de NaOH- CSS CSS75	97
Tabela 20. Resultados de resistência mecânica na Cal- CSS85	97
Tabela 21. Resultados de resistência mecânica na solução de NaOH- CSS85	97
Tabela 22. Resultados de resistência mecânica na Cal- CP IV	98
Tabela 23. Resultados de resistência mecânica na solução de NaOH- CP IV	98
Tabela 24. Resultados de resistência mecânica na Cal- CP V	98
Tabela 25. Resultados de resistência mecânica na solução de NaOH- CP V	99

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 HIPÓTESE DE ESTUDO.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Histórico da reação álcali agregado.....	19
2.2 Tipos de reação álcali agregado	21
2.3 Mecanismos da reação álcali sílica (RAA).....	22
2.4 Medidas de prevenção da RAA	27
2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RAA.....	29
2.5.1 Teor de álcalis	29
2.5.2 Teor de cálcio	30
2.5.3 Teor de alumina no cimento	34
2.5.4 Agregado	40
2.5.5 Porosidade do concreto e argamassa	42
2.6 CIMENTO SUPERSULFATADO (CSS).....	42
2.6.1 Escória de alto forno	43
2.6.3 Hidratação do cimento supersulfatado.....	45
2.7 AVALIAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO EM ARGAMASSA.....	47
2.8 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO E O CIMENTO SUPERSULFATADO ...	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1 Materiais	53
3.1.1 Cimento Supersulfatado	53
3.1.2 Cimento Portland	56
3.1.3 Agregado	57
3.1.4 Hidróxido de sódio	58
3.2 MÉTODOS.....	59
3.2.1 Cimento Supersulfatado	59
3.2.2 Produção das argamassas	60
3.2.3 Ensaio de expansão pelo método acelerado das barras de argamassa.....	62
3.2.4 Ensaio de resistência mecânica.	64

3.2.5 Análise visual e microestrutural	65
3.2.6 Ensaio de absorção	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1 Expansão em argamassa	67
4.2 Resistência mecânica	71
4.2 Análise Visual	73
4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	75
4.4 Análise de absorção	81
5. CONCLUSÕES	82
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE A	93
APÊNDICE B	97
APÊNDICE C	99

1 INTRODUÇÃO

A durabilidade do concreto é uma das propriedades mais importantes da vida útil de qualquer estrutura e está relacionada tanto com a capacidade dos materiais de resistir a agressões químicas, físicas, mecânicas e biológicas do ambiente onde a estrutura será executada, como com as reações internas que ocorrem entre os materiais constituintes do concreto. Devido a isso, existe uma busca constante pelo desenvolvimento de materiais que reduzam o desencadeamento de manifestações patológicas. Entre as agressões químicas que podem ocorrer, destacam-se os ataques por sulfato, ataques ácidos e as reações álcali agregado (RAA) (HASPARYK, 2005).

A RAA é um termo genérico aplicado a dois tipos distintos de deterioração do concreto, a reação álcali sílica (RAA) e a reação álcali carbonato (RAC), sendo esta última a de ocorrência mais rara em âmbito mundial e nacional. A reação álcali sílica é altamente deletéria para elementos estruturais de concreto, caracteriza-se como um complexo fenômeno químico-físico já conhecido há muitos anos, que afeta principalmente obras hidráulicas e que depois de descoberta passou a ser observada em obras do mundo todo. O fenômeno é desencadeado por uma reação entre íons alcalinos, provenientes principalmente do clínquer do cimento, e minerais reativos presentes nos agregados. O produto da reação é um gel que se forma inicialmente na superfície dos agregados e se acumula nos vazios e interfaces da pasta, que na presença de água se expande exercendo pressão interna no material. Ao exceder a resistência a tração do concreto, a expansão do gel é capaz de gerar fissuras e deslocamentos na estrutura e que uma vez desencadeada, não se conhece uma forma de eliminá-la, tendo como única opção a aplicação de medidas paliativas que acabam sendo muito mais onerosas do que as medidas de prevenção (HASPARYK, 2005; MUNHOZ, 2007). Segundo Munhoz (2007) as fissurações aumentam a permeabilidade, permitindo uma maior entrada de água no interior do concreto, podendo acelerar a RAA e deixar a estrutura mais vulnerável ao desenvolvimento de outras manifestações patológicas.

A RAA foi descrita pela primeira vez há 80 anos, por Stanton quando muitas obras apresentaram fissuras sem motivos conhecidos. O fenômeno ocorre principalmente em obras em contato com a água, como barragens pontes e fundações, porém, no Brasil a reação do tipo álcali sílica passou a ser encontrada

em blocos de fundação de edifícios urbanos na cidade de Recife-PE, como observado na Figura 1 (MUNHOZ, 2007). Segundo Pecchio et al. (2006) a baixa profundidade do lençol freático, a disponibilidade de álcalis e a presença de agregado reativo contribuíram para a ocorrência da reação.



Figura 1. Bloco de fundação de edifício em Recife afetado por RAA, Fonte: PECCHIO, 2016.

A constatação da reação nos edifícios de Pernambuco se deu durante a inspeção das fundações de diversos edifícios, após a queda do Areia Branca em 2004, o caso teve grande repercussão na imprensa brasileira. A edificação se localizava na região metropolitana de Recife, Pernambuco e era constituído de um pavimento subsolo, pavimento térreo e 12 andares tipo. Vale ressaltar que a presença de RAA não foi a causa da queda da obra, porém, a inspeção permitiu identificar a manifestação patológica em vários outros edifícios acometendo blocos e sapatas de fundações, sendo que só os laboratórios da ABPC estudaram 60 casos (BATTAGIN, 2016).

Entre os meios de evitar a RAA, a forma mais eficiente é o uso de um agregado não reativo, o que nem sempre é viável, devido ao trabalho e gastos adicionais envolvidos em conseguir agregados de outra região. Neste caso o uso de adições ativas ricas em alumina pode controlar a expansão causada pela reação, devido à ação da alumina de inibir a dissolução da sílica reativa presente no agregado, como demonstrado por Chappex e Scrivener (2012). No Brasil, os cimentos comerciais mais eficientes na minimização da RAA são o cimento de alto forno (CP III) e o pozolânico (CP IV) (TIECHER, 2006).

Outro cimento que vem sendo citado por pesquisadores, como Matschei, Bellmann e Stark (2005) e Woltron (2009), como potencial mitigador da reação é o cimento supersulfatado (CSS), que se apresenta como uma alternativa de cimento sustentável a ser utilizado na presença de um agregado reativo devido à alta resistência a RAA. Entretanto, faz-se necessário estudos que expliquem como e quais fatores do CSS influenciam essa reação, levando a mitigação ou retardo da expansão. Regido pela norma europeia EN 15743/2010, o CSS é composto basicamente de teor superior a 75% de escória de alto forno, 5-20% de sulfato de cálcio e 0-5% de um ativador alcalino, o que praticamente elimina o clínquer de sua composição, reduzindo significativamente a emissão de CO₂ na atmosfera, sendo considerado um produto de baixo impacto ambiental (MASOUDI e HOOTON, 2019).

O clínquer é a principal fonte de álcalis do cimento -um dos fatores considerados fundamentais para desencadear a RAA- devido a isso, sua considerável redução na composição do CSS pode levar a mitigação, ou até mesmo a eliminação, dos processos de degradação causados pela reação. De acordo com Escalante-Garcia et al. (2014) a medida que o teor de escória aumenta, a alcalinidade é reduzida. No CSS ao definir as proporções de cada componente, é possível produzir um cimento de baixa alcalinidade, inibindo a RAA, como mostra a pesquisa de Min e Mingshu (1993), onde os autores analisam o comportamento de vários tipos de cimento em contato com um agregado reativo e outro inócuo, entre eles, o CSS apresentou bom comportamento na inibição da expansão, o que os autores atribuem a redução do pH da solução dos poros do concreto, que se dá através do baixo teor de álcalis.

Pesquisas mostram que fatores como o teor de alumina e cálcio do cimento atuam de alguma forma no desenvolvimento da RAA. Chappex e Scrivener (2012), Thomas (2011) e Hunger (2007) mostraram que a presença de alumina contribui na inibição da RAA, reduzindo a dissolução de sílica reativa. No CSS o teor de alumina depende dos materiais usados na sua composição e a proporção de cada um, sendo que o CSS produzido por Angulski da Luz e Hooton (2019) apresentou um teor de 11,95%, já no CSS estudado por Gruskovnjak et al. (2008) se encontrou um teor de 9,91%.

O teor de cálcio influencia no nível de expansão do gel formado na reação (LEI; LAW; YANG, 2021). No CSS, devido ao baixo teor de portlandita presente na composição, a sua hidratação resulta na formação de CSH com baixa relação Ca/Si,

podendo aumentar a incorporação de álcalis nos produtos de hidratação do CSS, reduzindo sua disponibilidade para o desenvolvimento da RAA.

O CSS vem se mostrando eficiente no controle de outras manifestações patológicas, como evidenciado por Pinto et al. (2020), que estudaram a durabilidade de compósitos com CSS, os autores observaram um potencial aumento da durabilidade de concretos de CSS quando comparado aos de cimento Portland, através do melhor desempenho na resistência a ataques por íons cloreto e por sulfato de sódio, apesar de apresentar baixa resistência ao ataque por sulfato de magnésio e à carbonatação que podem ser atenuados através da utilização de baixa relação água/cimento (a/c).

No entanto, ainda que recomendado como um bom mitigador da RAA, são poucos os estudos realizados analisando esse potencial do cimento, sendo possível encontrar apenas dois trabalhos sobre o tema, realizados por Min e Mingshu (1993) e Novak e Sommer (2012). Diante disso, justifica-se a necessidade do aprofundamento dos estudos neste campo. Esta pesquisa analisa o comportamento do CSS produzido com diferentes proporções de escória e sulfato de cálcio através do método acelerado de argamassa, buscando a melhor composição que proporcione a mitigação das expansões sem perda de resistência mecânica, através da produção de argamassas compostas por um agregado reativo proveniente da cidade de Pato Branco-PR. Os resultados obtidos do CSS tiveram como referência o cimento CP IV, indicado em casos de utilização de agregados reativos e o CP V, que apresenta um desempenho ruim na RAA.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de mitigação da reação álcali agregado do cimento supersulfatado em relação ao cimento Portland.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar o potencial de mitigação da reação álcali agregado do CSS com o cimento Portland CP IV e CP V;

- Avaliar a influência do teor de alumina e de cálcio do CSS e do cimento Portland no desenvolvimento da reação álcali agregado;
- Analisar a influência da reação álcali agregado no desenvolvimento da resistência mecânica ao longo do tempo em amostras de CSS e cimento Portland.

1.2 HIPÓTESE DE ESTUDO

A hipótese desta pesquisa é de que o maior teor de alumina no CSS atue na redução da dissolução da sílica reativa do agregado e que seu menor teor de cálcio forme CSH com baixa relação Ca/Si resultando na incorporação de álcalis no gel, inibindo o desenvolvimento da RAA.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico da reação álcali agregado

Deteriorações estruturais devido à RAA são observadas desde 1930 e relatadas por alguns pesquisadores, como Holden em 1935 e Blanks & Kennedy em 1955, quando na época, o meio técnico considerava os agregados como materiais inertes, não sabendo explicar a causa das anomalias (SILVA, 2007). A primeira vez que se observou deterioração por RAA foi na usina Hidroelétrica de Buck no New River, localizada no estado da Virgínia nos Estados Unidos, em 1922, com apenas 10 anos de construção. Desde então, ao longo das décadas de 1920 e 1930, observou-se manifestação de fissuras em outras obras ao longo da costa da Califórnia, como pontes, barragens e pavimentos, sem saber apontar a real causa do problema (VALDUGA, 2007). Em função dessas anomalias, deu-se início a busca pelo entendimento desse fenômeno.

O reconhecimento da RAA como um problema deletério responsável pelas expansões observadas nas obras na Califórnia foi identificado em 1940, quando Stanton estudou a manifestação de fissuras em pavimento de concreto nos Estados Unidos e descobriu que eram resultado de uma reação química entre os álcalis do cimento e a sílica presente no agregado que compõe o concreto, o que ficou conhecida como reação álcali agregado. Em seus experimentos, Stanton identificou eflorescências brancas que causaram fissurações muito parecidas com as apontadas nas obras na Califórnia, e desde então, detectadas em diversas regiões no mundo (HASPARYK, 2005; STANTON, 1940).

Já são cerca de 80 anos de pesquisa a respeito da RAA, onde a descoberta da reação entre os álcalis do concreto e a sílica do agregado desencadeou a busca por diversos pesquisadores, do entendimento do fenômeno, inicialmente tentando entender os mecanismos da reação, identificar quais minerais presentes nos agregados desencadeavam-na e com isso buscar soluções eficientes para tratar o problema.

A Figura 2 mostra fissurações típicas da RAA em um bloco de fundação e em uma barragem no Brasil.

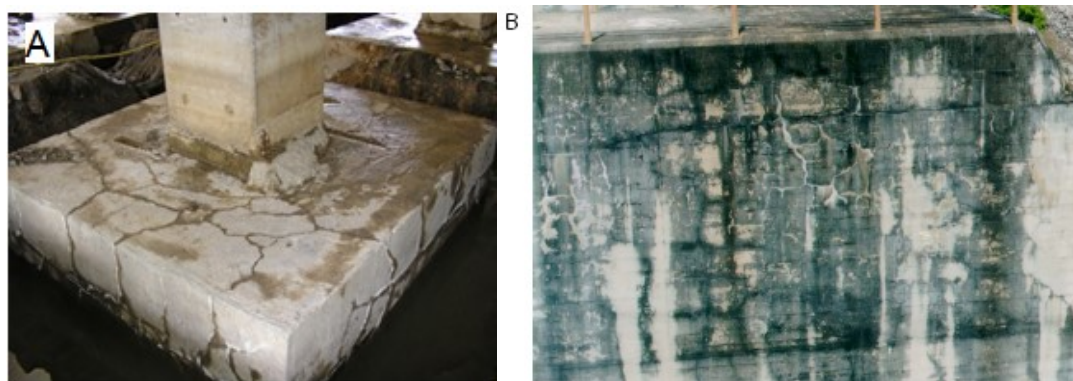


Figura 2. A) Bloco de fundação com fissuração mapeada típica da RAA. Fonte: Pecchioel et al. (2006); B) Barragem de Furnas- Vista lateral do pilar vertedouro. Fonte: SILVEIRA (2006)

No Brasil, segundo Silva (2007), pesquisas desenvolvidas nos anos 80 por Paulon (1981) já apontavam o Brasil como o quarto país no mundo com ocorrência de RAA. Andriolo (2000) estudou 830 barragens brasileiras quanto a RAA, onde pelo menos 19 foram afetadas pela reação. A CESP (Companhia Energética de São Paulo) foi a primeira empresa a identificar que suas construções poderiam vir a sofrer da ação, tomando medidas mitigadoras para evitar as fissurações na Usina Hidrelétrica de Jupia e nas construídas no mesmo período e em diante. Também são exemplos de medidas de prevenção as barragens Água Vermelha (construída entre 1975 e 1979), Salto Osório (construída entre 1971 e 1975), Tucuruí e Itaipu, onde foram utilizados materiais pozolânicos para inibir a expansão com o uso local de agregados reativos (BATTAGIN, 2016).

Os primeiros registros de pesquisa abordando o assunto no Brasil, foram realizados pelos pesquisadores do IPT, Gitahy e Ruiz em 1963, em um trabalho sobre reação expansiva álcali-agregado em concretos, levantando formas de tratar e mitigar as expansões e as possibilidades de ocorrência da reação (PAULON, 1981). Desde então, várias ocorrências de RAA em barragens foram relatadas, entre elas as barragens de Moxotó, Joanes II, Paulo Afonso, Sobradinho, entre outras.

Inicialmente, no Brasil, a RAA era um problema observado em obras hidráulicas e em construções com grandes volumes de concreto, até que em 2005 foi percebida pela primeira vez sua ocorrência em blocos de fundações de edifícios residenciais urbanos, como o Edifício Areia Branca, localizados na região metropolitana de Recife, em Pernambuco (MUNHOZ, 2007). A busca da causa da queda do Edifício Areia Branca apontou a RAA como possível causa do episódio, mais tarde sendo descartada. Com isso, vários outros prédios foram analisados e

mais de oito casos de blocos de fundação deteriorados pela RAA foram confirmados (BATTAGIN et al., 2016).

No entanto, apesar de não haver relatos onde os efeitos da ação tenham levado a inutilização das construções, exigem medidas corretivas e manutenção, o que se torna mais oneroso do que tomar medidas que evitem a ocorrência do fenômeno (BATTAGIN et al., 2016; ANDRADE, 2006).

2.2 Tipos de reação álcali agregado

A RAA é a reação química que ocorre internamente entre os hidróxidos alcalinos, presentes principalmente no cimento, e alguns minerais reativos dos agregados. O resultado é a formação de produtos capazes de expandir na presença de água, levando ao aparecimento de fissurações mapeadas e deslocamentos que podem levar ao comprometimento da estrutura de concreto (HASPARIK, 2005).

O fenômeno da reação pode se manifestar em questão de meses ou até mesmo anos. A velocidade e a extensão da deformação estão relacionadas a fatores como: teor de álcalis disponíveis, o tamanho e quantidade de agregados reativos, umidade, temperatura e restrições físicas a expansão que podem ser internas ou externas (MUNHOZ, 2007; RAJABIPOUR et al., 2015).

Embora conhecida desde os anos 40, a correlação entre a manifestação de fissuras e a RAA pode ser de difícil interpretação devido às várias outras patologias que apresentam a manifestação de fissuras, não tendo seus aspectos totalmente esclarecidos, o que leva pesquisadores a conduzirem pesquisas buscando o melhor entendimento dos mecanismos desta reação e com isso, possibilitar o desenvolvimento de medidas mais eficazes de prevenção, já que, uma vez desencadeada, não se conhece uma forma de eliminá-la, sendo possível aplicar somente medidas paliativas (COUTO, 2008; VALDUGA, 2007; HASPARYK, 2005; TIECHER, 2002; CHAPPEX, 2002; STANTON, 1940).

De acordo com a NRR 15577 (2018), a RAA se divide em dois tipos, em função do tipo de agregado envolvido reação.

Cada tipo de reação apresenta um mecanismo de expansão, de acordo com a composição química dos materiais expansivos resultantes. Com a classificação, busca-se facilitar o desenvolvimento de medidas preventivas e, quando necessário, de mitigação frente a anomalia.

A **reação álcali carbonato** é aquela onde os agregados carbonáticos, contendo calcário dolomítico, reagem com as hidroxilas dos álcalis (NBR 15577-1, 2018). Segundo Tiecher (2006), não há formação de gel, mas sim de outros compostos expansivos das rochas carbonáticas, onde a fissuração mapeada e deslocamento dos elementos são características na reação.

A **reação álcali sílica** é a mais comum das três e a que se desenvolve mais rapidamente. É definida pela NBR 15577-1 (2018) como a reação química entre a sílica reativa dos agregados e os álcalis do cimento, na presença do hidróxido de cálcio originado na hidratação do cimento, tendo como resultado um gel hidroscópico, que ao absorver água se expande, podendo ocasionar fissuras no concreto. Entre as sílicas reativas que participam do fenômeno é possível citar a sílica amorfa, tridimita, cristobalita e vidro vulcânico ou artificial.

2.3 Mecanismos da reação álcali sílica (RAA)

A RAA é um ataque interno no concreto que começa de dentro para fora e normalmente leva um período de 5 a 12 anos para se desenvolver, embora existam exceções. As informações disponíveis através dos estudos realizados permitem identificar quatro principais requisitos para o desencadeamento da RAA, que ocorre apenas em determinadas condições (BÉRUBÉ et al., 2002; FIGUEIRA et al., 2019; RAJABIPOUR et al., 2015), sendo eles:

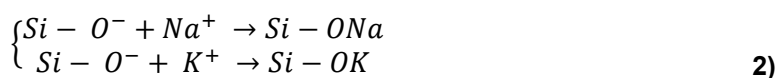
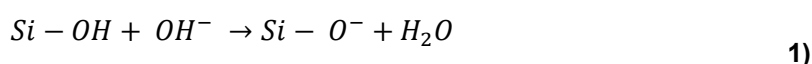
- I. a presença de um agregado reativo, fonte de sílica reativa;
- II. a alta concentração de álcalis na solução dos poros, mais precisamente de íons hidroxila;
- III. alta umidade nos poros do concreto, onde a reação ocorre, permitindo também a absorção de água para expansão do gel;
- IV. presença de cálcio solúvel, geralmente a portlandita, que reage com a sílica dissolvida na solução dos poros, formando o gel expansivo.

Quanto maior a concentração de álcalis na solução dos poros, mais grave é a reação e na ausência de algum dos quatro fatores, ela não ocorre (PAN *et al*, 2012; BATTAGIN, 2016; FIGUEIRA et al., 2019). Como resultado, tem-se a formação de um gel de sílica que absorve água e se expande, gerando pressão interna no

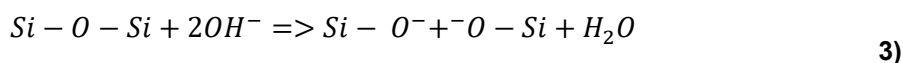
concreto e com isso resulta nas fissurações observadas nas obras, onde a RAA foi identificada.

A hidratação do cimento Portland tem como produto a formação de silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio, que liberam íons hidroxila. Os íons hidroxilas presentes na solução dos poros contribuem para aumento do pH, levando a valores de pelo menos 12,5, já os álcalis solúveis elevam o pH a 13 ou mais (Ferraris, 1995), o elevado pH aumenta a dissolução da sílica e dá início à reação.

Diversos autores apresentam a mesma explicação a respeito da química da RAA (HASPAKYK, 2005; TIECHER 2006; VALDUGA, 2007; COUTO, 2008) onde em um primeiro estágio ocorre a reação ácido-base, onde a sílica adquire caráter ácido e a solução dos poros, básico. Com a solução altamente alcalina, os íons hidroxilas atacam o grupo silanol presente na superfície da sílica e libera água (Equação (1)). Para manter o equilíbrio, os cátions presentes no meio (Na^+ e K^+) são atraídos, se incorporando a estrutura do grupo ao se espalhar sobre os íons hidroxilas, esta reação resulta na formação de um gel sílico alcalino (Equação (2)). Segundo Ferraris (1995), a migração dos cátions Na e K ocorre de forma lenta, com isso o gel formado pode incorporar os íons de Ca^{2+} , desta forma, o gel formado apresenta composição química variável, o que interfere na mobilidade e fluidez do gel, dificultando o esclarecimento do seu mecanismo de expansão.



Segundo Hasparyk (2005), em um segundo estágio, os íons hidroxila em excesso, que estão sempre se renovando na reação, atacam o grupo siloxano (Si-O-Si), rompendo suas ligações e o substitui por pares de SiO^- (Equação (3)), com isso, em um ambiente de alto pH, o silicato que representa o ácido ortosilicioso (H_2SiO_4) fica em solução.



O comportamento do gel sílico alcalino formado depende da sua composição química, o gel com potencial deletério é hidrófilo e ao absorver umidade aumenta seu volume, gerando pressão interna que pode danificar o concreto. Glasser (1992) relata que o gel formado é pouco solúvel e se concentra ao redor dos agregados, no entanto, um gel com característica mais fluida pode se formar e exsudar na superfície do concreto durante o processo de expansão, como registrado por Hasparyk (2005), onde se analisou testemunhos de concreto provenientes da barragem de UHE-Furnas de São José da Barra-MG, construída entre 1950 e 1963. Com a inspeção realizada no local foi possível verificar a formação de gel produzido pela RAA, visivelmente exsudando a partir da fissura causada pela expansão, como mostra a Figura 3.



Figura 3. Detalhe do gel exsudado através da fissura na superfície do concreto.
Fonte: HASPARYK (2005).

Através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é possível observar as características morfológicas do gel da RAA, que pode ser encontrado na forma rendada, gretado e cristalizado (também em forma de rosáceas), como apresentado na Figura 4, 5, 6 e 7, respectivamente. (HASPARYK, 2005).

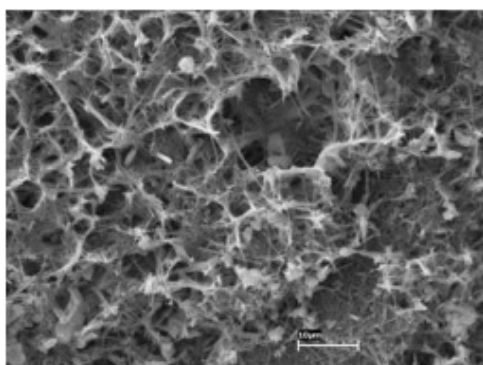


Figura 4. Gel rendado.
Fonte: HASPARYK, 2005.

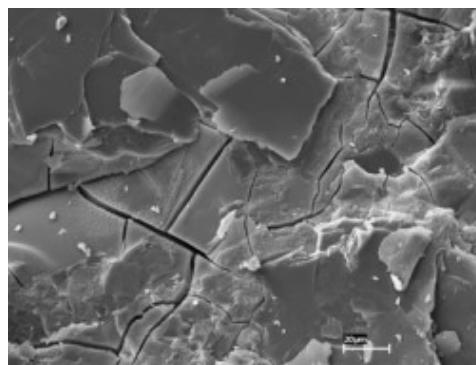


Figura 5. Gel gretado.
Fonte: HASPARYK, 2005.

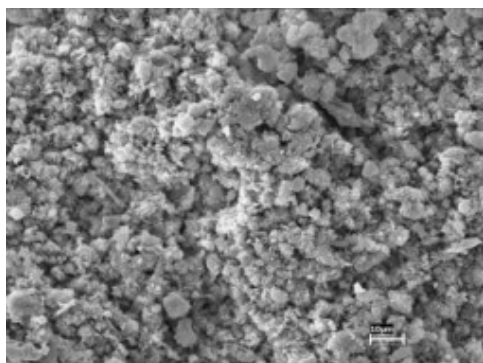


Figura 7. Gel cristalizado em forma de rosáceas.
Fonte: ARRAIS, 2011.

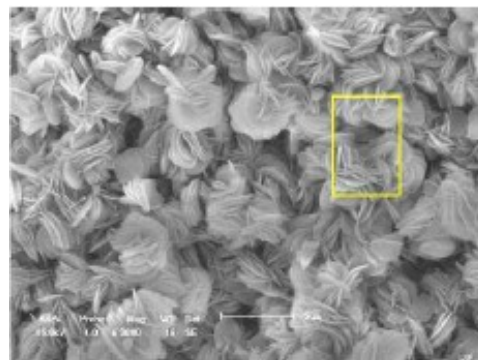


Figura 6. Gel cristalizado.
Fonte: HASPARYK, 2005.

García-Lodeiro; Palomo; Fernández-Jiménez (2007) identificaram produto de RAA em suas amostras de argamassa em forma de pseudo-rosáceas, como observado na Figura 9.

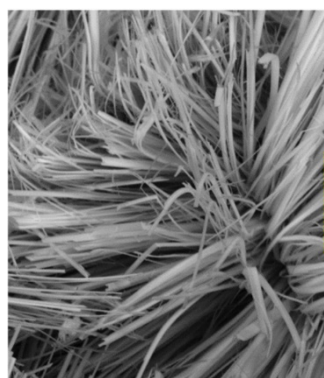


Figura 8. Produto de RAA com morfologia em forma de agulha.
Fonte: SHI; MA; LOTHENBACH (2021)

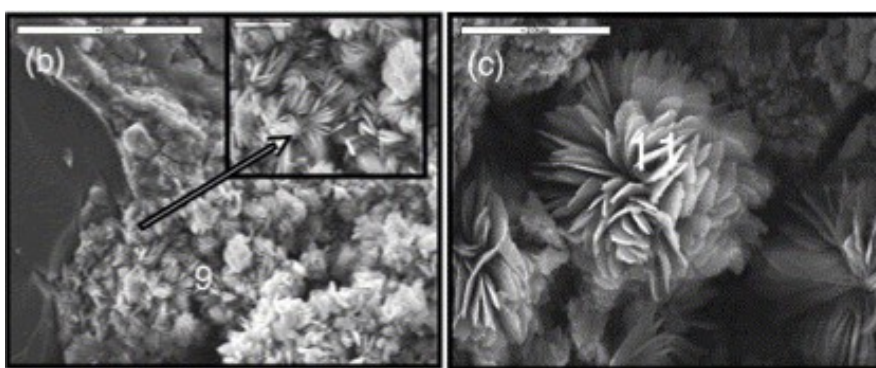


Figura 9. Produto de RAA identificado como pseudo-rosáceas.
Fonte: GARCÍA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ (2007)

Leemann et al. (2020) encontrou em suas amostras (Figura 10) géis de morfologia semelhante a García-Lodeiro; Palomo; Fernández-Jiménez (2007) e os identificou como produtos cristalinos da RAA consistindo em plaquetas e afirmam que a morfologia dessas plaquetas pode variar até mesmo no mesmo agregado ou dentro do mesmo poro.

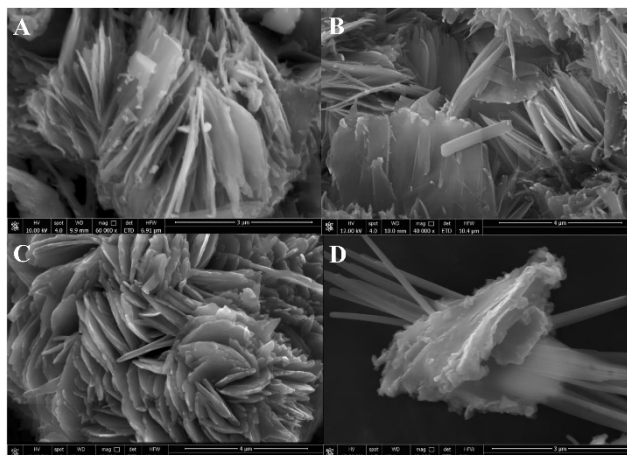


Figura 10. Gel cristalino da RAA. Fonte: (LEEMANN et al., 2020)

Já Fernandes(2009) identificou gel da RAA em suas amostras na forma esponjoso, como observado naFigura 11.

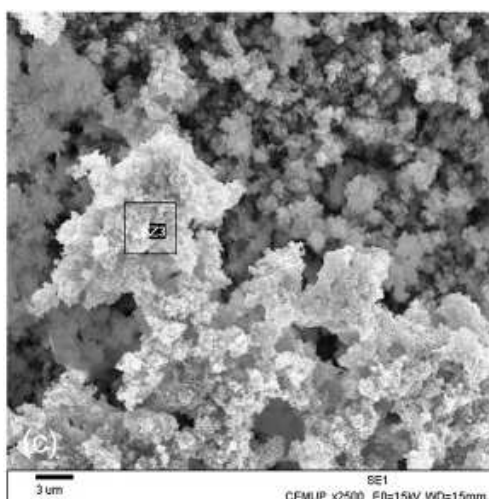


Figura 11. Gel esponjoso da RAA. Fonte:(FERNANDES, 2009)

Com a análise de MEV aliado à espectrometria por energia dispersiva de raios-x é possível obter a composição química para pontos específicos das imagens do MEV. De acordo com Tiecher (2006) e Hasparyk (2005), a composição química do gel é cálcio-silico-alcalina, podendo o álcali ser o sódio ou potássio.

No geral, o teor de cálcio aumenta conforme a localização do gel se afasta do agregado, por exemplo, um gel localizado em poros e rachaduras contém uma quantidade maior de cálcio em comparação com o gel nos agregados reativos (FERNANDES, 2009; THAULOW, JAKOBSEN e CLARK, 1996).

2.4 Medidas de prevenção da RAA

A necessidade de mitigação e tratamento dos danos causados pela reação é mais onerosa quando comparada a medidas que podem ser tomadas para evitar o fenômeno. Visando isso, em 2008 a Associação Brasileira de Normas Técnicas desenvolveu uma norma que se divide em 6 partes e se trata de uma guia de prevenção a RAA, orientando a condução de análises para avaliação da reatividade do agregado e medidas a serem adotadas quando a substituição do agregado reativo por um não reativo é inviável.

A medida mais eficiente para evitar a RAA é o uso de um agregado não reativo, o que nem sempre é uma opção prática e viável para a obra. Nestes casos a principal medida a ser tomada é a utilização de um cimento com baixo teor de álcalis, que se dá através do emprego do cimento Portland com adições, como a escória de alto forno, em teores que garantam que o teor de álcalis fornecido não leve a formação de gel expansivo (MUNHOZ, 2007). A utilização de valores adequados das adições pode reduzir significativamente e até mesmo controlar a expansão causada pela reação, que segundo Tiecher (2006), ao reagirem com o hidróxido de cálcio presente do cimento resultam na diminuição do pH da solução dos poros, podendo assim, inibir a reação.

No Brasil as adições utilizadas são adicionadas diretamente na produção do cimento Portland com porcentagens variadas. Entre os cimentos produzidos, dois se destacam quanto a mitigação da RAA por possuírem alta porcentagem de adição, são eles o cimento de alto forno (CP III) e o cimento pozolânico (CP IV), como observado por Tiecher (2006), que realizou um estudo onde os resultados mostraram que tanto o cimento CP IV quanto o cimento CP III geram menores expansões quando comparados a outros tipos e recomenda que em grandes obras, na presença de um agregado reativo, seja empregada a utilização do cimento CP IV. A Tabela 1 a seguir apresenta os cimentos produzidos comercialmente no Brasil, assim como as porcentagens de composição.

Tabela 1. Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.

Designação normatizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clinker + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material Carbonático	
Cimento Portland comum	CP I			95 – 100		0 – 5		
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10	
Cimento Portland composto com escória de alto forno	CP II-E			51 – 94	6 - 34	0	0 – 15	
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z	25, 32 ou 40	RS ou BC	71 – 94	0	6 - 14	0 – 15	
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25	
Cimento Portland de alto forno	CP III			25 – 65	35 - 75	0	0 – 10	
Cimento Portland Pozolânico	CP IV			45 – 85	0	15 - 50	0 - 10	
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	ARI		90 – 100	0	0	0 - 10	
Cimento Portland Branco	Estrutural	CB		25, 32 ou 40	75 – 100	-	-	0 - 25
	Não estrutural			-	-	50 – 74	-	-

Fonte: NBR 16697 (2018).

A escória de alto forno é um produto eficiente na redução da RAA. Estudos mostraram que substituições em teores de pelo menos 50% no cimento Portland, reduz significativamente a expansão por RAA do concreto (FIGUEIRA et al., 2019; HESTER; MCNALLY; RICHARDSON, 2005). Na análise de durabilidade do concreto contendo 50% e 65% de substituição por escória de alto forno, observou-se menor expansão nos corpos de prova com 65% de escória (BOUIKNI; SWAMY; BALI, 2009). No entanto, nenhum limite de teor de uso da escória para mitigar a RAA foi estabelecido.

Outras pozolanas, como a cinza volante, também apresentam comportamento eficiente quanto a mitigação da RAA, apresentando os melhores resultados quando usadas em teores de 25% a 35%, a sílica ativa em teores de 10 a 12% e o metacaulim em teores em torno de 10% (MALVAR et al., 2002).

A fissuração do concreto proveniente da RAA também pode ser evitada ou significativamente reduzida dependendo do grau de reatividade do agregado, com a utilização de um cimento com alto teor de alumina, estudos como os de Hunger (2007) e Rajabipour et al. (2015) mostram que sua presença no cimento leva a formação de zeolitas que atuam como uma película protetora nos agregados,

promovendo um envelopamento do agregado.

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RAA

Existem alguns fatores que podem interferir na RAA, entre eles estão as condições ambientais em que a estrutura se encontra, os materiais constituintes do concreto e outros agentes que podem agir afetando a velocidade da reação (PAN *et al*, 2012). Com relação ao concreto, Wang e Gilliot (1991) citam entre os principais fatores o teor de álcalis do cimento, teor de cálcio, teor de alumina, agregado e porosidade da peça.

2.5.1 Teor de álcalis

Os álcalis são essenciais para formar produtos RAA, pois os produtos não se formarão na sua ausência, mesmo que o hidróxido de cálcio possa manter um alto nível de pH. É necessário uma concentração suficiente de álcalis na solução dos poros em um nível onde os agregados são atacados de forma significativa e para manter o ataque ao longo do tempo (RAJABIPOUR *et al.*, 2015).

Segundo Tiecher (2006), a principal fonte de álcalis do concreto é o cimento, que provém do processo de calcinação do clínquer. Os álcalis influenciam desde a clínquerização até o processo de hidratação do cimento, interferindo no desenvolvimento de resistência da pasta, na sua permeabilidade, durabilidade e retração, além de controlar o pH do concreto, onde os executados com cimento de baixo teor equivalente alcalino possuem pH entre 12,7 e 13,1, já cimentos com alto teor de álcalis resultam em pH do concreto a valores entre 13,5 e 13,9. Isso significa que a concentração de íons hidroxilas em concretos produzidos com cimento de alto teor de álcalis pode ser 10 vezes maior que em concretos executados com cimento de baixo teor alcalino. Um alto teor de hidróxidos alcalinos presentes na solução resulta em um elevado pH e aumenta a solubilidade de certos tipos de sílica do agregado, potencializando a reação RAA (MADUREIRA, 2007; TIECHER, 2006).

Dessa forma, uma das maneiras de evitar que a RAA seja desencadeada é a limitação do teor de álcalis no cimento. Segundo Shi e Lothenbach (2019) pequenas quantidades de álcalis não levam à formação de produtos RAA, pois os álcalis podem ser incorporados na CSH sem danificar sua estrutura intrínseca. De acordo

com a ACI Committee 221 (1998), o teor alcalino pode ser medido através da Equação (4), em relação ao teor de óxido de sódio ou potássio e expresso como o equivalente alcalino em sódio

$$Na_2O \text{ equivalente } (\%) = Na_2O (\%) + 0,658 K_2O (\%) \quad 4)$$

A ACI Committee relata que cimentos com baixa alcalinidade, com teores abaixo de 0,6% para Na_2O_{eq} podem ser usados para mitigar a deterioração do concreto na presença de agregado reativo. No entanto, cita pesquisas como as de Hadley (1968), Lerch (1959), Stark (1980), Tuthil (1982), Ozol e Dusenberry (1992), onde se relatou a ocorrência de expansões excessivas, mesmo com a utilização de cimento de baixa alcalinidade. Com base nos estudos, observou-se que argamassas contendo teor equivalente de 0,4% ou menos não apresentaram expansões excessivas.

No entanto, apesar de o cimento ser a principal fonte de álcalis do concreto, não é a única. Pesquisas relatam que alguns tipos de agregados também podem liberar álcalis, porém, sua liberação é influenciada pela finura do agregado e temperatura (LU et al., 2006; BÉRUBÉ et al., 2002).

2.5.2 Teor de cálcio

A presença de cálcio parece ser essencial para expansão do concreto devido a RAA, apesar de vários estudos abordarem sua influência no processo de formação e expansão do gel, seu papel ainda não está totalmente claro na literatura.

Leemann et al. (2011) observaram que o teor de portlandita presente nos poros influencia na quantidade de sílica dissolvida. Segundo os autores, na RAA a sílica é dissolvida até atingir saturação na solução dos poros e na presença de portlandita reage formando CSH com baixa relação Ca/Si contendo álcalis. Com a formação do novo composto a sílica é removida da solução, permitindo que a sua dissolução continue até que a portlandita seja totalmente consumida.

Ao estudar o gel identificado na estrutura de quatro obras diferentes com ocorrência de RAA, Fernandes (2009) identificou gel expansivo nas quatro estruturas, mesmo quando uma baixa ou nenhuma quantidade de cálcio foi

encontrada, não encontrando relação entre a presença de cálcio com o agravamento das expansões.

Shi et al. (2019) mostraram que os produtos de RAA se formam em condições de baixa concentração de cálcio e altas concentrações de álcalis, enquanto em corpos de prova com relação Ca/Si inicial alta e relação álcali/Si baixa há formação de CSH. Os autores afirmaram que a estrutura dos produtos de RAA pode ser alterada pela absorção de cálcio adicional da pasta de cimento resultando na formação de CSH com baixa relação Ca/Si e composição química semelhante ao do produto formado na reação pozolânica, apresentando alta rigidez e baixa expansão.

No entanto outros autores como Kawamura e Iwahori (2004); Bleszynski e Thomas(1998); Thomas et al. (1991), evidenciaram a importância da presença dos íons de cálcio na expansão do gel, que reage com a sílica reativa dissolvida formando uma borda deletéria de gel de RAA rica em cálcio principalmente em torno dos agregados.

Há evidências de que a simples formação do gel de RAA nem sempre resulta em danos ao concreto, tudo depende da composição química do produto, que é variável e pode se comportar de maneiras diferentes. Kawamura e Iwahori (2004) observam que géis ricos em álcalis e pouco cálcio se comportam como um líquido escoável que permanece nos poros sem causar danos. Assim como Thomas et al. (1991), os autores relatam que o gel de RAA formado é fluido e se dispersa na matriz do concreto, porém, o cálcio substitui os álcalis do gel, transformando-o em um produto viscoso e expansivo ao absorver água. Bleszynski e Thomas (1998) verificaram um considerável aumento na expansão de concretos ao adicionar cálcio na mistura dos materiais.

Da mesma forma, Figueira *et al.* (2019) relata que a presença de íons de cálcio leva a formação de silicatos de cálcio, sódio e potássio com composição química variável. Este é capaz de absorver água e se expandir gerando pressão interna e consequentemente, expansão do concreto.

A proporção entre o Ca e Si que compõem o gel da RAA pode determinar o seu nível de expansão. Leemann et al. (2011) relacionou a absorção de água, química e física, pelo gel com o teor de cálcio em sua composição, como mostra a Figura 12.

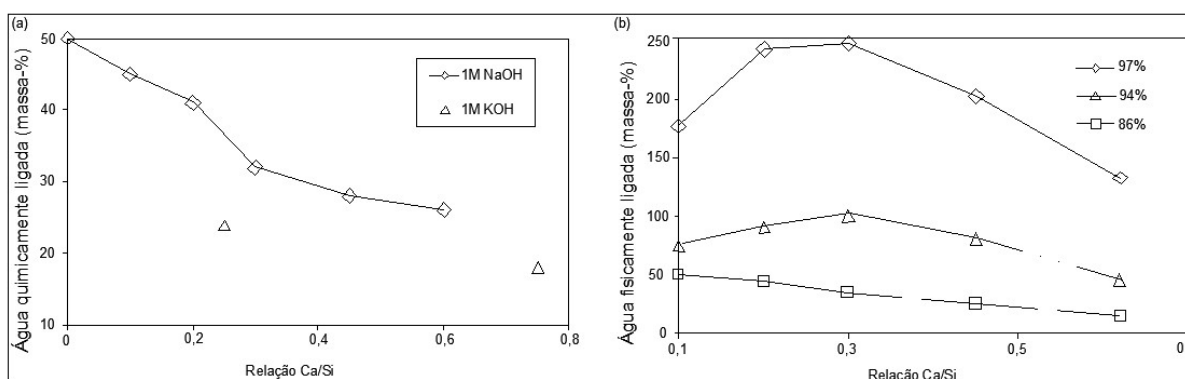


Figura 12. Capacidade de ligação de água pelo gel de RAA em relação à proporção Ca/Si. (a) água ligada quimicamente. (b) água ligada fisicamente. Fonte: LEEMANN et al. (2011).

Os resultados mostraram que a ligação química de água (Figura 12a) reduziu com o aumento do teor de cálcio do gel. Já a maior quantidade de água fisicamente ligada (Figura 12b) foi observada com a relação Ca/Si entre 0,2 e 0,3, mostrando que a incorporação de cálcio no gel reduz sua expansão.

Hong e Glasser (1999) afirmaram que a capacidade de ligação de álcalis depende principalmente da relação Ca/Si do CSH. Segundo Monteiro et al. (1997) a produção de CSH com baixa relação Ca/Si favorece a incorporação de álcalis, reduzindo sua disponibilidade para o desenvolvimento da RAA. Os autores afirmam que quando a relação Ca/Si do CSH é alta sua superfície fica carregada positivamente os álcalis (Na^+ e K^+) permanecem em solução e não são adsorvidos, já com a relação Ca/Si baixa a carga da superfície do CSH fica negativa e os cátions alcalinos são incorporados. A Figura 13 mostra a relação entre a proporção Ca/Si do CSH com a incorporação de álcalis.

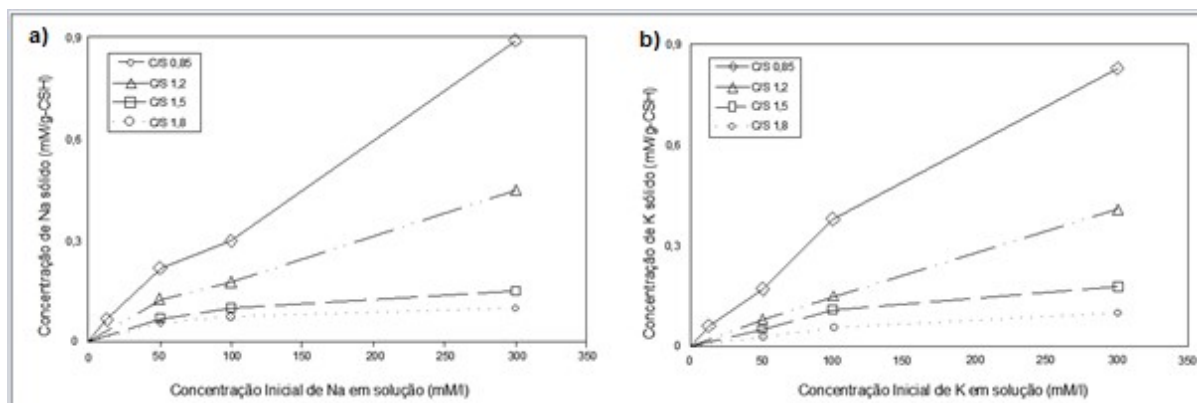


Figura 13. A concentração de (a) sódio e (b) potássio na CSH em relação a Ca/Si. Fonte: HONG; GLASSER (1999).

Pode-se observar que o CSH com baixa relação Ca/Si tem maior capacidade de incorporação de álcalis, tanto de sódio como de potássio, quando comparado ao CSH com relação mais baixa.

A relação Ca/Si das adições usadas no cimento também interfere na expansão devido à RAA. Ao estudar o efeito da composição química de cinzas volantes na expansão da RAA, Shehata e Thomas (2000) chegaram à conclusão que as adições com maior relação Ca/Si apresentaram maiores expansões quando comparadas às cinzas com proporções menores de Ca/Si.

Saha e Sarker(2016) analisaram as expansões devido à RAA em duas misturas de argamassas compostas por cimento com 30% de substituição por escória de alto forno e cinza volante. Os resultados mostram que a argamassa produzida com cimento de escória apresentou maiores expansões quando comparada à que utilizou cinza volante, o que os autores atribuíram ao maior teor de cálcio presente na escória (41%) em comparação com a cinza volante (0,6%), onde o maior teor de cálcio aumentou o teor de álcalis disponível, resultando no aumento das expansões.

Com base nisso, observa-se que o teor de cálcio presente em concretos e argamassas tem um papel importante no desenvolvimento da RAA. A redução de portlandita leva à mitigação da expansão, no entanto, um concreto com teor muito baixo leva um desenvolvimento de resistência mecânica muito lento, desta forma, é necessário estabelecer uma quantidade adequada de portlandita presente na mistura, de forma a encontrar um equilíbrio para evitar o desencadeamento da RAA sem o comprometimento das propriedades mecânicas do concreto.

Segundo Hasparyk (1999), uma das características do gel expansivo da RAA, é sua baixa relação Ca/Si, em sua pesquisa, a autora afirma que géis com relação abaixo de 1,5 se caracterizam como produtos da RAA, já com uma relação acima de 1,5 o produto pode ser identificado como CSH. No entanto, enquanto o CSH do cimento Portland possui a relação Ca/Si em cerca de 1,8, em cimentos de escória essa relação cai para entre 1 e 1,2 a medida que o teor de escória aumenta o valor reduz, devido a incorporação de alumina (RICHARDSON, 2000). Desta forma, a teoria de Hasparyk (1999) para caracterização do gel se torna inadequada para cimentos como o CSS, que possui pouca Portlandita e produz CSH com baixa relação Ca/Si, como evidenciado por Masoudi (2018) em sua pesquisa, onde o CSH sintetizado na hidratação do CSS estudado apresentou relação Ca/Si igual a 1, devendo favorecer a incorporação de álcalis em sua composição.

2.5.3 Teor de alumina no cimento

A influência da presença de alumina solúvel na RAA vem chamando atenção em pesquisas que utilizam adições minerais na tentativa de mitigar o fenômeno deletério. Thomas (2011) relata que o aumento, a longo prazo, da concentração de OH^- parece ser evitado em pastas contendo 5% de sílica ativa com a adição de escória (25%) ou cinza volante (15%). O autor supõe que a presença de alumina na adição mineral possivelmente contribua de alguma forma para impedir a liberação de álcalis de volta à solução porosa, porém afirma que o papel da alumina ainda não é bem compreendido e pesquisas mais aprofundadas precisam ser realizadas.

De acordo com Hunger (2007) e Rajabipour et al. (2015) o alumínio liberado na solução influencia a concentração de sílica por diferentes mecanismos, podendo ser eles:

- Processo de adsorção de alumínio na superfície de sílica, reduzindo a taxa de dissolução da sílica reativa;
- Processo de formação de alumino-silicato (zeolitas) na superfície da sílica e na solução;
- Reduzir o pH da solução de poros pela formação de CASH, o que melhora a capacidade de ligação de álcalis sobre CSH;

- Reação e consumo de portlandita para formar fases de aluminato de cálcio;
- Redução da expansão do gel.

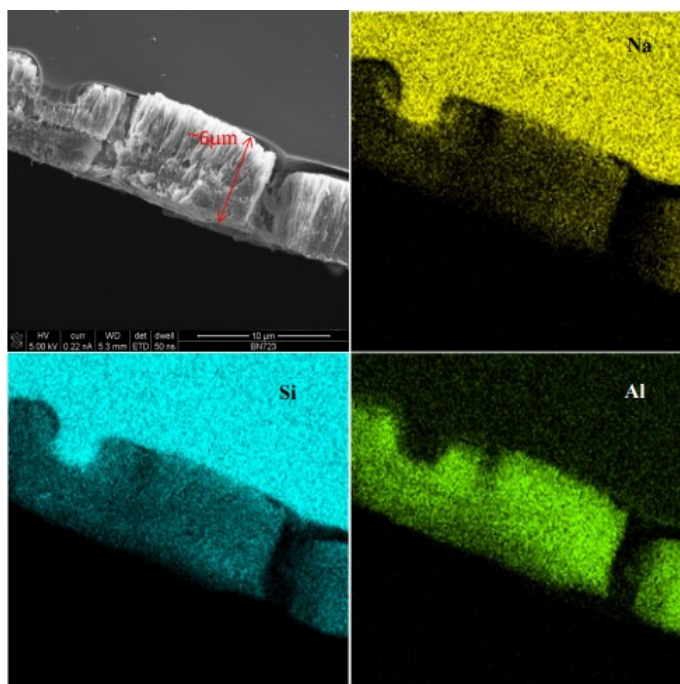
O efeito da alumina na dissolução da sílica reativa foi estudado por Chappex e Scrivener (2012) após ficar evidente que adições minerais sílico aluminosas são mais eficientes que as que contêm apenas sílica. Acreditava-se inicialmente que a incorporação de alumínio em CSH pudesse reduzir a concentração alcalina da solução dos poros de pastas de cimento, levando a redução do pH e então a mitigação da RAA. No entanto, no estudo sobre o efeito da incorporação de alumínio e sílica em CSH na composição da solução de poros em pastas de cimento contendo adições minerais, a hipótese foi descartada. Na pesquisa diferentes pastas com sílica ativa e metacaulim foram moldadas, a fim de obter a mesma razão Ca/Si do CSH, mas com diferentes teores de alumínio. Os resultados confirmam a maior eficiência de mitigação da RAA por materiais contendo alumina, e mostram que a sílica reativa é a responsável pela redução da razão Ca/Si do CSH e, conseqüentemente, redução do pH da solução porosa. Quanto ao alumínio, os autores acreditam que a sua presença na solução dos poros atua na inibição da dissolução da sílica reativa dos agregados, levando a redução da expansão.

Chappex e Scrivener (2012) dão continuidade à pesquisa e verificam que em materiais com adição rica em alumínio, como o metacaulim e escória de alto forno, a concentração de alumina nos poros também é maior. Através da análise da solução dos poros, os autores constataram que a presença de Alumina é capaz de reduzir as expansões da RAA, reforçando a hipótese de que a alumina atua reduzindo a dissolução da sílica reativa. Os autores fundamentam a hipótese com base em estudos marinhos e geológicos que estudam o efeito do alumínio na dissolução de sílica amorfa.

Iler (1973) estudou o efeito da alumina adsorvida na solubilidade da sílica amorfa na água e mostra que menos de uma camada atômica de alumínio incorporada na superfície da sílica já é o suficiente para reduzir significativamente a dissolução da sílica. Koning et al. (2007) analisaram a incorporação de alumínio em frústulas de diatomáceas e tiveram como resultado a redução da taxa de dissolução dela. De acordo com Iler (1973), o alumínio é incorporado na forma de tetraedro, com quatro átomos de oxigênio, e resulta na formação de aluminossilicatos na

superfície das partículas, gerando uma carga negativa que repelem os íons hidroxilas, inibindo a dissolução das partículas siliciosas.

Desta forma, Shafaatian (2012) avaliou o efeito do teor de alumina na RAA ao adicionar teores de hidróxido de alumínio nas misturas de argamassa através das análises microestruturais, como apresentado na Figura 14, desenvolvida através do mapeamento dos componentes químicos identificados na análise de EDS.



**Figura 14. Mapeamento dos elementos Al, Si e Na no produto da reação superficial das lâminas de vidro na presença de $\text{Al}(\text{OH})_3$.
Fonte: SHAFATIAN (2012).**

Observou-se que a adição de alumina criou uma camada de aluminossilicato na superfície do agregado, evitando a dissolução da sílica pelos íons hidroxilas, resultando da redução da expansão devido a RAA (SHAFATIAN, 2012). De acordo com Rajabipour et al. (2015) a reação entre a alumina e a sílica resulta na precipitação de zeólita, que promove uma espécie de envelopamento do agregado, atuando como uma barreira entre os íons hidroxilas e a sílica do agregado.

Szeles et al. (2017) comprovaram a eficiência da alumina na mitigação da RAA em concretos com agregados reativos. Os mecanismos de ação identificados pelos autores foram:

- I. Redução do pH e do teor de álcalis da solução dos poros do concreto;

- II. Consumo e redução de portlandita do concreto e redução do cálcio dissolvido na solução dos poros do concreto;
- III. Redução da dissolução da sílica, reduzindo o dano ao agregado.

Chappex e Scrivener (2012) analisam também o efeito do alumínio na dissolução da sílica amorfa e afirmam que a alumina não é apenas adsorvida da superfície da sílica, ela é incorporada na estrutura da sílica amorfa, mesmo em regiões de alta alcalinidade. Nessas condições, a incorporação da alumina é um processo relativamente lento, que ocorre em um período entre 20 e 28 dias, e depois se estabiliza, porém, a redução da expansão já pode ser observada em idades inferiores aos 20 dias. Os resultados das pesquisas ainda mostram que a dissolução da sílica não depende da concentração da alumina na solução porosa, mas a incorporação do alumínio depende da alcalinidade da solução, que aumenta conforme a concentração de NaOH diminui, o que os autores relacionam ao fato de a alumina ser mais solúvel em meios fortemente alcalinos.

Szeles et al. (2017) estudou o comportamento de prismas de concreto moldados a partir de cimentos com 20 e 30% de substituição por alumina (80 CP-20% e 70 CP-30%, respectivamente), a Figura 15 mostra a expansão dos prismas comprados a amostra de controle composta de 100% de cimento Portland (100% CP).

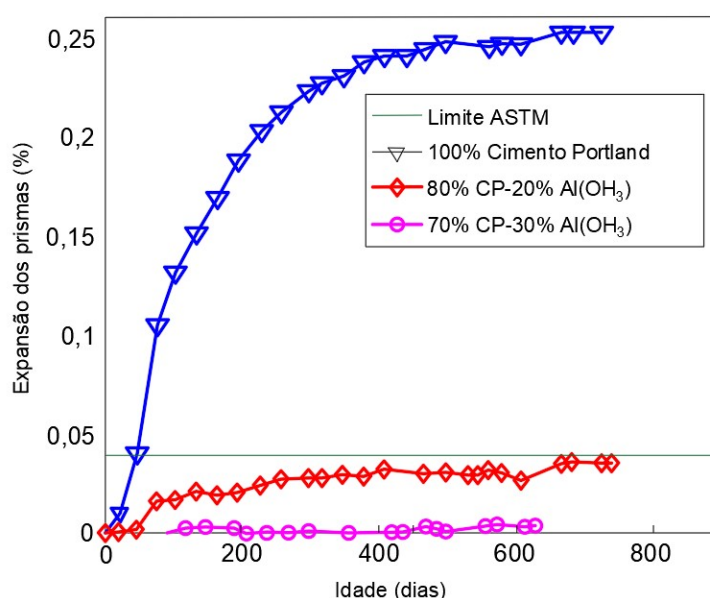


Figura 15. Expansão dos prismas de concreto produzidos de cimento com substituição parcial por Al.

Fonte: SZELEZ et al., 2017

Os resultados mostram que as duas amostras contendo alumina tiveram uma redução significativa de expansão quando comparada a amostra de controle, sendo que uma substituição de 20% de alumina já foi o suficiente para manter a expansão abaixo do limite normativo (0,04%).

Na Figura 16 é possível observar as imagens obtidas através do ensaio de MEV aos 630 dias de ensaio.

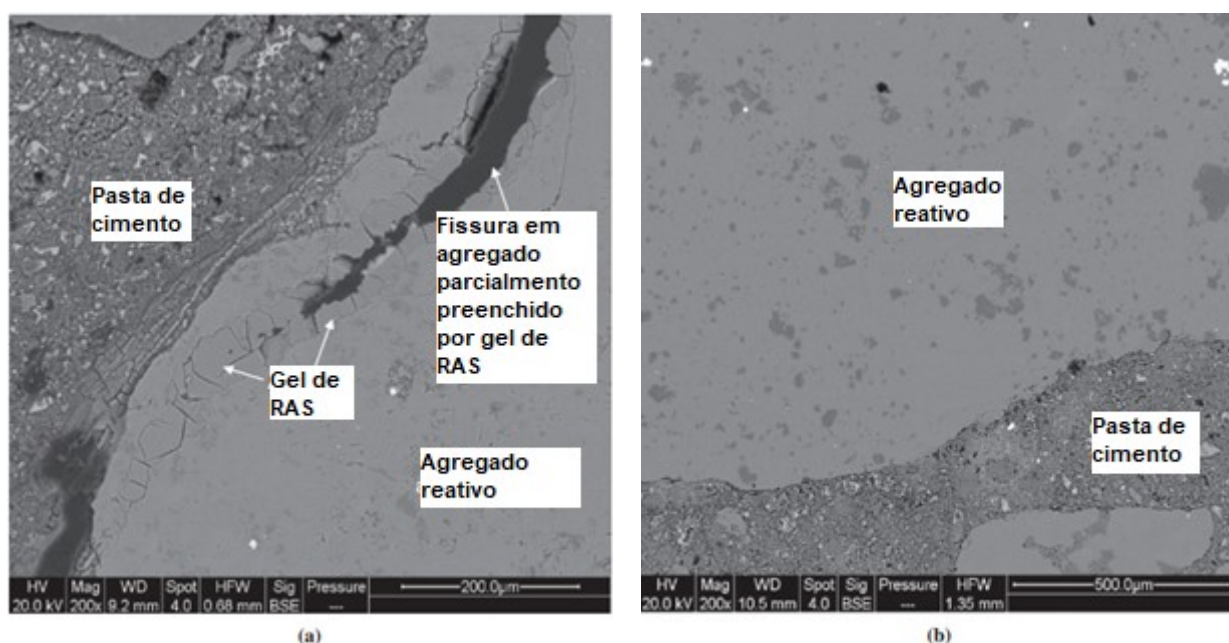


Figura 16. MEV das amostras. (a) Amostras compostas de 100% cimento Portland. (b) Amostra composta de 80% cimento portland e 20% Alumina.

Fonte: SZELS et al. (2017).

A Figura 16a apresenta uma amostra 100% cimento Portland altamente degradada, e na figura b se observa a amostra 80% CP- 20%Al não danificada. A análise de EDS foi aplicada a amostra 80% OPC- 20%Al para identificar formação de gel de RAA, no entanto nenhum sinal de formação do gel foi encontrado, o que reforça que a alumina é eficiente na mitigação da reação.

Em 2019 Hay e Ostertag adotaram o ensaio acelerado das barras de argamassa para analisar o efeito da adição de alumínio nas expansões da reação álcali sílica. A figura mostra as expansões de barras de argamassa contendo inclusão de pó de alumínio em 0,125, 0,25 e 0,5 vol%.

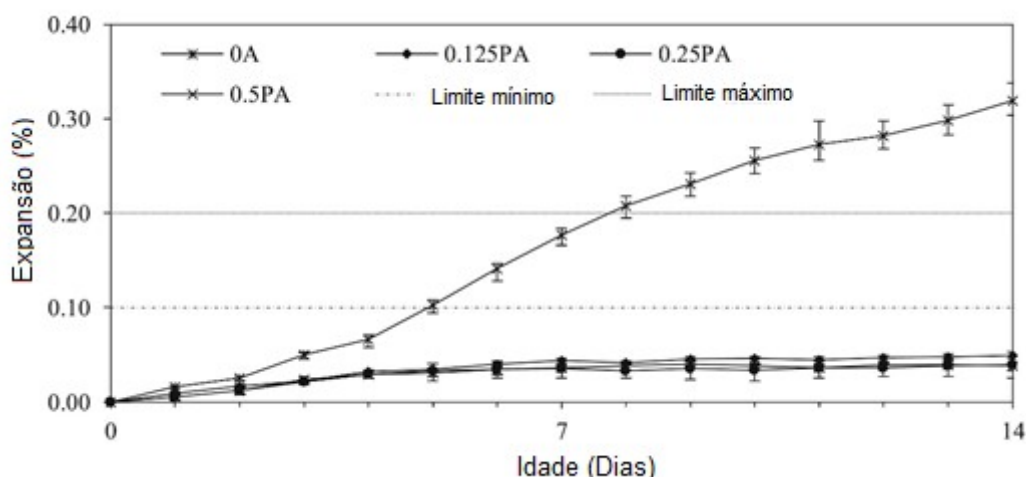


Figura 17. Resultados de expansão de amostras com pó de alumínio.
Fonte: HAY; OSTERTAG (2019)

Observa-se que a adição de pó de alumínio limitou a expansão de todas as misturas a menos de 0,10% em 14 dias de ensaio, os pesquisadores atribuíram o efeito a formação de vazios de ar distribuídos nas matrizes com presença de pó de alumínio, proporcionando espaço para acomodação do gel da RAA, no entanto, o principal mecanismo de mitigação foi o controle de dissolução dos agregados reativos.

Hay e Ostertag (2021) estudaram a influência do alumínio na expansão de barras de argamassa através da substituição parcial do cimento por cinza volante comparado a corpos de prova de controle de cimento Portland sem substituição. A Figura 18 mostra os resultados obtidos aos 730 dias de ensaio da expansão da argamassa produzida com 25% de cinza volante em comparação a de controle.

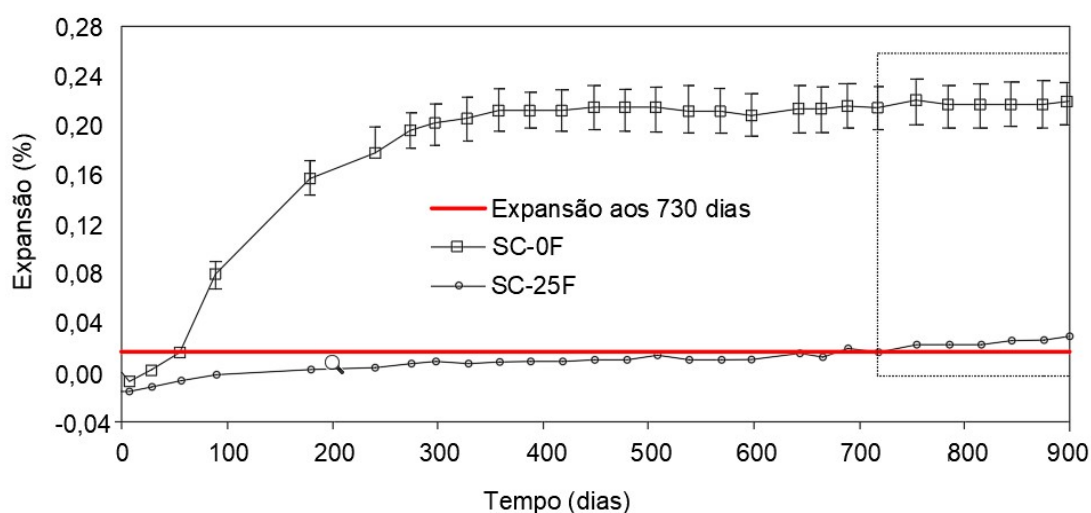


Figura 18. Resultados de expansão das barras de argamassa.
Fonte: HAY; OSTERTAG (2021).

Observa-se que a cinza volante contribui para a mitigação da expansão, o que os autores atribuem à atuação da alumina por meio de um mecanismo de controle dissolução, onde o alumínio em ambientes altamente alcalinos e saturados de cálcio foi incorporado à estrutura da sílica amorfa, levando à inibição da sua dissolução. Outro fator identificado foi a repulsão dos íons hidroxila pelo alumínio silicato carregado negativamente.

2.5.4 Agregado

Os álcalis podem ser encontrados em agregados reativos e não reativos, sua mineralogia possui grande influência na RAA, podem apresentar composição química variada, influenciando na composição química do gel formado na reação, que não possui estequiometria definida, levando a variações em sua estrutura química e morfologia (COUTO, 2008). O estudo feito por Strack et al. (2020) mostra que a estrutura do gel formado pela RAA varia significativamente dependendo da mineralogia do agregado.

O tipo de sílica presente no agregado interfere na velocidade de reação, Dent Glasser e Kataoka (1981), estudaram a química da RAA e explicam a diferença do ataque sofrido pela sílica cristalizada e a amorfa (Figura 19).

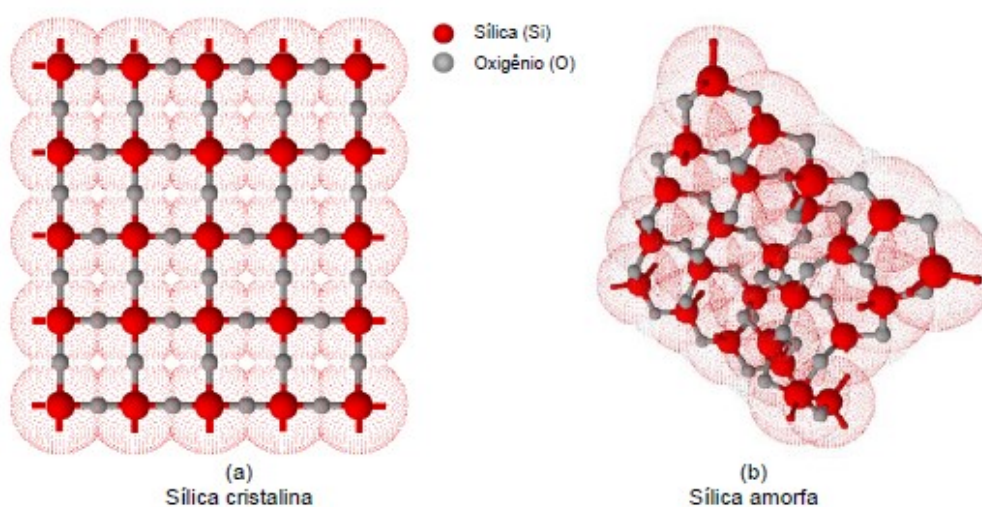


Figura 19. Tipos de sílica.
Fonte: COUTO(2008).

Ao observar a Figura 19 (a), é possível notar que a sílica cristalizada possui estrutura química bem organizada, assim, o ataque das hidroxilas se dá principalmente na sua superfície, deixando a reação mais lenta, uma vez que poucos íons de sílica passam para a fase fluida. Já a sílica amorfa ou pouco cristalina (Figura 19 (b)), possui estrutura química desorganizada, permitindo a penetração dos íons hidroxilas e alcalinos em seu interior o que acelera o processo da reação.

Hernández-Cruz et al. (2016) realizaram uma análise microestrutural do processo de dissolução da sílica do agregado, apresentada na Figura 20.

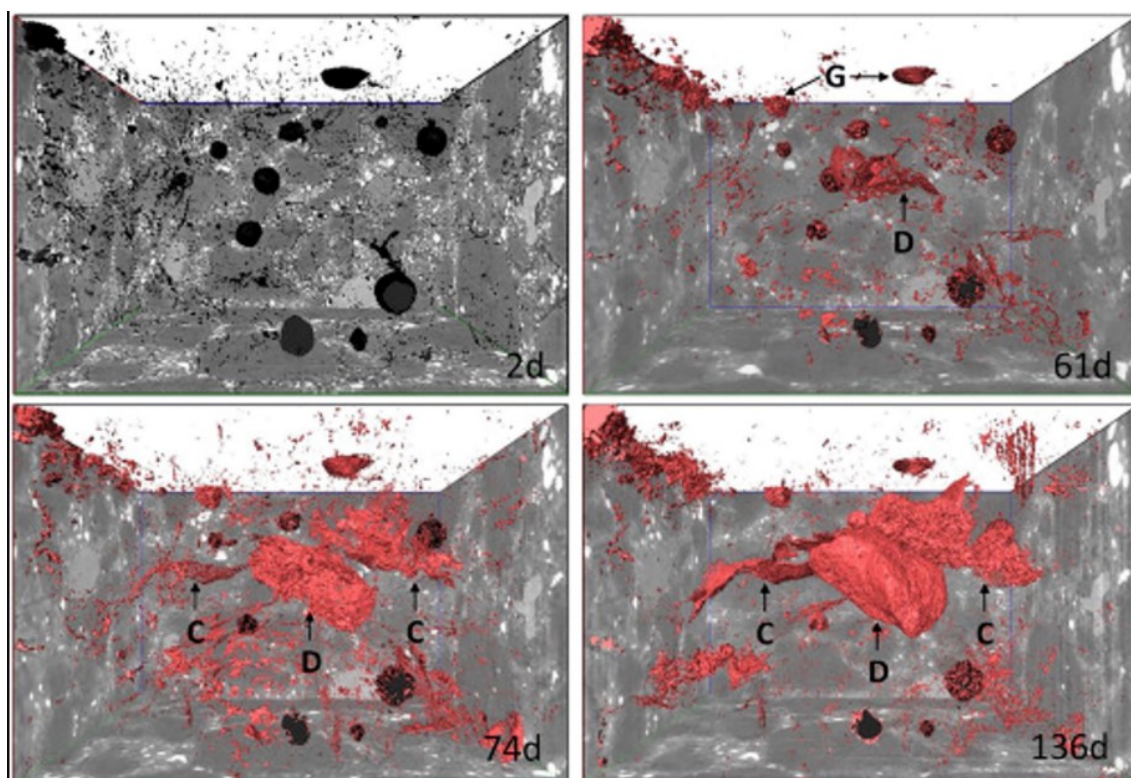


Figura 20. Imagem 3D de amostras afetadas por RAA após 2, 61, 74 e 136 dias em solução de NaOH 1 M a 50 ° C.

Fonte: HERNÁNDEZ-CRUZ et al. (2016)

Na imagem 3D das amostras submetidas a RAA, os microporos são identificados na cor preta e o gel da RAA em rosa. Aos 2 dias os autores observaram vários microporos vazios devido à dissolução da sílica do agregado em solução de NaOH 1M. Em seguida, aos 61 dias, os microporos e vazios foram sendo gradualmente preenchidos pelo gel da RAA que deu início à expansão, na imagem o agregado reativo é identificado pela letra D e os poros preenchidos com gel pela letra G. Posteriormente, aos 74 dias, observou-se o começo da formação de fissuras

visivelmente já preenchidas pelo gel da reação, indicada pela letra C. Aos 136 dias a expansão do gel levou ao estresse interno do concreto, que ao exceder a resistência a tração do material, resultou no desenvolvimento das fissuras.

2.5.5 Porosidade do concreto e argamassa

A porosidade do concreto desempenha um papel importante na expansão devido à RAA. A alta porosidade favorece a entrada de umidade nos poros, onde os álcalis se difundem dando início ao ataque ao agregado e com isso, desencadeia a RAA. Haha et al. (2007) estudou três tipos de agregado quanto a RAA, a porosidade dos agregados foi determinada através de análise de imagem e porosimetria por intrusão de mercúrio. As amostras foram polidas e imersas em solução de NaOH 2M e após tratamento, uma análise de DRX mostrou que os dois agregados mais porosos sofreram dissolução significativa e conseqüentemente maiores expansões quando comparado ao agregado de baixa porosidade.

O gel da RAA, que se forma inicialmente na superfície dos agregados, penetra nos vazios entre o agregado e a pasta de cimento e ao expandir causa fissurações e rachaduras após ocupar todos os espaços vazios do material. Desta forma, a quantidade de gel formada e sua expansão deve levar mais tempo para originar fissuras em um concreto de alta porosidade, e conseqüentemente, mais tempo para apresentar os sinais do desencadeamento da reação, quando comparado à um concreto de baixa porosidade. (MULTON; SELLIER; CYR, 2009).

2.6 CIMENTO SUPERSULFATADO (CSS)

A descoberta da ativação do sulfato da escória de alto forno para desenvolvimento de um material aglomerante, o CSS, se deu em 1909 por Hans Kühl. Sua aplicação aumentou após Segunda Guerra Mundial devido à escassez de clínquer do cimento Portland, o que resultou na padronização do CSS em países como Alemanha e Reino Unido, sendo regido pela norma DIN 4210. Mais tarde, na Alemanha, a mudança no processo de fabricação do ferro levou a produção de escórias que não atendiam mais ao requisito mínimo de 13% de teor de Al_2O_3 , levando ao declínio do uso do CSS (JUENGER et al., 2011).

O cimento supersulfatado (CSS) é atualmente regido pela norma EN 15743, que determina critérios quanto aos constituintes e proporções para produção do CSS. De acordo com a norma europeia o CSS é composto principalmente por escória de alto forno, em teores superiores a 75%, 5-20% de sulfato de cálcio e pequenas quantidades de um ativador alcalino, até 5%, geralmente cimento Portland (ou clínquer). Outros tipos de ativador também podem ser empregados, como o hidróxido de sódio (ZHOU, PENG, et al., 2021).

Segundo Juenger et al. (2011), o CSS está atraindo atenção no meio técnico e tendo potencial para aplicação industrial, devido à preocupação crescente com o meio ambiente, ao baixo calor de hidratação e ao bom comportamento em meios agressivos. Segundo Min e Mingshu (1992) e Woltron (2009), é uma opção de cimento a ser adotado na presença de um agregado reativo. Com o controle da composição química do CSS é possível produzir um cimento com baixo teor de álcalis, o que deve resultar na redução do pH.

Segundo Tiecher (2006), controlar o teor equivalente alcalino do cimento não é o suficiente para inibir a RAA, deve-se controlar o teor equivalente alcalino do concreto. No entanto, como há várias possíveis fontes de álcalis no concreto, é difícil obter um controle efetivo da quantidade total de álcalis presente no concreto.

A composição do CSS reduz significativamente o consumo de clínquer, a principal fonte de álcalis do cimento e o controle de teores de cada material que o compõe pode resultar na produção de um CSS de baixo teor de álcalis, se tornando uma boa alternativa quando a substituição de um agregado reativo por um inócuo é considerada inviável.

2.6.1 Escória de alto forno

O teor de CaO e Al_2O_3 presente na escória tem grande influência nas propriedades mecânicas do CSS, o aumento da quantidade dos óxidos aceleram a velocidade de reação da escória e proporciona maior resistência à compressão. O teor de Al_2O_3 presente está relacionado ao nível de reatividade da escória (GRUSKOVNJAK et al., 2008; LIU et al., 2015). Um teor de mínimo entre 13-15% de Al_2O_3 é recomendado para o produto alcançar um bom desempenho mecânico, e escória com teores de alumina abaixo disso apresentam ganho de resistência lento (MATSCHEI; BELLMANN; STARK, 2005; GRUSKOVNJAK et al., 2008).

Gruskovnjak (2008) atribui a diferença no desenvolvimento das resistências a velocidade de dissolução da escória, onde o maior teor de alumina favorece a formação de etringita e reduz o número de poros, levando a uma maior resistência após os 28 dias de cura.

Gruskovnjak et al. (2008) compararam o desenvolvimento de resistência mecânica inicial entre pastas de CSS compostas por escória de alta (11,5% Al_2O_3) e baixa reatividade (7,7% Al_2O_3). Os autores observaram após 1 dia de hidratação da na escória de alta reatividade o preenchimento dos poros da matriz cimentícia devido a formação de etringita, onde os produtos de hidratação se misturam na matriz. Já nas análises das pastas de CSS de baixa reatividade, observou-se uma quantidade muito menor de etringita formada, que se deve ao baixo teor de alumina da escória, sendo que o teor elevado de Mg resulta na maior formação de hidrocalcita no sistema. Desta forma, escória de mais reativa apresentou maior dissolução, onde o menor teor de Mg e maior teor de Al favoreceu a maior formação de etringita, desenvolvendo a melhor resistência mecânica das pastas nas idades iniciais (GRUSKOVNJAK et al., 2008).

A diferença de desenvolvimento de resistência mecânica entre escórias de alta e baixa reatividade também foi observada nas pesquisas realizadas por Angulski da Luz e Hooton (2015) e Masoudi e Hooton (2019).

Angulski da Luz e Hooton (2015) realizaram um estudo comparando escórias com alto (13,74%) e baixo (8,15%) teor de alumina. A partir dos resultados, observou-se melhor desempenho na resistência à compressão aos 7 dias, para a escória com alto teor de alumina. No entanto, com o desenvolvimento da norma europeia EN 15743 (2010), atualmente não se define um teor mínimo de Al_2O_3 .

Masoudi e Hooton (2019) analisaram misturas de SSC produzidas usando duas escórias diferentes, uma com alto teor de alumina (13%) e outra com baixo teor de alumina (7%). Às misturas de escória com baixo teor de alumina mostraram um menor grau de hidratação da escória e quantidades de produtos de hidratação formados (C-S-H e etringita), resultando em maior porosidade e baixo desempenho mecânico das misturas do SSC em comparação com as misturas de escória com alto teor de alumina.

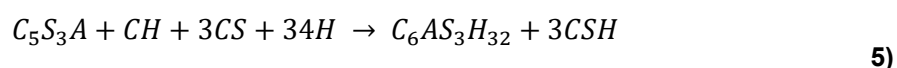
No entanto, atualmente, a norma EN 14743 (2010) para o uso do CSS não determina um teor mínimo de Al_2O_3 na escória, alterando seus critérios para aceitação de materiais para produção de CSS, através de duas condições:

- I. O produto deve consistir em pelo menos dois terços (66,7%) em massa da soma do óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e dióxido de silício (SiO₂). O restante deve conter óxido de alumínio (Al₂O₃) em conjunto com pequenas quantidades de outros compostos;
- II. A razão em massa (CaO + MgO) / (SiO₂) deve ser de no mínimo 1,0.

A classificação adotada no meio técnico diferencia as escórias a partir da relação Ca/SiO₂, conhecida como índice de basicidade, onde o material é considerado básico quando a relação Ca/SiO₂>1, e ácido quando a relação Ca/SiO₂<1 (JOHN; AGOPYAN, 2002).

2.6.3 Hidratação do cimento supersulfatado

Nos materiais constituintes do CSS, a anidrita fornece ao sistema CaO e SO₃ e a escória Al₂O₃, CaO e SiO₂. Já a adição do ativador de cimento Portland, ao se hidratar fornece hidróxido de cálcio e álcalis, elevando o pH da solução e com isso promove a dissolução da escória. Os íons de alumínio, cálcio e silício dissolvidos da escória reagem com o sulfato de cálcio presente na mistura para formar os dois principais produtos de hidratação: etringita (C₆AS₃H₃₂) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), como demonstrado na Equação (5) (GRUSKUVNJAK *et al.* 2008).



Matschei, Bellmann e Stark (2005) analisaram os produtos formados da hidratação do CSS durante 56 dias, como apresentado na Figura 21 a seguir.

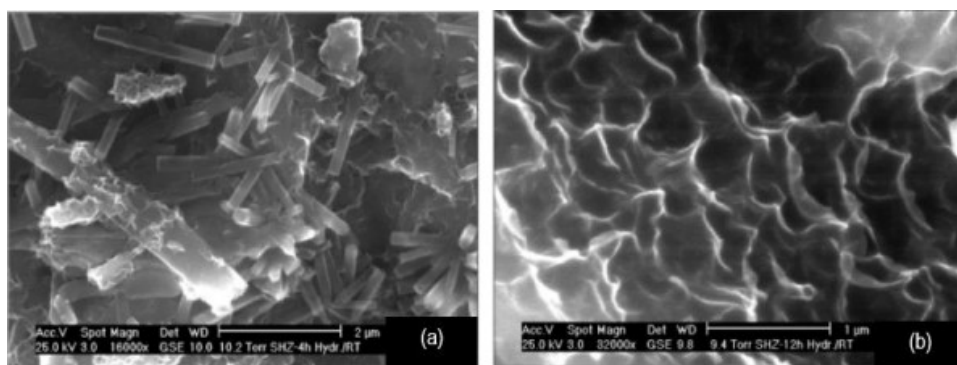
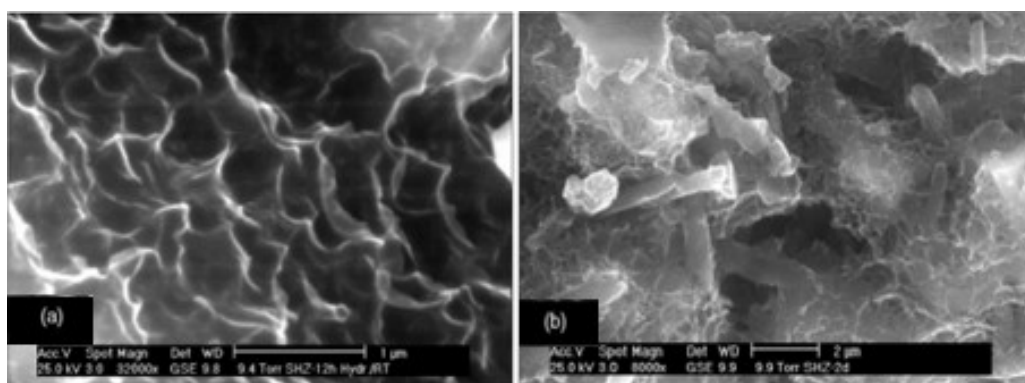


Figura 21. MEV das pastas de CSS com 4 horas de hidratação.
Fonte: MATSCHEI; BELLMANN; STARK (2005).

Através de análises de DRX e MEV, foi possível identificar a formação de etringita já nas primeiras 24 horas de hidratação. Na Figura 21 observa-se após 4 horas a formação de etringita (Figura a), e se identifica o início da formação de CSH (Figura b) (MATSCHEI; BELLMANN; STARK, 2005).



**Figura 22. MEV das pastas de CSS. C) Após 12 horas de hidratação; D) Após 2 dias de hidratação.
Fonte: MATSCHEI; BELLMANN; STARK (2005).**

Após 12 horas de hidratação (Figura 22 a), todos os grãos das escórias estão completamente cobertos por CSH. Com a formação dos produtos de hidratação do CSS, há uma redução da concentração de íons Ca^{2+} , Al^{3+} , Si^{4+} e OH^- na solução porosa, causando um aumento do teor de sulfato para equilibrar a carga entre os íons alcalinos e com isso ocorre a aceleração da dissolução da escória (MATSCHEI; BELLMANN; STARK, 2005).

A Figura 22 b mostra um crescimento no comprimento dos cristais de etringita, onde após 2 dias de hidratação, a matriz está claramente mais densa e os cristais de etringita já estão cercados por C-S-H. Com a continuação da hidratação, não se observou mudanças significativas nos teores de Ca^{2+} , Al^{3+} , Si^{4+} e SO_4^{2-} até os 56 dias (MATSCHEI; BELLMANN; STARK, 2005).

Segundo Liu et al. (2015) a hidratação do CSS é acelerada com o aumento da finura do cimento, aumentando a taxa de liberação de calor que, no entanto, ainda é muito menor que a do cimento Portland. Os autores analisaram o calor de hidratação de CSS com diferentes finuras, onde a maior emissão de calor total emitida foi de 108,70 J/g.

Matschei, Bellmann e Stark (2005) observaram um aumento de 65% na resistência à compressão de pastas de CSS ao reduzir a finura da escória de 6400

cm²/g para 4300 cm²/g, aos 28 dias e um aumento de 20% de reatividade da escória mais fina com relação a de granulometria maior.

O teor de ativador alcalino adotado para o CSS deve ser analisado. Segundo Matschei, Bellmann e Stark (2005) a dosagem em excesso de cimento Portland leva a queda de resistência mecânica, o que se atribuiu a estabilização da etringita em meio ao elevado pH. No CSS de alto teor alcalino ocorre elevação no teor de sulfato e precipitação de etringita na superfície dos grãos de escória, o que impede a migração dos íons de alumínio para a solução. Com o isolamento dos íons de escória envoltos por etringita, aumenta-se o volume de poros capilares não preenchidos por C-S-H, inibindo o desenvolvimento de resistência mecânica.

2.7 AVALIAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO EM ARGAMASSA

O método das barras de argamassa foi desenvolvido com base nas pesquisas realizadas por Stanton (1980), onde o método proposto consistia em avaliar a variação dimensional de barras de argamassa submersas em água. Anos mais tarde este método passou por alterações e foi padronizado pela ASTM C 227 (2010) (SANCHEZ, 2008). Neste método a avaliação da variação dimensional é feita em barras de argamassa armazenadas em recipientes hermeticamente fechados, com atmosfera de vapor de água em temperatura de 38°C, sendo as leituras realizadas durante 12 meses.

Com o objetivo de reduzir o tempo de execução do ensaio, Oberholster e Davies (1986) desenvolveram o método acelerado das barras de argamassa. Possuindo o mesmo princípio do método das barras de argamassa, este ensaio avalia o potencial reativo dos agregados através de barras de argamassa compostas por relação cimento:agregado de 1:2,25 e relação água/cimento de 0,47, sendo submetidas a imersão em solução de NaOH a 1N em temperatura de 80°C, por um período de pelo menos 14 dias (SANCHEZ, 2008). As leituras de variação dimensional são realizadas em determinados intervalos de tempo, os resultados são expressos em porcentagem de expansão, através da média de leitura de 3 barras de argamassa, apresentando resultados satisfatórios e comparáveis aos obtidos pela ASTM C 227 (2010), com a vantagem de reduzir o tempo de ensaio. Em 1994 entrou em vigor a ASTM C1260 que descreve o método acelerado, sendo o mais utilizado na literatura nacional e internacional (GUILLANTE, 2018).

No Brasil, a parte 4 da NBR 15577 orienta sobre os procedimentos de ensaio para determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. O procedimento consiste na submersão de três barras de argamassa em solução de NaOH a 1N em temperatura de 80°C, realizando leituras por 28 dias.

Segundo Kuperman, Salles, Pínfarie Carneiro (2005), o método acelerado das barras de argamassa descrito pela ASTM C1260 (2014) não detecta agregados lentamente reativos. Com isso, pesquisadores defendem que o ensaio deve ser levado até os 30 dias de idade dos corpos de prova, acreditando poder identificar agregados com reatividade mais lenta, sendo o período de ensaio adotado pela norma Brasileira. O valor limite indicado pela NBR para classificar a expansão em inócua ou deletéria é de 0,19%.

Existem muitas críticas com relação à confiabilidade do método acelerado das barras de argamassa em função das condições agressivas em que as barras são submetidas e a duração do ensaio. O teste é considerado muito severo para alguns agregados, podendo gerar falsos-positivos, e não é capaz de detectar a reatividade de outros, resultando em falsos negativos. Com base nisso, recomenda-se que quando o objetivo for avaliar a potencialidade reativa do agregado utilizando o método acelerado, o resultado deve ser confirmado pelo método dos prismas de concreto (NBR15577-7), refletindo uma condição mais realista do comportamento do material em campo.

2.8 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO E O CIMENTO SUPERSULFATADO

Entre as vantagens do CSS, Woltron (2009) cita seu bom desempenho na mitigação das expansões causadas pela RAA, no entanto não há pesquisas que expliquem seu comportamento frente a RAA. Min e Mingshu (1993) analisaram o comportamento de um CSS composto por 80% de escória de alto forno, 14% de gipsita e 6% de ativador (cimento Portland), na presença de agregados reativos e inócuos. A Tabela 2 apresenta a composição química do CSS e gráfico com os resultados das expansões é apresentado na Figura 23.

Tabela 2. Composição química do CSS estudado.

Elemento	Teores (%)
SiO ₂	29,35
Fe ₂ O ₃	3,93
Al₂O₃	8,99
CaO	38,89
MgO	7,22
SO ₃	6,85
Na ₂ O	0,28
K ₂ O	0,46

Fonte: MIN e MINGSHU (1993).

Observa-se que o teor de alumina encontrado no CSS produzido por Min e Mingshu (1993) se aproxima do teor encontrado no cimento CP IV (9,89%) e apresenta um teor de CaO de 38,89% em comparação a um teor de 44,91% do CP IV.

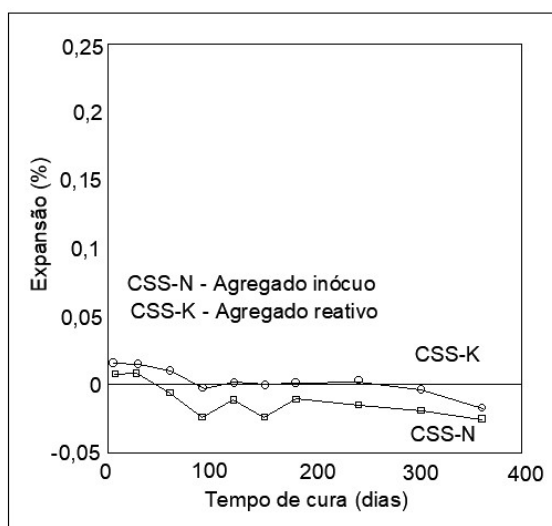


Figura 23. Expansão de micro barras de concreto de CSS.

Fonte: Min e MINGSHU (1993).

Na Figura 23, a nomenclatura SSC-K se refere às barras de CSS na presença de agregado reativo e SSC-N as barras produzidas com agregado inócuo. Após 400 dias, observou-se que a expansão das amostras, tanto com agregado reativo como com o inócuo foram semelhantes, demonstrando então o potencial de mitigação do CSS. Apesar de demonstrar eficiência na mitigação das expansões, as pesquisas disponíveis não realizam um estudo mais aprofundado, com análises microestruturais analisando o que leva o CSS a mitigar a reação.

Oliveira (2000) analisou a água dos poros de pastas de cimento de escória,

onde comparou os valores médios de pH e concentração de componentes químicos da água de equilíbrio aos 28 dias de cura. Entre as pastas analisadas, uma foi composta por escória básica de alta reatividade com 6% de gipsita e 2% de cal hidratada, podendo ser considerado um cimento supersulfatado com a gipsita como fonte de sulfato de cálcio e a cal como ativador. Os resultados obtidos e comparados com o cimento CP V são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios de pH e concentração de componentes químicos da água dos poros das pastas.

Cimento	Concentração (mmol/L)					pH
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	SO ₄ ²⁺	OH ⁻	
100 CPC	1,05	17,28	17,28	-	54	12,7
2C6G	0,3	0,3	1,13	1,34	3	11,5

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2000).

O cimento 100 CPC corresponde à pasta de CP V, e o 2C6G à pasta de cimento de escória. É possível observar uma considerável redução da concentração de álcalis presente na solução dos poros das pastas, assim como uma redução de cerca de 94% na concentração de íons hidroxilas, levando conseqüentemente a redução do pH da solução.

Collier et al. (2014) ao analisar o pH da solução dos poros de pastas de CSS aos 28 dias de hidratação, encontrou valores entre 10,81 e 11,83 ao variar a composição das pastas. Já o cimento Portland com a mesma idade de cura apresenta um pH de cerca de 13,9.

O teor de cálcio presente no cimento tem papel importante no pH encontrado nas soluções porosas, assim como no desenvolvimento da RAA, assim como a alumina, como descrito no item 2.6. A Tabela 4 apresenta os teores de cálcio e alumina presente em alguns CSS já estudados, assim como do cimento Portland CP IV.

Tabela 4. Teor de Al, CaO e equivalente alcalino de CSS e CP IV encontrados na literatura.

TEOR (%)				
Autor	Cimento	Al₂O₃	CaO	Eq. Alcalino
ANGULSKI DA LUZ e HOOTON (2019)	CSS	11,95	42,25	-
RUBERT et al., 2018	CSS	7,39	47,75	-
LIU, S. et al. 2015	CSS	10,87	41,45	0,6
GRUSKOVNJAK et al., 2011	CSS	9,91	41,45	-
MASTCHEI, 2009	CSS	10,2	39,5	0,65
-	CP IV 32 RS*	9,89	44,91	1,2

Fonte: Pessoal.

*Fornecedor- ITAMBÉ.

Observa-se que, no geral, os teores de alumina e cálcio dos CSS se aproximam dos teores apresentados pelo cimento CP IV, indicado para mitigação da RAA, além de possuir um teor de álcalis mais baixo quando comparado ao CP, favorecendo o potencial de inibição da reação. Não foi possível calcular o teor equivalente alcalino de todos os trabalhos devido à falta das informações necessárias, como a caracterização química da anidrita e do ativador empregado.

Desta forma, com a carência de estudos avaliando a RAA no CSS e com base nos estudos já realizados avaliando a resistência mecânica, durabilidade e vantagens ambientais do CSS, tem-se a necessidade de uma pesquisa que avalie o comportamento do cimento supersulfatado frente à reação álcali agregado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados o preparo e caracterização dos materiais utilizados, procedimentos de preparo e dosagem das argamassas e dos ensaios realizados referentes a cada análise.

O presente estudo tem como objetivo analisar a durabilidade de compósitos produzidos de cimento supersulfatado, avaliando seu potencial na mitigação da reação álcali agregado. Para isso, foram moldadas argamassas compostas de CSS de duas composições diferentes, variando o teor de alumina e de cálcio presente, tendo como referência argamassas produzidas de cimento CP IV 32 RS e CP V. A Figura 24 apresenta o fluxograma dos ensaios realizados.

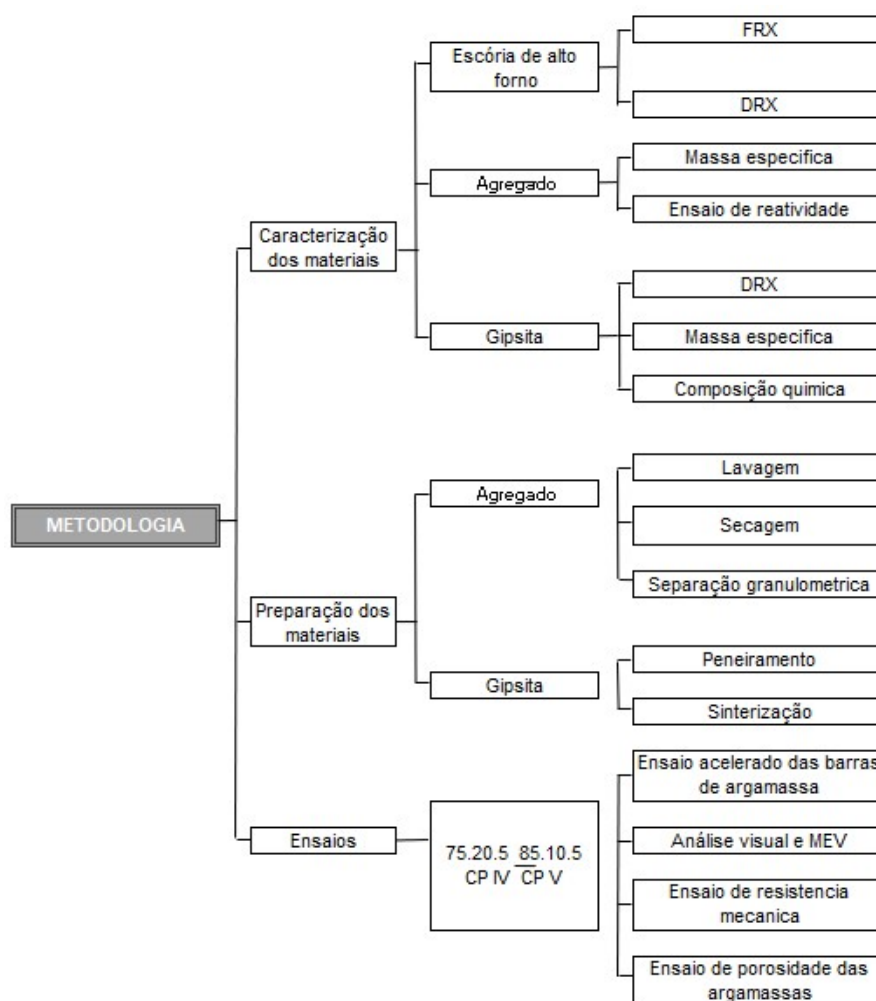


Figura 24. Fluxograma dos ensaios.
Fonte: Pessoal.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Supersulfatado

Na Tabela 5 são apresentados os materiais utilizados na composição do CSS, assim como os procedimentos de caracterização e preparo de cada um.

Tabela 5. Caracterização química dos materiais que compõem o CSS.

Elementos	Variação percentual		
	Escória de alto forno	Anidrita	Ativador alcalino
Na ₂ O	0,074	0,19	NA
MgO	2,072	0,19	1,97
Al ₂ O ₃	10,176	0,15	4,58
SiO ₂	21,04	0,16	19,32
P ₂ O ₅	NA	0,99	NA
SO ₃	8,86	63,75	3,05
K ₂ O	0,75	0,09	NA
CaO	54,77	34,27	61,86
TiO ₂	0,67	NA	NA
MnO	0,26	NA	NA
Fe ₂ O ₃	1,12	0,08	3,07
ZnO	0,01	NA	NA
SrO	0,01	0,10	NA
Y ₂ O ₃	0,01	NA	NA
ZrO ₂	0,07	0,01	NA
CaO+MgO/SiO ₂	2,70	NA	NA
Perda ao fogo	NA	NA	3,65
Resíduo insolúvel	NA	NA	0,93
CaO Livre	NA	NA	0,82
CaO/SiO ₂	2,60	NA	NA
Eq alcalino	0,57	0,25	0,69
Massa específica (g/cm ³)	2,83	1,77	3,09
Superfície específica (Blaine) (cm ² /g)	4460	NA	4405

Fonte: Pessoal. *NA= Não Analisado.

A escória foi obtida pronta para o uso. Ao analisar sua composição química é possível observar que pode ser classificada como básica, por apresentar o valor de relação $CaO/SiO_2 > 1$, além de apresentar relação $CaO+MgO+SiO_2$ maior que 66,7 e relação $CaO+MgO/SiO_2$ superior a 1, atendendo às exigências da norma para que

possa ser utilizada na produção de CSS. Além disso, observa-se que a escória apresenta teor de alumina de 10,17%, sendo classificada como um produto de alta reatividade, resultando em um processo de hidratação mais rápido. Os teores de escória adotados nesse estudo para compor os CSS produzidos foram de 75% (CSS75) e 85% (CSS85), sendo a principal fonte de alumina e cálcio (54,77%) do cimento.

A anidrita utilizada é produto do processo da calcinação da gipsita moída de fórmula química $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, oriunda de Araripina – PE. O produto foi obtido já moído, passou por peneiramento em laboratório em malha 150 μm e posterior calcinação em temperatura de 650°C por 60 minutos e taxa de aquecimento de 50°C/min. O material foi caracterizado por análise por difração de raios-x (Figura 25) para confirmar a transformação da fase hidratada para a anidra. O produto apresenta teor de 0,154% de alumina e 34,27% de cálcio e foi empregado em teores de 20% para o CSS75 e 10% para o CSS85.

Como ativador alcalino foi empregado o cimento Portland CP V ARI de alta resistência inicial, da marca Itambé. A escolha se deu com base em pesquisas anteriores, como a de Homrich (2018), onde após teste preliminares comparando dois ativadores alcalinos diferentes, o hidróxido de potássio e o cimento CP V, obteve-se os melhores resultados de resistência à compressão nas peças utilizando cimento Portland como ativador. A NBR 16697-2018 determina um teor máximo de trióxido de enxofre de (SO_3) de 4,5% para cimentos de alta resistência inicial, desta forma, observa-se que o cimento CP V ARI utilizado para o estudo apresenta um teor de 3,05%, estando de acordo com a norma. O cimento empregado como ativador é composto por 4,58% de alumina e 61,86% de cálcio e compõe 5% dos CSS produzidos.

Tanto a anidrita (Figura 25) quanto a escória de alto forno (Figura 26) foram caracterizadas por análise de difração de raio X (DRX).

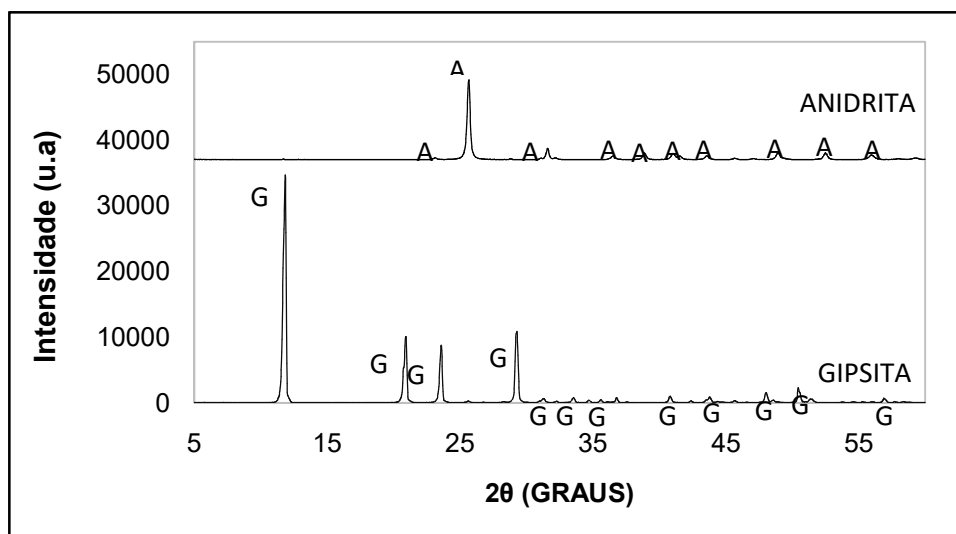


Figura 25. DRX do sulfato de cálcio *in natura* e calcinado a 650°C.
Fonte: Pessoal.

Agipsita foi caracterizada por análise por difração de raios-x (Figura 25) para confirmar a transformação da fase hidratada para a anidra. Ao analisar o difratograma é possível observar a transição do produto da fase di-hidratada para a fase anidra, através do desaparecimento dos picos de gipsita e formação dos picos característicos da anidrita.

O difratograma da escória de alto forno é apresentado na Figura 26.

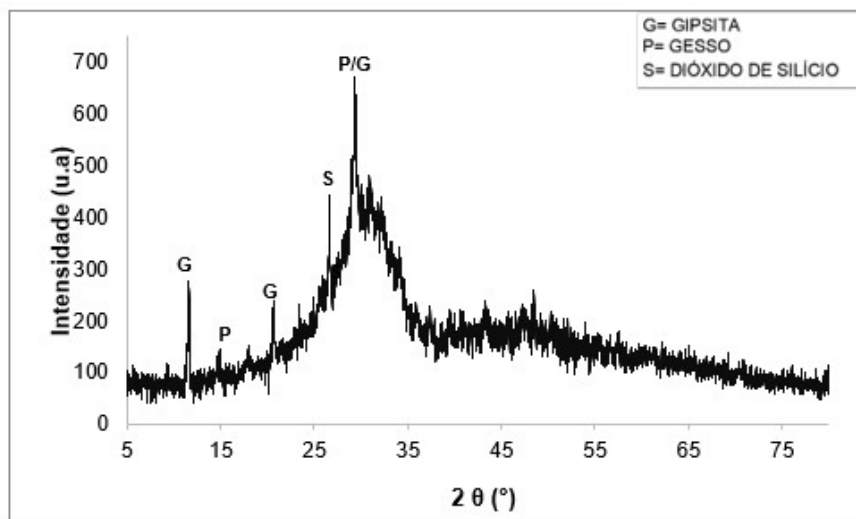


Figura 26. DRX da escória de alto forno (G: Gipsita; P: Gesso e S: Dióxido de Silício).
Fonte: Pessoal.

A escória apresenta caráter amorfo, característico da escória de alto forno básica. Os picos de gesso e gipsita identificados são provenientes da adição de gipsita no processo de moagem da escória.

3.1.2 Cimento Portland

Neste estudo, o cimento Portland CP IV e CP V foram empregados para moldagem das argamassas de referência para o CSS. O cimento CP IV tem como característica o baixo calor de hidratação, resistência a meios agressivos, como o ataque por sulfatos, e é o cimento recomendado na utilização com agregados reativos. Já o cimento CP V é comprovadamente um não mitigador da RAA, como mostram os estudos de Tiecher (2006). A composição química dos cimentos se encontra na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6. Caracterização química do CP IV e CPV.

Elemento	Teores (%)	
	CPIV	CPV
K₂O	1,85	1,26
Na₂O	0,00	0,235
Al₂O₃	12,34	3,79
SiO₂	22,86	11,96
Fe₂O₃	3,68	3,13
CaO	49,94	70,57
MgO	2,36	0,46
SO₃	6,96	8,56
Equivalente alcalino	1,21	1,06
Massa específica* (g/cm³)	2,84	3,11
Superfície específica (Blaine)* (cm²/g)	4265	5047

Fonte: Pessoal.

*Fonte pessoal.

Nota-se que o cimento CPIX tem em sua composição 12,34% de alumina e 49,94% de cálcio. Já o cimento CP V apresenta um teor de alumina inferior ao CP IV, sendo de 3,06% e o teor de cálcio superior, com 71,53% em sua composição química.

3.1.3 Agregado

O agregado miúdo utilizado é uma areia artificial resultante da britagem de rocha basáltica, proveniente de uma jazida localizada no município de Pato Branco-PR. Inicialmente o material foi lavado com o objetivo de eliminar o material pulverulento e então seco em estufa a 100°C durante 24 horas. A areia teve a granulometria selecionada através de peneiramento em um agitador de peneiras, conforme especificado pela norma que regulamenta o ensaio, apresentado na Tabela 7, e então armazenados em local protegido de umidade.

Tabela 7. Granulometria requerida do material para ensaio.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)		Quantidade de material	
Passante	Retido	%	Gramas
4,75 mm	2,36 mm	10	99
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5
Massa específica= 2,87 g/cm ³			

Fonte: Adaptado de NBR 15577-4 (2018)

Após seleção granulométrica da areia, o material passou por processo de caracterização, onde além de massa específica conforme ABNT NBR NM 52 (2002), é necessário realizar o ensaio de reatividade do agregado, já que para analisar o comportamento do CSS frente a RAA, é preciso o emprego de um material reativo.

Tiecher (2006) em sua pesquisa classificou o agregado basáltico da região de Pato Branco-PR como reativo, o que foi comprovado através do ensaio do método acelerado de barras de argamassa, regido pela NBR 15577-4 (2018). As argamassas foram produzidas com cimento Portland CP V ARI, utilizando barras moldadas com areia normatizada como referência. Os resultados da variação dimensional estão apresentados na Figura 27.

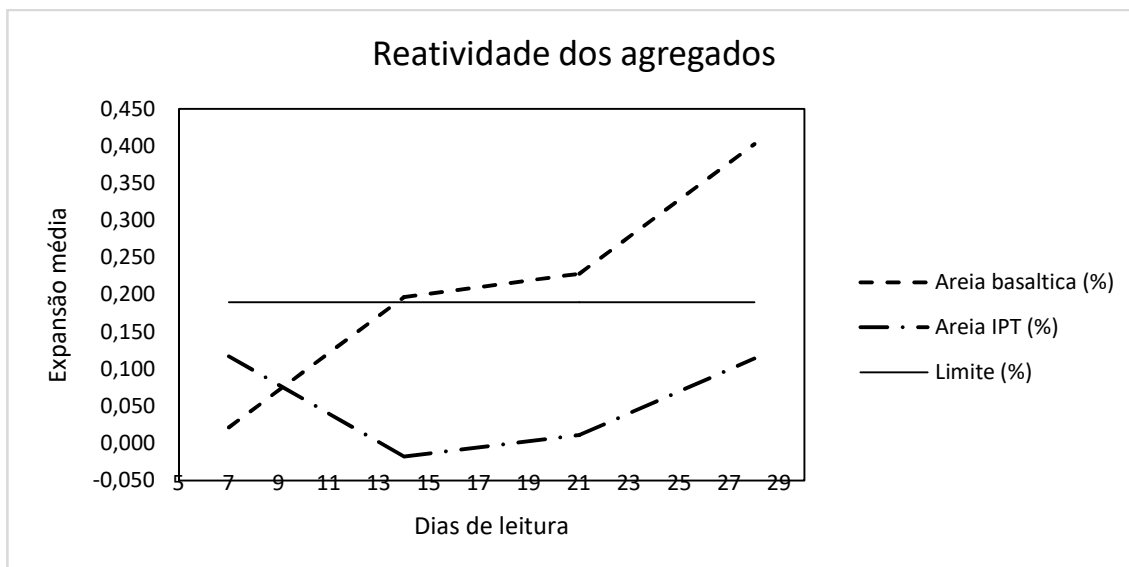


Figura 27. Variação dimensional das barras do ensaio de reatividade da areia empregado no trabalho.

Fonte: Pessoal.

Como pode ser observado na Figura 27, a expansão das barras produzidas com o agregado basáltico da região de Pato Branco apresenta expansão superior ao limite determinado pela norma já aos 13 dias de leitura, sendo classificado pela NBR 15577-1 ao fim do ensaio, como um agregado potencialmente reativo de grau R2.

3.1.4 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio- P.A (NaOH) utilizado para preparação da solução de imersão das argamassas para o ensaio acelerado de expansão é da marca Dinâmica, em microperolas, com 99% de pureza (Figura 28).



Figura 28. Produto empregado para preparo da solução de NaOH no qual as argamassas foram submersas durante o ensaio.

Fonte: Pessoal.

3.2 MÉTODOS

Este item apresenta e descreve os métodos aplicados para avaliação do comportamento das composições de CSS, do CP IV e CP V quando submetidos à reação álcali agregado.

3.2.1 Cimento Supersulfatado

Duas proporções de CSS foram confeccionadas a partir da escória e da gipsita e comparadas com o CP IV e o CP V (referências). Cada cimento é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Composição dos cimentos.

	CSS75	CSS85	CP IV	CP V
Escória (%)	75	85	-	-
Gipsita (%)	20	10	-	-
Ativador (%)	5	5	-	-
CP IV (%)	-	-	100	-
CP V (%)	-	-	-	100
Al ₂ O ₃ (%)	7,90	8,90	9,55	3,79
CaO(%)	51,02	53,07	45,17	70,57
Na ₂ O eq	0,51	0,54	1,22	1,06

Fonte: Pessoal.

Apesar de a literatura e a NBR 15577 (2018) indicar como forma de mitigação da RAA o emprego de um cimento com baixo teor equivalente alcalino, nota-se na Tabela 8 que o cimento CP IV, indicado para mitigação da RAA, apresenta teor alcalino superior ao CP V.

Ao comparar o teor de alumina do cimento CP IV com o do CP V, nota-se que o CP IV (Al: 12,34%) apresenta pelo menos três vezes o teor de alumina encontrado no cimento CP V (Al: 3,79%), além de apresentar teor de cálcio consideravelmente menor. Já os CSS apresentam teor de alumina de 7,90% e de cálcio 51,06% para o CSS75 e para o CSS85 8,90% de alumina de 53,07% de cálcio.

O teor de álcalis do cimento é um fator importante no desenvolvimento da reação, no entanto, no caso das análises do teste rápido em solução de NaOH, ocorre o fornecimento constante de álcalis através da solução durante todo o ensaio, com isso o teor de álcalis dos cimentos perde a influência nos resultados obtidos.

3.2.2 Produção das argamassas

As argamassas para os ensaios de expansão, resistência mecânica e de porosidade foram produzidas com agregado basáltico reativo, conduzida de acordo com os requisitos da ABNT NBR 15577 (2018), que descreve a prática para o ensaio de expansão. As mesmas foram produzidas utilizando um agregado reativo cuja composição granulométrica é apresentada na Tabela 7.

Confeccionou-se corpos de prova de argamassa para cada combinação de cimento/agregado seguindo as orientações da NBR 7215 (2019) com relação cimento:agregado de 1:2,25 e relação água/cimento de 0,47. O material foi caracterizado quanto ao espalhamento (Figura 29) e então moldado em formas específicas para cada ensaio.



Figura 29. Caracterização do espalhamento das argamassas. A= CSS85/ B= CSS75/ C= CP V/ D= CPIV. Fonte: Pessoal.

Na Tabela 9 encontram-se os resultados de espalhamento de cada mistura.

Tabela 9. Espalhamento das argamassas.

ID	Espalhamento 1 (mm)	Espalhamento 2 (mm)
CSS75	27,6	27,4
CSS85	26,6	27
CP IV	29,8	30,3
CP V	27,9	28

Fonte: Pessoal.

Após a moldagem, as formas foram cobertas por saco plástico e foram armazenadas em uma bacia com tampa com uma lâmina d'água para manter a umidade (95%), em temperatura de 23 +/- 2 °C, por um período de 48 horas, devido os prismas de CSS não apresentarem resistência suficiente para serem desmoldados após 24 horas. Os prismas de cimento Portland seguiram o mesmo procedimento de molde e desmolde do CSS.

Após o período de cura, as barras desmoldadas e previamente identificadas, foram colocadas em recipiente de armazenamento com água destilada suficiente para imergi-las totalmente, indo para estufa em temperatura de 80°C onde permaneceram por 24 horas, e então transferidas para a solução de NaOH onde permaneceram até o fim do ensaio.

A

Tabela 10 encontra-se um resumo dos ensaios que foram realizados neste trabalho.

Tabela 10. Resumo das análises realizadas.

Ensaio	Ensaio acelerado das barras de argamassa	Resistência mecânica	MEV	Porosidade
Dimensões (mm)	25x25x285	40x40x160	-	5x15
Nº de amostras	3	3	-	2
Idade ensaiada	CSS75	28-182	82	62
	CSS85	28-111		
	CPIV	28-62		
	CPV	28-111		
Objetivo	Analisar as expansões de cada amostra	Avaliar as propriedades mecânicas	Identificar géis expansivos	Relacionar a porosidade das amostras com as expansões

Fonte: Pessoal.

3.2.3 Ensaio de expansão pelo método acelerado das barras de argamassa

Para o ensaio de expansão confeccionou-se três barras de argamassa prismáticas para cada combinação de cimento/agregado como observado na Figura 30. O material foi moldado em formas prismáticas triplas com seção de 25 mm x 25 mm x 285 mm, com sistema de parafuso e pinos nas laterais, que serviram posteriormente como ponto de referência para realização das leituras da variação dimensional em relógio comparador (Figura 31).



Figura 30. Barras prismáticas de argamassa moldadas para o ensaio de expansão.

Fonte: Pessoal.



Figura 32. Prismas de argamassa desmoldados para o ensaio de expansão.
Fonte: Pessoal.



Figura 31. Relógio comparador utilizado para realização das leituras das barras.
Fonte: Pessoal.

Realizou-se a leitura inicial 24 horas após o pré-aquecimento em água destilada. Depois disso, as barras foram colocadas em recipiente de aço inox (Figura 33), totalmente imersas em solução de NaOH 1M, voltando para a estufa em temperatura de 80°C (± 2) por 28 dias (Figura 34 e 23), de onde foram retiradas somente para realização das principais leituras aos 7, 14 e 28 dias, contados a partir da data da imersão em solução de NaOH. As bacias foram fechadas com tampa de aço inox e as bordas isoladas com papel alumínio para reduzir o processo de evaporação da solução de NaOH dentro da estufa. A reposição da solução evaporada foi realizada com a adição de água destilada semanalmente.

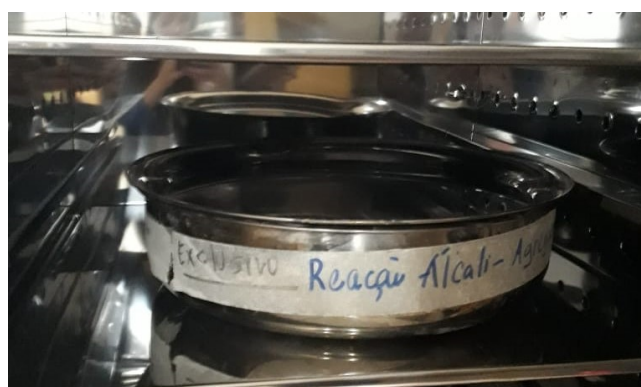


Figura 33. Barras de CSS em solução de NaOH em recipiente de aço inox na estufa.
Fonte: Autor, 2021.



Figura 34. Medição da temperatura da solução de NaOH realizada durante a leitura das barras.

Fonte: Autor, 2021.

Após os 28 dias foi decidido continuar o acompanhamento das expansões, que se deu até aos 152 dias das misturas CSS75 e CSS85, 105 dias do CP IV e 70 dias do CP V. O período de acompanhamento de cada mistura variou por terem sido confeccionadas em datas diferentes devido ao número de bacias de aço inox disponíveis para o ensaio. Aos 42 dias as amostras foram retiradas da estufa e transferidas para uma bacia de plástico (Figura 35) junto com a solução de NaOH, tendo as leituras realizadas semanalmente.



Figura 35. Barras do ensaio de expansão transferidas para recipiente plástico aos 42 dias de ensaio, quando foram retiradas da estufa.

Fonte: Autor, 2021.

3.2.4 Ensaio de resistência mecânica.

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados com o objetivo de avaliar as possíveis perdas de resistência devido às condições agressivas a que foram submetidas para indução da reação álcali agregado. Para isso, foram moldados 3 corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16cm) para cada mistura de

CSS (Figura 36), para o cimento CP IV e CP V, o mesmo traço das misturas do ensaio de variação dimensional de cimento:areia 1:2,25 e relação água cimento de 0,47.

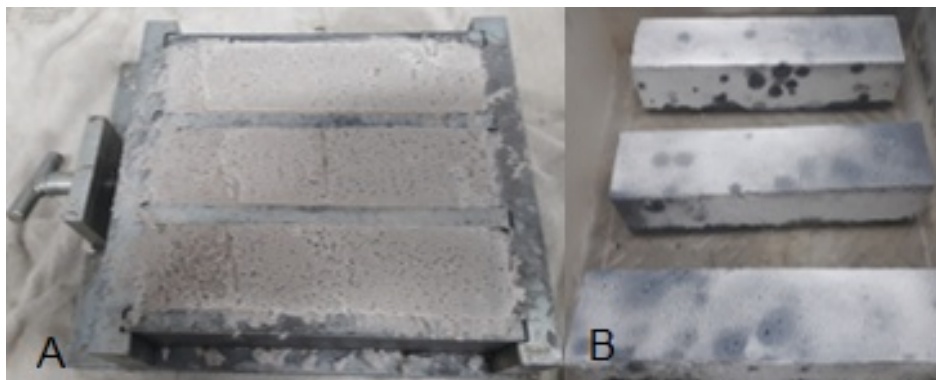


Figura 36. A) Moldagem de corpos de prova para ensaio de resistência mecânica. B) Corpos de prova desmoldados.
Fonte: Pessoal.

Devido à falta de disponibilidade de recipientes de aço inox apenas os corpos de prova em solução de NaOH foram para estufa em 80°C durante 28 dias, quando se realizou o primeiro rompimento, então foram armazenados em um recipiente plástico fora da estufa onde permaneceram em temperatura ambiente até o segundo rompimento. A idade do segundo rompimento variou entre cada mistura por terem sido moldadas em datas diferentes e serem rompidas todas em uma mesma data com o objetivo de obter os dados a tempo para defesa deste trabalho.

O rompimento aos 28 dias as barras de 4x4x16 foram inicialmente rompidas a flexão, para divisão das barras em duas partes. Uma das partes foi usada para rompimento por compressão aos 28 dias e a outra voltou para solução até a realização da segunda etapa de rompimento. Os dados passaram por tratamento estatístico através do programa STATISTICA 8.0, por onde se realizou a análise de variância para avaliar o comportamento do CSS com a mudança de composição.

3.2.5 Análise visual e microestrutural

A análise visual se deu nos dias de medição, sendo acompanhada até o fim do ensaio, buscando sinais da RAA, como fissuras e poros esbranquiçados.

A análise microestrutural foi realizada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de identificar a formação de gel característico da

reação, assim como a morfologia das amostras. Para isso, após o fim do ensaio de expansão, as barras passaram por processo de interrupção de hidratação, conforme descrito por Silvia (2015). Desta forma, as amostras foram fragmentadas e submersas em acetona por 2 horas (Figura 38), em seguida, passaram por processo de filtragem no filtro Büchner acoplado a uma bomba de vácuo (Figura 37) e então secos em estufa por 24 horas a temperatura de 80°C. Pequenas amostras foram selecionadas para a análise.



Figura 38. Amostras submersas em acetona.
Fonte: Pessoal.



Figura 37. Filtragem no filtro Büchner
Fonte: Pessoal.

3.2.6 Ensaio de absorção

A absorção dos corpos de prova influencia tanto na reação como na expansão das barras, sendo um fator importante a ser caracterizado. Desta forma, argamassas foram moldadas seguindo o mesmo procedimento descrito no item 3.2.2, em 2 corpos de prova cilíndricos de 5x10 para cada mistura e tipo de cura. As amostras foram desmoldadas 48 horas após a moldagem, passaram 24 horas imersas em água destilada em estufa a 80°C, tendo a solução trocada pela de NaOH após esse período, onde permaneceram por 62 dias.

A verificação da absorção se deu através do ensaio de absorção de água, seguindo as orientações da NBR 9778 (2005), aos 28 dias em solução de NaOH (31 dias após a moldagem). Ao serem retirados da solução, os corpos de prova passaram 72 horas em estufa em temperatura de 100°C, tendo sua massa determinada e registrada. Após, foram imersas em água em temperatura ambiente, permanecendo por 72 horas nesta condição. Completada esta etapa, as amostras

passaram 5 horas em fervura, tendo suas massas determinadas e registradas posteriormente. O resultado foi a média do cálculo de absorção de cada amostra, dado em porcentagem, pela seguinte expressão:

$$A = \frac{msat - ms}{ms} * 100$$

Onde $msat$ é a massa da amostra saturada em água após a imersão em fervura e ms é a massa da amostra seca em estufa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises do comportamento das duas composições de CSS e dos cimentos de comparação, o CP IV e CP V submetidos à reação álcali agregado.

4.1 Expansão em argamassa

O ensaio prescrito pela NBR 15577-4 (2018) foi adaptado para as condições disponíveis em laboratório, combinando o agregado reativo encontrado na região de Pato Branco-PR com dois traços de CSS (CSS75 e CSS85) e com os cimentos de referência (CP IV e CP V).

Os resultados obtidos foram analisados através de gráficos e tabelas relacionando a porcentagem média das expansões das barras com o passar do tempo calculadas em relação à leitura inicial, ou seja, antes das barras serem expostas à solução de NaOH. As amostras foram classificadas como potencialmente inócuas (expansão menor que 0,19%) e potencialmente reativas (expansão maior que 0,19%), seguindo as prescrições da norma NBR 15577-1 (2018), de acordo com as expansões apresentadas aos 28 dias em solução de NaOH. Após os 28 dias realizou-se leituras complementares.

Na Figura 39 observa-se o comportamento de expansão das barras durante todo o ensaio, em seguida a Tabela 11 apresenta os resultados de média de expansão obtidos aos 14 e 28 dias de imersão em solução de NaOH.

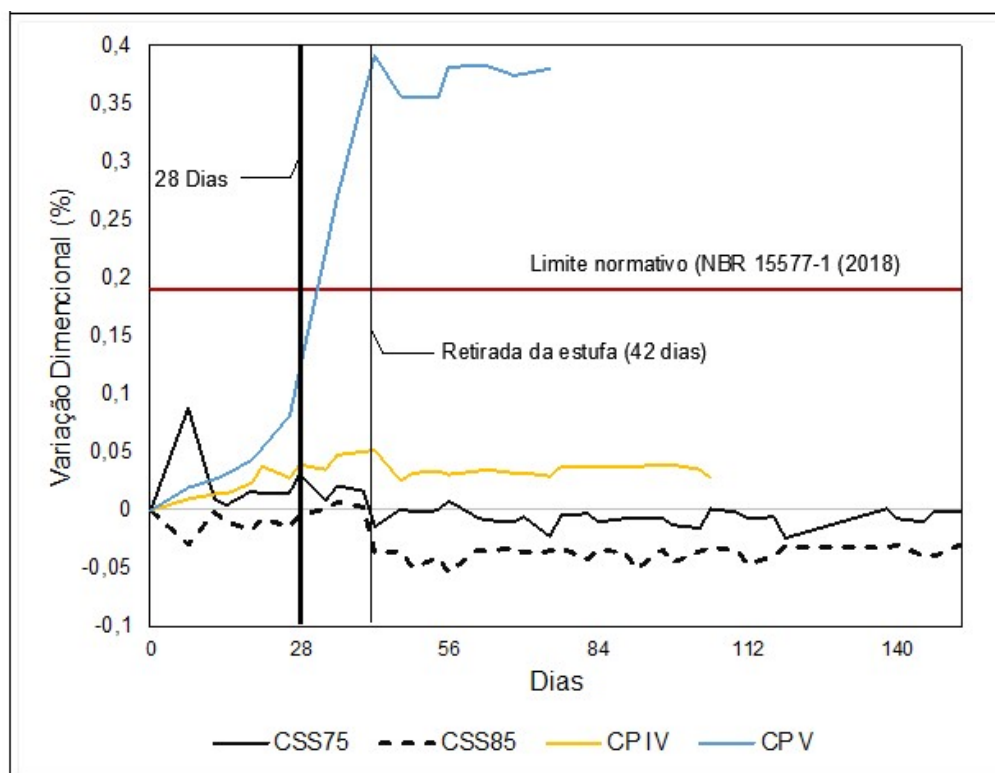


Figura 39. Gráfico de expansão das amostras no ensaio acelerado das barras de argamassa.

Tabela 11. Médias de expansão aos 14 e 28 dias e classificação e teores de Alumínio (Al) e Cálcio (Ca).

Amostra	Teor		Expansão média (%)		Classificação	
	Al (%)	Ca (%)	14 dias	28 dias	Potencialmente inócuo	Potencialmente reativo
CSS75	7,89	51,04	0,004	0,031	X	
CSS85	8,89	53,07	-0,011	-0,005	X	
CP IV	12,34	49,94	0,013	0,039	X	
CP V	3,79	70,57	0,03069	0,223*		X

Fonte: Pessoal.

*Resultado aos 33 dias.

Ao avaliar a Tabela 11 nota-se que o cimento CP IV, usado como referência de cimento com bom desempenho frente a RAA pode ser classificado como potencialmente inócuo, apresentando expansão 20,5% menor que o limite normativo. Já o cimento CP V, referência de cimento com mau desempenho frente a RAA, apresenta uma expansão de 0,120% estando abaixo do limite normativo, no entanto, ressalta-se que aos 28 dias a estufa usada no ensaio apresentou problemas, tendo se desligado resultando no resfriamento da solução, o que pode

ser resultado em uma retração na barra devido a diferença de temperatura. Ao realizar a leitura aos 33 dias se observou uma expansão 17% acima do limite e a evolução da expansão a cada leitura durante o trabalho, não podendo ser classificado como potencialmente inócuo. Esses resultados para os cimentos de referência já eram esperados devido sua composição, o efeito benéfico das pozolanas presentes no cimento CP IV já vem sendo relatado há alguns anos por diversos pesquisadores, como Hay & Ostertag, (2021); Mahyar et al. (2018) e Tapas et al. (2021) em comparação ao CP V, cimento com menor teor de adições entre os cimentos comercializados no Brasil.

Ao analisar as expansões do CSS75 observa-se uma expansão de 0,004% aos 14 dias que evolui para 0,031% aos 28 dias, sendo classificada como potencialmente inócua pela norma, assim como o CSS85, que apresentou uma retração de 0,011% aos 14 dias e reduziu para 0,005% aos 28 dias, tendo uma expansão de 0,006% nesse período, que se deve ao processo de hidratação da argamassa, mantendo a expansão abaixo do limite. A análise de diferença entre as medias foi realizada pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) mostrando que não há diferença estatística entre as médias da mistura CSS75 e CSS85, nem entre as médias da CSS75 e o CP IV, porém houve diferença estatística entre as expansões médias do CSS85 e o CP IV, sendo que o CSS85 apresentou uma retração em relação a sua medida inicial. Já o CP V apresentou diferença estatística em relação a todas as outras amostras estudadas.

Observa-se que, apesar de os dois CSS estudados não apresentarem diferença estatística entre si, as expansões reduzem conforme o teor de alumina aumenta, sendo que o CSS85 foi a mistura que apresentou as menores expansões apresentado resultados comparáveis ao CP IV. Já o CP V, cimento com menor teor de Al e maior teor de cálcio foi a mistura com maiores expansões, já classificadas como potencialmente deletéria. Pesquisas como a de Hay e Ostertag (2019) evidenciam o efeito da alumina na minimização da RAA, os pesquisadores analisaram expansões através do método acelerado das barras de argamassa produzidas com agregado reativo comparando as barras com e sem a adição de alumínio na mistura. Os autores atribuem o efeito ao controle de dissolução da sílica do agregado reativo pelo alumínio e a uma formação de vazios que atuam como espaço de acomodação para os géis da RAA. O controle de dissolução surge principalmente da adsorção de $[Al(OH)_4]^-$ à estrutura da sílica reativa, protegendo

assim a sílica amorfa dos agentes de dissolução e do OH^- por meio da repulsão eletrostática.

A fim de verificar comportamentos expansíveis, optou-se por manter as barras de argamassa em solução a 80°C até os 42 dias. Na Figura 39 é possível observar o resultado das leituras complementares, a partir dos 28 dias, onde nota-se uma tendência a estabilização na expansão das barras de CSS e de CP IV, já o CP V apresenta uma expansão crescente, não tendo estabilizado até o encerramento das leituras. Aos 42 dias (marcado pela linha vertical) observa-se uma queda nas expansões de todas as amostras devido a retirada da estufa, o que causou uma retração nas barras devido a diferença de temperatura.

4.2 Resistência mecânica

A Figura 40 apresenta o resultado da resistência mecânica dos corpos de prova submetidos a RAA através do método acelerado das barras de argamassa em comparação a barras que passaram o mesmo período em solução de cal. Todas foram rompidas primeiramente aos 28 dias, a idade do segundo rompimento variou entre as amostras, sendo aos 182 dias para CSS75, 111 dias para o CSS85 e CPV e 62 dias para o CPIV.

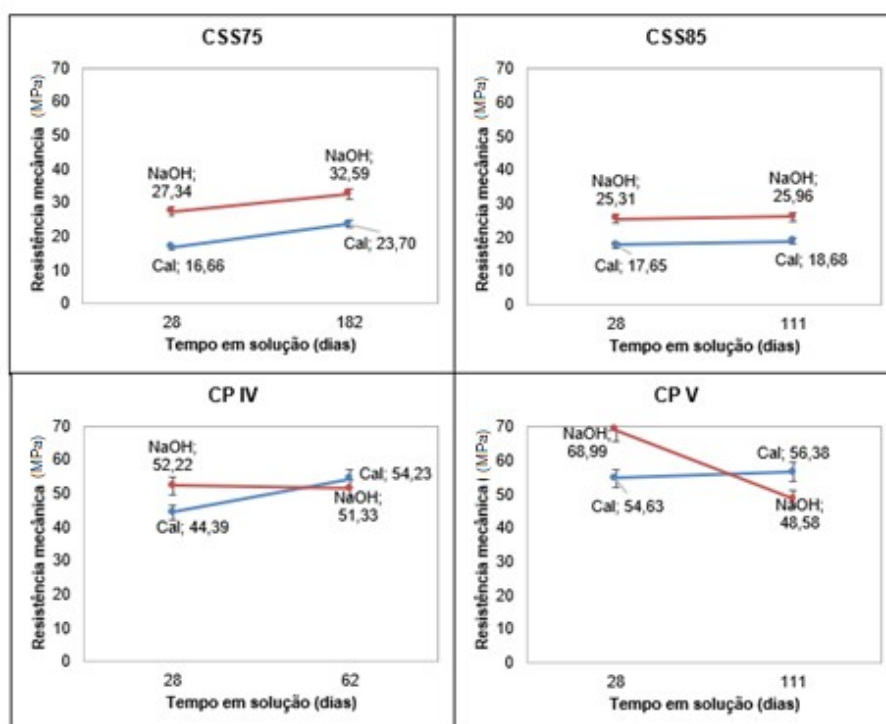


Figura 40. Resistências mecânicas das argamassas produzidas com diferentes tipos de cimentos nas idades indicadas em cada gráfico.

Fonte: Pessoal.

O ensaio de resistência mecânica foi realizado para observar os efeitos que a RAA poderia causar nas propriedades mecânicas das argamassas. Com os gráficos apresentados na Figura 40 é observado comportamento semelhante entre as misturas de CSS75 e CSS85, em ambas houve ganho de resistência mecânica. As amostras de CSS75 foram rompidas aos 28 e 182 dias, as que permaneceram em solução de cal tiveram um aumento de 42,25% aos 182 dias com relação aos 28 dias, já as amostras em solução de NaOH apresentaram um ganho de 19,20% de resistência no mesmo período, 23,05% a menos quando comparado ao resultado em solução de cal. O mesmo acontece com as amostras de CSS85, rompidas aos

28 e 111 dias. As amostras em cal rompidas aos 111 dias apresentam um ganho de resistência de 5,84% em relação aos 28 dias, já nas amostras em NaOH se observa um aumento de 2,57%. Ao analisar a evolução de resistência do CP IV entre os 28 e 62 dias observa-se um ganho de 22,17% de resistência nas amostras curadas em cal, já na solução de NaOH nota-se que devido a alta temperatura em que permaneceram, acelerando as reações de hidratação, as amostras atingiram sua resistência máxima já aos 28 dias e manteve ela estável aos 62 dias, quando foi realizado o segundo rompimento, sendo que não há diferença estatística entre as duas resistências mecânicas.

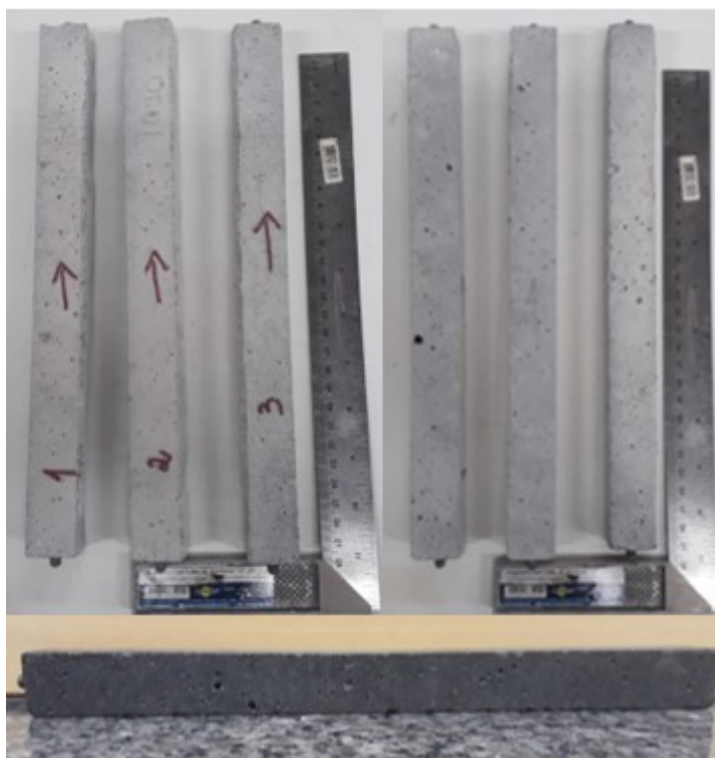
O CP V, rompido aos 28 e 111 dias, apresentou uma diferença positiva de 3,2% entre os dois rompimentos dos corpos de prova em cal. Já as amostras em solução de NaOH apresentaram uma significativa queda de resistência de 29,58% aos 111 dias. Essa queda de resistência já era esperada devido às expansões causadas pela RAA. A alta resistência atingida pelos corpos de prova se deve ao tempo em estufa que acelerou as reações de hidratação do cimento, sendo que a alta resistência inicial já é uma característica do CP V. Além disso, os géis das reações de hidratação formados preenchendo os vazios da matriz da argamassa podem ter auxiliado no aumento da resistência mecânica ao reduzir sua porosidade.

Ao analisar os quatro cimentos pode-se verificar o melhor comportamento pelo CSS, sendo o cimento que sofreu os menores impactos na presença da RAA. Aos 28 dias todas as misturas em NaOH apresentaram resistência superior às da solução de cal, este efeito pode ser explicado devido às diferentes condições de cura entre cada solução, já que a temperatura elevada onde as amostras em solução de NaOH foram mantidas aceleram as reações químicas para a hidratação do cimento e conseqüentemente o ganho de resistência mecânica. A partir dos 28 dias todas as amostras permaneceram em solução em temperatura ambiente.

A menor resistência mecânica do CSS quando comparada ao cimento Portland se deve a composição do CSH formado em cada cimento, segundo Richardson (2000) cimentos de escória como o CSS, formam CSH de baixa relação Ca/Si influenciando negativamente na resistência mecânica do produto.

4.2 Análise Visual

As barras de argamassa foram analisadas visualmente durante todo o ensaio com o objetivo de observar sinais da reação álcali agregado, como fissuras superficiais e envergamentos. As Figuras 42, 43, 44 e 45 se referem as misturas de CSS75, CSS85, CP IV e CP V, respectivamente.



**Figura 41. Análise visual CSS85 aos 28 dias.
Fonte: Pessoal.**



Figura 42. Análise visual CSS75 aos 28 dias.
Fonte: Pessoal.

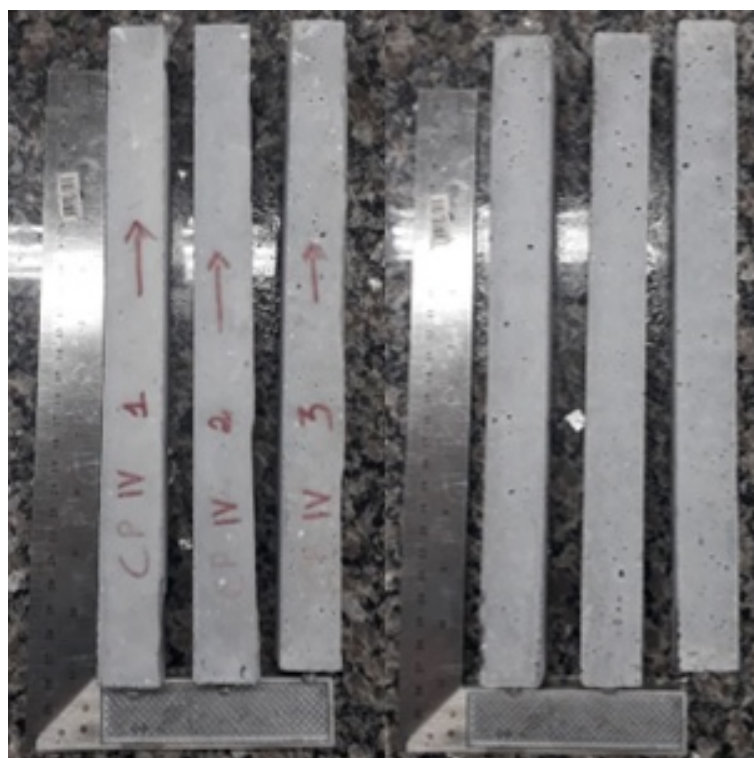


Figura 43. Análise visual CP IV aos 28 dias.
Fonte: Pessoal.

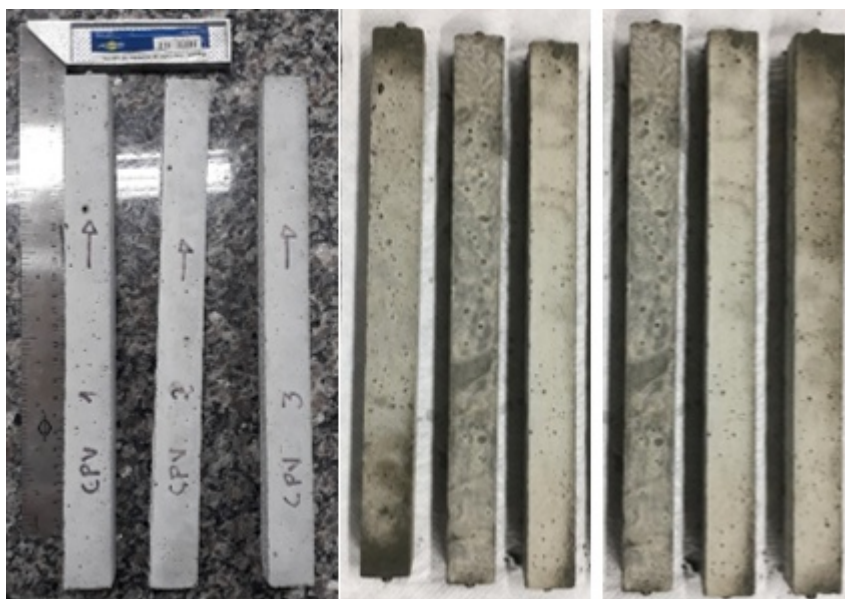


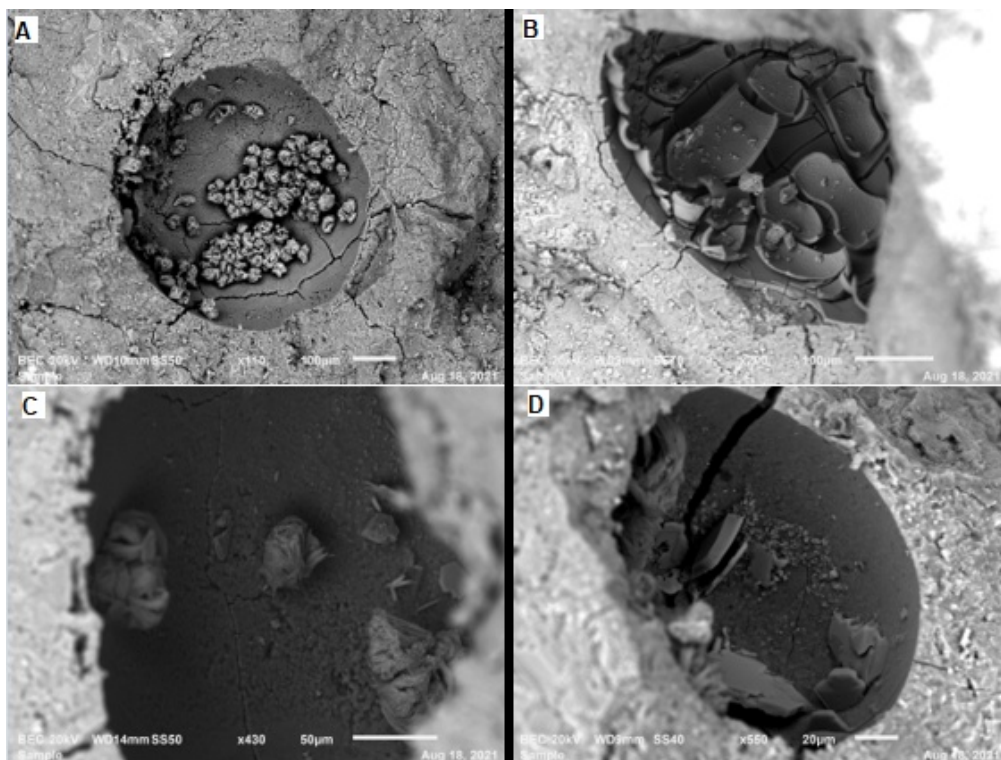
Figura 44. Análise visual do CP V após desmoldagem (a esquerda) e aos 28 dias (a direita).

Fonte: Pessoal.

Nenhuma fissura aparente ou envergamento foi observada nas barras durante nem após o estudo, o que já era esperado para as barras que apresentaram expansão abaixo do limite normativo de 0,19%. Já para as barras de CP V, apesar das expansões consideradas potencialmente deletérias, acima do recomendado pela norma, não se observou irregularidades decorrentes das expansões, além de uma diferença na coloração quando comparado a coloração no dia da desmoldagem e a coloração das outras amostras.

4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

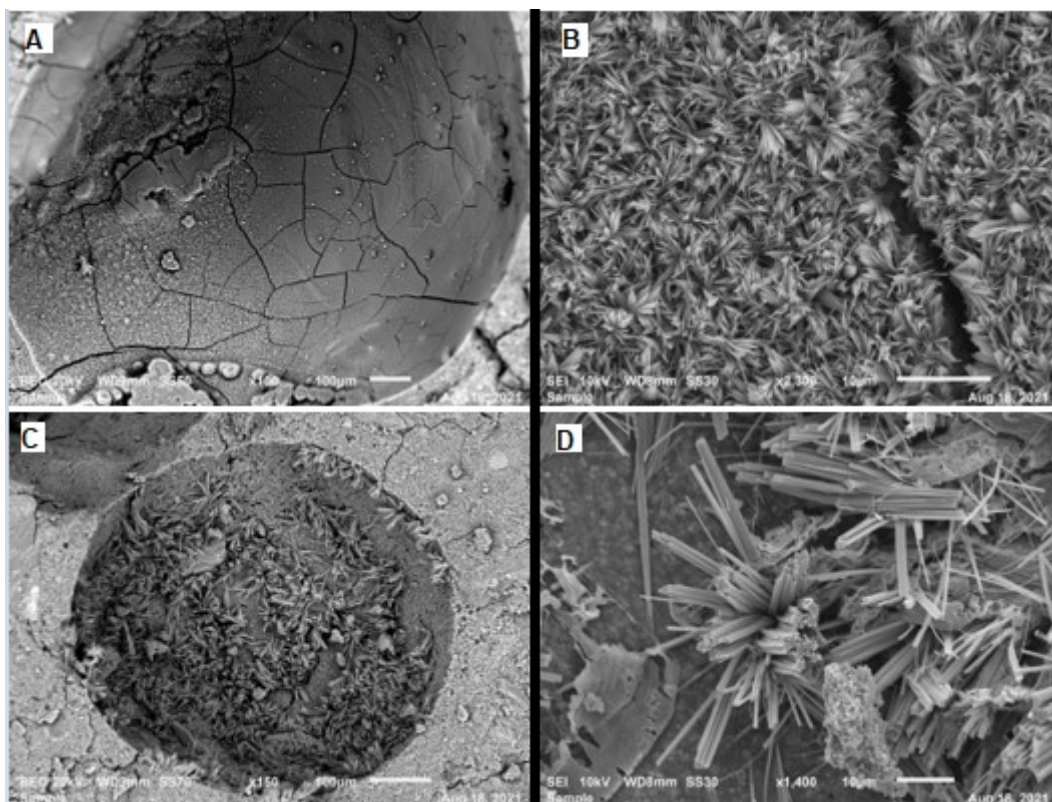
Aos 88 dias contados a partir do dia de imersão em solução de NaOH uma barra de cada amostra foi escolhida aleatoriamente para ser preparada para análise de MEV em busca da identificação da formação dos géis expansíveis da RAA nos quatro tipos de cimento, os resultados são apresentados nas Figuras abaixo. A Figura 45 se refere às amostras de CP V.



**Figura 45. MEV da matriz da argamassa de cimento CP V.
Fonte: Pessoal.**

Com a análise da matriz da argamassa do cimento CP V apresentada na Figura 45, pode-se notar a presença de formação de produtos nos poros das amostras com morfologia característica da RAA. Na Figura 45 A e C é possível identificar a formação de um gel cristalizado em forma de rosáceas, semelhante ao encontrado por Shi, Ma, Lothenbach (2021) e Arrais (2011). Em outro local da amostra, identificou-se um gel gretado presente no poro da amostra, também encontrado por Hasparyk (2005). Na Figura 45 D observa-se um poro com géis de diferentes morfologias.

A Figura 46 apresenta as imagens da matriz da argamassa de cimento CP IV.



**Figura 46. MEV da matriz da argamassa de CP IV.
Fonte: Autor, 2021.**

Na Figura 46A observa-se um poro preenchido por gel gretado característico da RAA, parcialmente coberto por outro produto em forma de plaquetas alongadas (Figura 46 B). Na Figura 46 C encontra-se um poro coberto por um produto cristalizado em forma de agulhas, semelhante a morfologia dos géis encontrados por Shi, Ma, Lothenbach (2021), na Figura 46 C é possível observar melhor a morfologia do produto do poro em uma aproximação de 1400x.

Na Figura 47 e 49 pode-se observar as imagens de MEV das argamassas de CSS75 e CSS85.

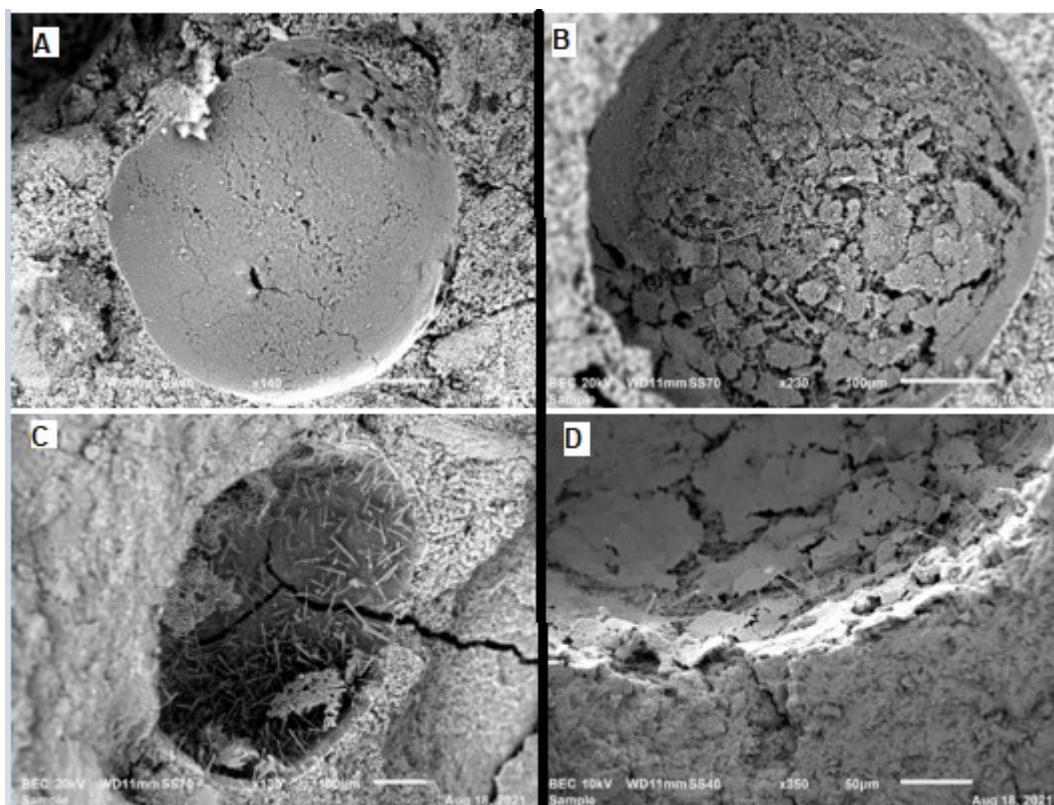
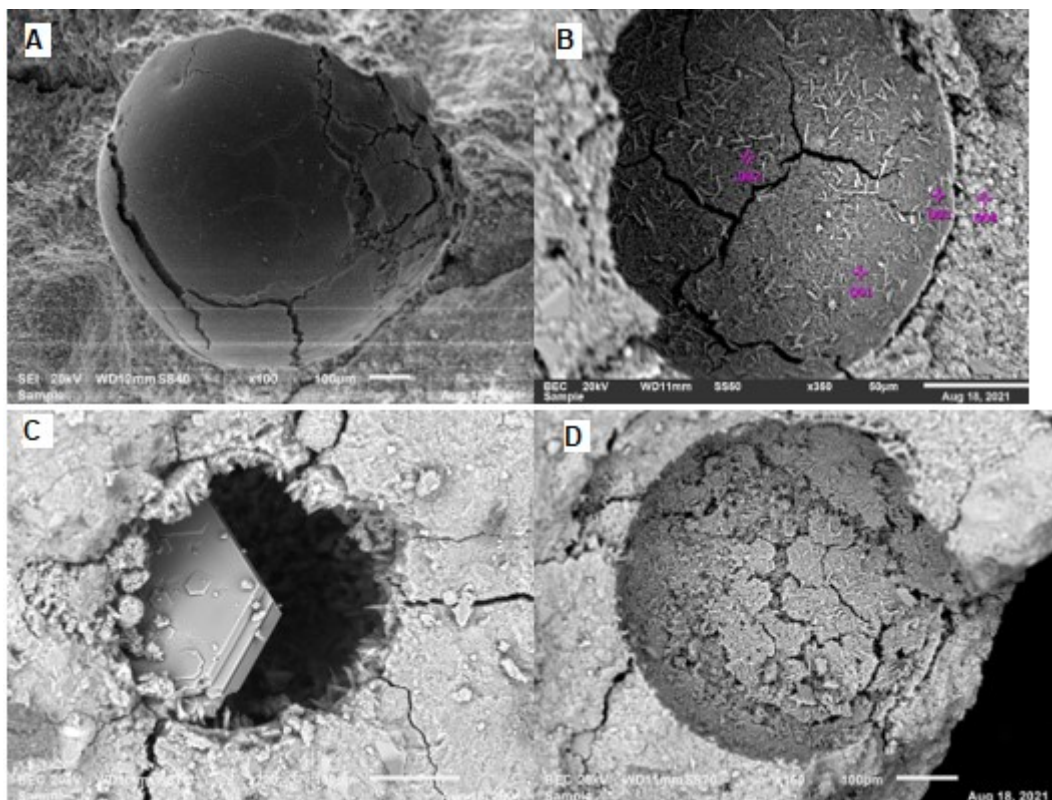


Figura 47. MEV da matriz da argamassa de CSS75.
Fonte: Pessoal.

Na composição de CSS75 se encontrou poros preenchidos por produto de morfologia diferente dos encontrados nos cimentos Portland (Figura 47 A, B e D), foi observada a presença de agulhas de etringita presente no interior dos poros das amostras (Figura 47C). A etringita é um dos produtos iniciais da hidratação do CSS, começa a se formar quase imediatamente na hidratação e finda após os 7 dias, sendo a principal fase responsável para o início do desenvolvimento da resistência mecânica. Entre as agulhas de etringita, nota-se a presença de um produto aglomerado não identificado. A fissura presente no poro pode ter sido causada pelo processo de preparo da amostra para a análise de MEV. Na Figura 48 encontra-se as imagens de MEV das amostras do CSS85.



**Figura 48. MEV da matriz de argamassa CSS85.
Fonte: Pessoal.**

Nas amostras de CSS85 encontram-se poros cobertos por produto de morfologia diferente dos géis característicos da RAA, na Figura 48 A, B e D observa-se um produto em forma de pequenas agulhas cobrindo o gel dos poros. Na Figura 48 C pode-se ver um poro com a presença de Portlandita e coberto por produto de hidratação do cimento.

A Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) foi realizada nos géis encontrados com o objetivo de identificar sua composição química. A Figura 49 apresenta a identificação dos pontos analisados no EDS, a composição química dos géis se encontra na Tabela 12.

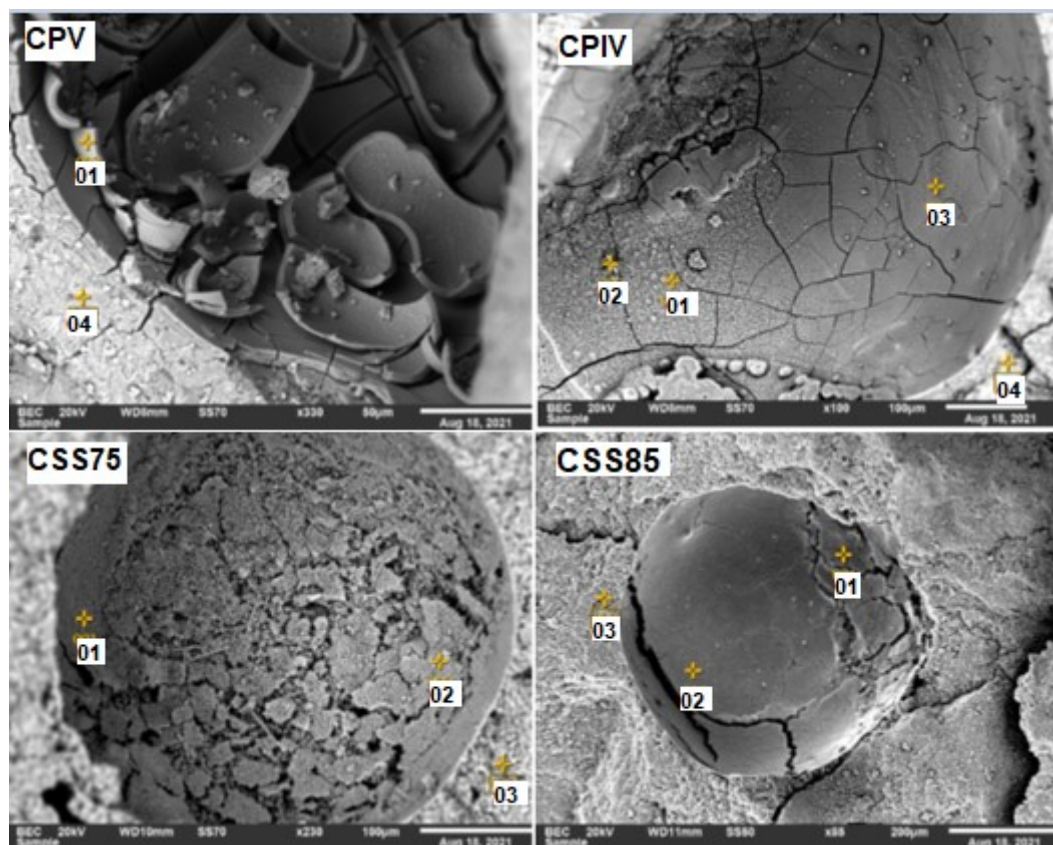


Figura 49. Identificação dos pontos de EDS para as amostras de CPV, CPV, CSS75 e CSS85.

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 12. Composição química dos produtos encontrados nos cimentos identificados na Figura 49.

Amostras	Pontos	Composição química (%)									
		CaO	C	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	FeO	Ca	Si	CaO/SiO ₂
CPV	1	6,75	65,71	0	4,77	16,43	0	6,34	4,8	7,66	0,63
	4*	8,87	53,73	7,03	4,41	14,84	0	11,11	6,33	6,92	0,91
CP IV	1	17,95	51,38	7,09	3,89	15,29	0	0	12,82	7,13	1,80
	2	10,08	54,01	3,23	6,62	15,65	0	10,41	7,2	7,3	0,99
	3	12,54	52,22	3,05	3,25	21,04	0	7,9	8,95	9,81	0,91
	4*	19,91	-	3,3	11,76	40,11	0	24,92	14,22	18,71	0,76
CSS75	1	29,24	30,64	3,54	4,37	12,26	17,89	0	20,88	5,72	3,65
	2	33,67	23,78	3,3	4,13	12	21,13	0	24,05	5,6	4,29
	3*	50,87	8,52	2,08	3,48	11,57	23,39	0	36,33	5,39	6,74
CSS85	1	31,11	29,39	0	7,78	5	26,72	0	22,22	2,33	9,54
	2	21,81	37,56	0	7,82	10,44	22,37	0	15,57	4,87	3,20
	3*	69,32	14,09	0	6,15	4,71	5,73	0	49,51	2,19	22,61

Fonte: Autor, 2021. *Pontos fora do poro.

Foi possível observar uma evidente diferença no teor de cálcio dos géis formados em cada cimento, onde os dois cimentos Portland apresentaram as

menores relações de Ca/Si, todas abaixo de 1,5, característico do gel da reação álcali agregado. Já os géis encontrados nos poros do CSS apresentam uma relação Ca/Si consideravelmente superior ao do cimento Portland, indicando uma maior absorção de cálcio pelo gel. Com isso é possível observar que os géis com maior absorção de cálcio foram os que causaram as menores expansões, como observado por Leemann et al. (2011), onde a absorção de água pelos géis diminuiu com o aumento do teor de cálcio no produto, e géis com relação Ca/Si entre 0,2 e 0,3 tiveram maior absorção de água. Já o produto formado no CSS, com relação Ca/Si acima de 1,5 não se caracteriza como produto da RAA. O teor de alumina presente nos produtos da RAA foi variável, não sendo possível relacionar com o potencial expansivo do produto.

4.4 Análise de absorção

Na Figura 49 observa-se os resultados de absorção das amostras de argamassa de CSS75, CSS85, CPIV e CPV com 90 dias contados a partir do dia de imersão em solução de NaOH.

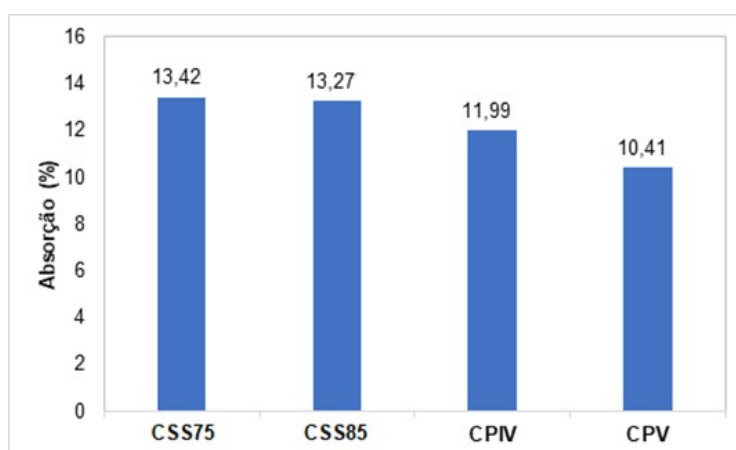


Figura 50. Gráfico de absorção das argamassas aos 90 dias.
Fonte: Pessoal.

Os dois tipos de CSS apresentaram maior porosidade quando comparado ao CPIV e CPV. Hay e Ostertag (2019) observaram que a adição de alumina na argamassa resultou em uma maior formação de vazios que atuam como espaço de acomodação para os géis de RAA.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho dois CSS com diferentes proporções de escória e gipsita foram produzidos com o objetivo de avaliar sua eficiência no combate à reação álcali agregado, tendo como referência os cimentos Portland CPV e CPIV. O efeito teor de alumina e de cálcio encontrados em cada cimento foram os fatores considerados para análise, já que há o fornecimento constante de álcalis durante todo o ensaio, o teor alcalino dos cimentos não teve influência nas expansões.

O CSS foi considerado eficaz na mitigação da RAA e os danos associados a ela, tanto o CSS75 quanto o CSS85 e cimento CPIV se classificam como potencialmente inócuos, mantendo a expansão abaixo do limite normativo de 0,19%. A partir dos 28 dias notou-se uma tendência a estabilização na expansão dos CSS e CPIV. Já o cimento CPV foi classificado como potencialmente deletério, apresentando expansão de 17% acima do limite aos 33 dias e uma expansão crescente sem se estabilizar até o encerramento das leituras aos 75 dias.

Observou-se maior eficácia na mitigação da RAA nos CSS, o que já era esperado devido ao efeito de redução da dissolução de sílica reativa através da película de proteção formada pelo Al mostrado em outras pesquisas. Ao analisar os 2CSS, nota-se que as expansões reduzem nos cimentos com maior teor de alumina. O CSS85 com 8,90% de alumina e 53,07% de cálcio foi o que apresentou a maior capacidade de mitigação da RAA, seguido do CSS75 com 7,90% de alumina e 51,02% de cálcio. Já o cimento CPIV com 12,34% de alumina e 49,94% de cálcio apresentou maiores expansões quando comparado aos CSS. O CPV é o material com menor teor de alumina e maior teor de cálcio, resultando em expansões potencialmente deletérias.

Ao analisar o teor de cálcio e alumina nos produtos da RAA, foi possível relacionar o cálcio presente com o potencial expansivo do gel, onde a maior relação Ca/Si foi encontrada nos géis formados no CSS, com as menores expansões. Com isso, é possível concluir que a absorção de cálcio pelo gel da RAA reduz a absorção de água e conseqüentemente o potencial expansivo dos produtos.

Obteve-se resultados de resistência mecânica do CSS75 e CSS85 semelhantes, em ambos houve ganho de resistência ao longo do tempo, tanto em solução de cal quanto de NaOH. Os corpos de prova de cimento CPIV em solução de cal atingiram sua resistência máxima já aos 28 e se estabilizou até os 62 dias, diferente dos que

permaneceram em solução de NaOH onde houve uma redução da resistência no mesmo período. No cimento CPV rompido aos 28 e 111 dias se observou 3,2% de ganho de resistência entre os dois rompimentos dos corpos de prova em solução de cal, as amostras em solução de NaOH tiveram a resistência mecânica prejudicada pela RAA, tendo uma perda de 29,58% aos 111 dias na resistência mecânica.

Observou-se maior porosidade nos CSS e conseqüentemente uma menor resistência mecânica quando comparado aos cimentos Portland.

O emprego do CSS é uma alternativa que se mostrou eficaz no controle da RAA, no entanto, a resistência mecânica é consideravelmente inferior ao cimento Portland, ficando a critério do responsável a análise de viabilidade do emprego do CSS na presença de um agregado reativo. Estudos mais aprofundados são necessários para que o desenvolvimento do fenômeno seja mais bem compreendido e o material usado no combate das expansões atinja seu melhor desempenho, através de ensaios mais lentos em concreto e argamassa, por um período de análise maior.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo: Boletim Técnico 106, 2002.

ACI COMMITTEE 221. ACI 221.1R-98. State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, p. 1-31, 1998.

ANDRADE, T. Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana de Recife. RAA 2006 – **II Simpósio sobre Reação Alkali-Agregado em Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro, 2006.

ANDRIOLO, F. R. **AAR – Dams affected in Brazil – Report of the current situation**. In: International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 11, 2000, Québec. Anais. Québec, 2000. p. 1243-1252.

ANGULSKI DA LUZ, C.; HOOTON, R. D. Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age. **Cement and Concrete Research**, v. 77, p. 69–75, 2015.

ARRAIS, Miguel Sebastião Maia Chaves. **Reação álcali-silicato: Avaliação do comportamento de agregados graúdos da região metropolitana de Recife frente a diferentes tipos de cimento**. UFPE, Recife, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1: Agregados – RAA – Guia para avaliação**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 12654: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 15577-1: Agregados – RAA – Guia para avaliação**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15577-4: Agregados – RAA – Ensaio acelerado de barras de argamassa**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 16697: Cimento Portland-Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e Concreto Endurecidos: Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASTM C348-02. **Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars**. Philadelphia, 2002.

BATTAGIN, A. Associação Brasileira de Cimento Portland. Divulgando conhecimento sobre a RAA para sua prevenção. **In: Concreto e construções**. Ano 44. Ed. Ibracon, Jul-Set 2016.

BATTAGIN, A. et al. Associação Brasileira de Cimento Portland. A evolução da cultura da prevenção da reação álcali-agregado no mercado nacional. **In: Concreto e construções**. Ano 44. Ed. Ibracon, Jul-Set 2016.

BÉRUBÉ, M. A. et al. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1215–1227, 2002.

BLESZYNSKI, R. F.; THOMAS, M. D. A. Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions. **Advanced Cement Based Materials**, v. 7, n. 2, p. 66–78, 1 mar. 1998.

BOUIKNI, A.; SWAMY, R. N.; BALI, A. Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2836–2845, 2009.

CHAPPEX, T.; SCRIVENER, K. Alkali fixation of C-S-H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1049–1054, 2012.

CHAPPEX, T.; SCRIVENER, K. L. The Effect of Aluminum in Solution on the Dissolution of Amorphous Silica and its Relation to Cementitious Systems. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 96, p. n/a-n/a, 2012.

CHAPPEX, T.; SCRIVENER, K. L. The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1645–1649, 2012.

COLLIER, N. C. *et al.* The suitability of a supersulfated cement for nuclear waste immobilisation. **Journal of Nuclear Materials**, v. 452, p. 457–464, 2014.

COUTO, T. A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. The chemistry of "alkali-aggregate" reaction. **Cement and Concrete Research**, v.11, p. 1-9. 1981a.

EN 15743, Supersulfated cement - Composition, specifications and conformity criteria. **European Committee for Standardization**, 2010.

ESCALANTE-GARCIA, J. I. et al. Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass: Effect of temperature and alkali concentration. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 323–328, 2014.

FERRARIS C. F. (1995) Alkali–silica reaction and high performance concrete. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.

FERNANDES, I. "Composition of alkali-silica reaction products at different locations within concrete structures", **Materials Characterization**, v. 60, p. 655–668, 2009.

FIGUEIRA, R. B. et al. Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. **Construction and Building Materials** , v. 222, p.903-931, 2019.

GARCÍA-LODEIRO, I., PALOMO, A., & FERNÁNDEZ-JIMÉMEZ, A. Alkali–aggregate reaction in activated fly ash systems. **Cement and Concrete Research**, 37(2), p. 175–183, 2007.

GLASSER, F. P., In: SWAMY, R. N. The Alkali-Silica Reaction in Concrete. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, p. 30-53, 1992.

GRUSKOVNJAK, A.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; FIGI, R.; KO, S. C.; ADLER, M.; MÄDER, U. Hydration mechanisms of super sulphated slag cement. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 983-992, 2008.

HASPARYK, N. P. **Investigação de Concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil).Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado-efeito da cinza da casca de arroz e da sílica ativa**. 1999. 257 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

HAHA, M. BEN et al. Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1206–1214, 2007.

HAY, R., OSTERTAG, C. P. "On utilization and mechanisms of waste aluminium in mitigating alkali-silica reaction (ASR) in concrete", **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 864–879, 2019.

HAY, R., OSTERTAG, C. P. "New insights into the role of fly ash in mitigating alkali-silica reaction (ASR) in concrete", **Cement and Concrete Research**, v. 144, p. 106440, 2021.

HERNÁNDEZ-CRUZ, D. et al. Fiber reinforced mortar affected by alkali-silica reaction: A study by synchrotron microtomography. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 123–130, 2016.

HESTER, D.; MCNALLY, C.; RICHARDSON, M. A study of the influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 661–665, 2005.

HONG, S. Y.; GLASSER, F. P. Alkali binding in cement pastes: Part I. The C-S-H phase. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1893–1903, 1999.

HÜNGER, K. J. The contribution of quartz and the role of aluminum for understanding the AAR with greywacke. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1193–1205, 2007.

ILER, R. K. Effect of adsorbed alumina on the solubility of amorphous silica in water. **Journal of Colloid And Interface Science**, v. 43, p. 399–408, 1973.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem De Escória De Alto Forno No Brasil. **John & Agopyan**, n. 1, p. 1–5, 2002.

JOHN, V. M. **Cimento de escoria ativada com silicatos de sodio**.1995. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Departamento de Engenharia de Construcao Civil. Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo. Universidade de Sao Paulo –USP. Sao Paulo – SP. 1995.

JUENGER, M. C. G. et al. **Advances in alternative cementitious binders****Cement and Concrete Research**, v. 41. p. 1232-1243, 2011.

KAWAMURA, M.; IWAHORI, K. ASR gel composition and expansive pressure in mortars under restraint. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 1, p. 47–56, 1 jan. 2004.

KONING, E. et al. Rapid post-mortem incorporation of aluminum in diatom frustules: Evidence from chemical and structural analyses. **Marine Chemistry**, v. 103, p. 97–111, 2007.

LEEMANN, A., SHI, Z., WYRZYKOWSKI, M., *et al.* "Moisture stability of crystalline alkali-silica reaction products formed in concrete exposed to natural environment", **Materials & Design**, v. 195, p. 109066, 1 out. 2020.

LEEMANN, A., SHI, Z., LINDGÅRD, J. "Characterization of amorphous and crystalline ASR products formed in concrete aggregates", **Cement and Concrete Research**, v. 137, p. 106190, 2020.

LEEMANN, A. et al. Alkali-Silica Reaction: the Influence of Calcium on Silica Dissolution and the Formation of Reaction Products. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 94, p. 1243–1249, 2011.

LIU, S. et al. Influence of fineness on hydration kinetics of supersulfated cement. **Thermochimica Acta**, v. 605, p. 37–42, 2015.

LU, D. et al. Evaluation of accelerated test methods for determining alkali-silica reactivity of concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 28, p. 546-554, 2006.

MADUREIRA, E. L. **Simulação numérica do comportamento mecânico de elementos de concreto armado afetados pela reação álcali-agregado**. 2007. 219 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

MALVAR, L. J. et al. Alkali-Silica Reaction Mitigation: state of the art and recommendations. **ACI MATERIALS JOURNAL**, v. 99, p. 480-489, 2002.

MASOUDI, R.; HOOTON, R. D. Examining the hydration mechanism of supersulfated cements made with high and low-alumina slags. **Cement and Concrete Composites**, v. 103, p. 193–203, 2019.

MATSCHEI, T.; BELLMANN, F.; STARK, J. Hydration behaviour of sulphate-activated slag cements. **Advances in Cement Research**, v. 17, p. 167-178, 2005.

MASSUCATO, C. J. **Utilização de escoria de alto-forno e carvão vegetal como adição no concreto**. 2005. 105f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 2005.

MIN, D.; MINGSHU, T. Measures to inhibit alkali-dolomite reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 1115–1120, 1993.

MULTON, S.; SELIER, A.; CYR, M. Chemo-mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 490–500, 2009.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silicato**. 2007. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

OLIVEIRA, C. T. A.; AGOPYAN, V. **Água do poro de pastas de cimentos de escória**. 18 f. Boletim técnico. São Paulo, 2000.

NOVAK, D.; SOMMER, H. A new low-heat sulfate resistant binder for mass concrete, HPC and SCC. In: *Challenges of Concrete Construction*, v. 5, p. 213-222, *Sustainable Concrete Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK*, 2002.

PAN, J. W. et al. Modeling of alkali-silica reaction in concrete: a review. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 6, p.1-18, 2012.

PAULON, V.A., **Reações álcali-agregado em concreto**. 1981. 114 f. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

PECCHIO, M. et al. Produtos da reação álcali-silicato em concretos de edificações da região do grande Recife-PE. In. **II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO**, 2006, Rio de Janeiro.

PINTO, S. R. et al. Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate. **Cement and Concrete Research**, v. 136, p. 106172, 1 out. 2020.

RAJABIPOUR, F. et al. Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 130–146, 2015.

RICHARDSON, I. G. Nature of the hydration products in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 97–113, 2000.

RUBERT, S. **Contribuição ao estudo de cimentos supersulfatados: formulação e mecanismos de hidratação**. 2015. 115 f. Dissertação (Mestrado Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco-PR, 2015.

SAHA, A. K.; SARKER, P. K. Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 135–142, 2016.

SHAFATIAN, S. 'Innovative methods to mitigate alkali-silica reaction in concrete materials containing recycled glass aggregates'. (2012). 209 f. Dissertation (PhD), Pennsylvania State University, 2012

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. Effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1063–1072, 2000.

SHI, Z., MA, B., &LOTHENBACH, B. Effect of Al on the formation and structure of alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Research**, v.140, p. 106-311, 2021.

SHI, Z.; LOTHENBACH, B. The combined effect of potassium, sodium and calcium on the formation of alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Research**, v. 127, p. 105-914, 2020.

SHI, Z. et al. Synthesis, characterization, and water uptake property of alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Research**, v. 121, p. 58–71, 2019.

SHI, Z.; LOTHENBACH, B. The role of calcium on the formation of alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Research**, v. 126, p. 105898, 2019.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso/CHESF: influência da reação nas propriedades do concreto.** 2007. 241 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

STANTON, Thomas E., Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. **Proceeding pf American Society of Civil Engineers**. V.66, n.10, p. 1781-1811. 1940.

STRACK, C. M. et al. Impact of aggregate mineralogy and exposure solution on alkali-silica reaction product composition and structure within accelerated test conditions. **Construction and Building Materials**, v. 240, p. 117929, 2020.

SZELES, T. et al. Mitigation of Alkali-Silica Reaction by Hydrated Alumina. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research**, v. 2629, p. 15–23, 2017.

TIECHER, Francieli. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado.** 2006. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia).Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

THOMAS, M. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review.**Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1224-1231, 2011.

VALDUGA, L. **Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado.** 2007. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos no estado de São Paulo.** 2002. 225 f.Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UNICAMP, Campinas, 2002.

WANG, H.; GILLOTT, J. E. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 647–654, 1991.

WOLTRON, G. **The utilisation of GGBFS for advanced supersulfated cements.** World Cement, 2009.

APÊNDICE A

Aqui são apresentadas as leituras realizadas durante a análise de expansão das barras de argamassa.

Tabela 13. Dados de expansão do CSS75

Dias	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	Média (%)
7	0,0219	0,0126	0,0333	0,0226
12	0,0196	0,0060	0,0035	0,0097
14	0,0077	0,0049	-0,0014	0,0037
19	0,0316	0,0123	0,0060	0,0166
21	0,0260	0,0081	0,0067	0,0136
26	0,0221	0,0133	0,0105	0,0153
28	0,0389	0,0281	0,0253	0,0308
33	0,0175	0,0042	0,0035	0,0084
35	0,0298	0,0172	0,0133	0,0201
40	0,0326	0,0123	0,0049	0,0166
42	0,0000	-0,0179	-0,0249	-0,0143
47	0,0042	0,0014	-0,0042	0,0005
49	0,0123	-0,0067	-0,0109	-0,0018
54	0,0151	-0,0053	-0,0091	0,0002
56	-0,0004	0,0140	0,0102	0,0080
61	0,0039	-0,0088	-0,0123	-0,0057
63	0,0028	-0,0116	-0,0154	-0,0081
68	0,0007	-0,0133	-0,0175	-0,0101
70	0,0032	-0,0091	-0,0130	-0,0063
75	0,0098	-0,0390	-0,0400	-0,0231
77	0,0077	-0,0056	-0,0158	-0,0046
82	0,0074	-0,0056	-0,0091	-0,0025
84	0,0018	-0,0144	-0,0165	-0,0097
89	-	-0,0056	-0,0091	-0,0074
91	-	-0,0046	-0,0102	-0,0074
96	-	-0,0056	-0,0081	-0,0068
98	-	-0,0119	-0,0144	-0,0132
103	-	-0,0158	-0,0158	-0,0158
105	-	0,0000	0,0014	0,0007
110	-	-0,0004	-0,0032	-0,0018
112	-	-0,0046	-0,0088	-0,0067
117	-	-0,0046	-0,0084	-0,0065
119	-	-0,0123	-0,0347	-0,0235
138	-	0,0021	-0,0011	0,0005
140	-	-0,0004	-0,0130	-0,0067

Dias	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	Média (%)
145	-	-0,0074	-0,0126	-0,0100
147	-	0,0000	-0,0042	-0,0021
152	-	0,0000	-0,0042	-0,0021

Fonte: Pessoal.

Tabela 14. Dados de expansão doCSS85

Dias	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	Média (%)
7	-0,0358	-0,0372	-0,0179	-0,0303
12	0,0067	-0,0102	-0,0011	-0,0015
14	-0,0042	-0,0218	-0,0063	-0,0108
19	-0,0137	-0,0239	-0,0133	-0,0170
21	-0,0042	-0,0133	-0,0042	-0,0073
26	-0,0112	-0,0193	-0,0119	-0,0142
28	0,0102	-0,0077	-0,0018	-0,0047
33	0,0056	-0,0053	0,0039	0,0014
35	0,0154	-0,0011	0,0095	0,0072
40	0,0098	-0,0060	0,0032	0,0019
42	0,7225	0,2984	0,5957	0,5104
47	-0,0246	-0,0467	-0,0274	-0,0356
49	-0,0435	-0,0558	-0,0365	-0,0497
54	-0,0281	-0,0534	-0,0333	-0,0407
56	-0,0439	-0,0632	-0,0291	-0,0535
61	-0,0232	-0,0484	-0,0235	-0,0358
63	-0,0218	-0,0488	-0,0235	-0,0353
68	-0,0193	-0,0453	-0,0249	-0,0323
70	-0,0239	-0,0488	-0,0263	-0,0363
75	-0,0140	-0,0555	-0,0295	-0,0348
77	-0,0193	-0,0449	-0,0256	-0,0321
82	-0,0242	-0,0600	-0,0376	-0,0421
84	-0,0211	-0,0481	-0,0407	-0,0346
89	-	-0,0484	-0,0253	-0,0369
91	-	-0,0590	-0,0414	-0,0502
96	-	-0,0453	-0,0214	-0,0333
98	-	-0,0562	-0,0333	-0,0448
103	-	-0,0488	-0,0221	-0,0355
105	-	-0,0439	-0,0207	-0,0323
110	-	-0,0456	-0,0232	-0,0344
112	-	-0,0576	-0,0344	-0,0460
117	-	-0,0506	-0,0274	-0,0390
119	-	-0,0428	-0,0200	-0,0314
138	-	-0,0435	-0,0211	-0,0323
140	-	-0,0421	-0,0175	-0,0298

Dias	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	Média (%)
145	-	-0,0513	-0,0288	-0,0400
147	-	-0,0513	-0,0288	-0,0400
152	-	-0,0418	-0,0168	-0,0293

Fonte: Pessoal.

Tabela 15. Dados de expansão do CPIV

Dias	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	Média (%)
7	0,0056	0,0063	0,0182	0,0101
12	0,0112	0,0095	0,0217	0,0141
14	0,0123	0,006	0,021	0,0131
19	0,0203	0,0196	0,0319	0,0240
21	0,0137	0,0147	0,026	0,0181
26	0,027	0,0326	0,0217	0,0271
28	0,0277	0,0389	0,0502	0,0389
33	0,0263	0,0298	0,0494	0,0352
35	0,0389	0,04	0,0642	0,0477
40	0,0407	0,0442	0,067	0,0506
42	0,0466	0,0435	0,0652	0,0518
47	0,0158	0,0214	0,0393	0,0255
49	0,0246	0,0232	0,0491	0,0323
54	0,0256	0,0263	0,0484	0,0334
56	0,0225	0,0228	0,0445	0,0299
61	0,026	0,027	0,0463	0,0331
63	0,0281	0,0274	0,0484	0,0346
68	0,0253	0,0256	0,0459	0,0323
70	0,0253	0,0263	0,0459	0,0325
75	0,0228	0,0239	0,0428	0,0298
77	0,0267	0,0333	0,0523	0,0374
82				
84	Leituras não realizadas devido ao agravamento da pandemia			
89				
91				
96	0,034	0,0326	0,0509	0,0392
98	0,0309	0,0361	0,0519	0,0396
103	0,0267	0,0309	0,0477	0,0351
105	0,0196	0,0246	0,0407	0,0283
110	0,0347	0,0428	0,053	0,0435
112	0,0253	0,0277	0,0452	0,0327
117	0,1405	0,1454	-0,149	0,0455
119	0,0333	0,0347	0,1234	0,0638

Tabela 16. Dados de expansão CP V.

Dias	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	CP4 (%)	Média (%)
7	0,0239	0,0200	0,0140	0,0193	0,0193
12	0,0333	0,0305	0,0242	0,0274	0,0289
14	0,0375	0,0312	0,0305	0,0309	0,0325
19	0,0477	0,0435	0,0445	0,0431	0,0447
21	0,0533	0,0516	0,0589	0,0502	0,0535
26	0,0722	0,0722	0,1083	0,0708	0,0809
28	0,1087	0,1111	0,1503	0,1136	0,1209
33	0,2108	0,2202	0,2729	0,1879	0,2229
35	0,2485	0,2604	0,3165	0,2489	0,2686
40	0,3301	0,3514	0,4109	0,3298	0,3556
42	0,3615	0,3876	0,4482	0,3657	0,3907
56	0,3517	0,3772	0,4405	0,3542	0,3809
61	0,3531	0,3817	0,4419	0,3545	0,3828
68	0,3329	0,3765	0,4367	0,3510	0,3743
70	0,3524	0,1237	0,7408	0,2384	0,3638
75	0,3552	0,3793	0,4360	0,3493	0,3799

Fonte: Pessoal.

APÊNDICE B

As tabelas a seguir apresentam os resultados de resistência mecânica obtidos nesse estudo.

Tabela 17. Resultados de resistência mecânica na Cal- CSS75

Idade	Resistência	Média	Desvio Padrão	Valores adotados	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
28	18,49	17,27	1,15	-	16,66	0,64	0,04
	17,11			17,11			
	16,21			16,21			
182	23,73	23,41	0,50	23,73	23,70	0,04	0,00
	22,84			-			
	23,67			23,67			

* Valores adotados correspondem ao intervalo de (média + desvio padrão) e (média - desvio padrão)

Tabela 18. Resultados de resistência mecânica na solução de NaOH- CSS CSS75

Idade	Resistência	Média	Desvio Padrão	Valores adotados	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
28,00	20,42	25,03	4,16	-	27,34	1,68	0,06
	26,15			26,15			
	28,52			28,52			
182,00	31,33	32,17	0,78	-	32,59	0,41	0,01
	32,88			32,88			
	32,30			32,30			

* Valores adotados correspondem ao intervalo de (média + desvio padrão) e (média - desvio padrão)

Tabela 19. Resultados de resistência mecânica na Cal- CSS85

Idade	Resistência	Média	Desvio Padrão	Valores adotados	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
28	16,26	17,18	0,91	-	17,65	0,62	0,03
	17,21			17,21			
	18,08			18,08			
111	20,57	19,31	1,11	-	18,68	0,26	0,01
	18,49			18,49			
	18,86			18,86			

* Valores adotados correspondem ao intervalo de (média + desvio padrão) e (média - desvio padrão)

Tabela 20. Resultados de resistência mecânica na solução de NaOH- CSS85

Idade	Resistência	Média	Desvio Padrão	Valores adotados	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
28,00	24,97	24,62	0,91	24,97	25,31	0,24	0,01
	25,31			25,31			
	23,59			-			
111,00	24,78	27,48	2,90	24,78	25,96	1,66	0,06
	30,54			-			
	27,13			27,13			

* Valores adotados correspondem ao intervalo de (média + desvio padrão) e (média - desvio padrão)

Tabela 21. Resultados de resistência mecânica na Cal- CP IV

Idade	Resistência	Média	Desvio Padrão	Valores adotados	Media	Desvio padrão	Coefficiente de variação
28,00	44,79	44,32	0,51	44,79	44,39	0,28	0,01
	43,78			-			
	44,39			44,39			
62,00	54,35	53,22	1,74	54,35	54,23	0,18	0,00
	54,10			54,10			
	51,22			-			

* Valores adotados correspondem ao intervalo de (média + desvio padrão) e (média - desvio padrão)

Tabela 22. Resultados de resistência mecânica na solução de NaOH- CP IV

Idade	Resistência	Média	Desvio Padrão	Valores adotados	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
28,00	50,96	50,62	1,80	50,96	52,22	0,89	0,02
	52,22			52,22			
	48,67			-			
111,00	51,60	49,24	3,62	51,60	51,33	0,38	0,01
	45,07			-			
	51,06			51,06			

* Valores adotados correspondem ao intervalo de (média + desvio padrão) e (média - desvio padrão)

Tabela 23. Resultados de resistência mecânica na Cal- CP V

Idade	Resistência	Média	Desvio Padrão	Valores adotados	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
-------	-------------	-------	---------------	------------------	-------	---------------	--------------------------

28	50,07	53,11	2,81	-	54,63	1,39	0,03
	55,61			55,61			
	53,65			53,65			
111	70,35	67,50	2,91	70,35	68,99	1,93	0,03
	67,62			67,62			
	64,53			-			

* Valores adotados correspondem ao intervalo de (média + desvio padrão) e (média - desvio padrão)

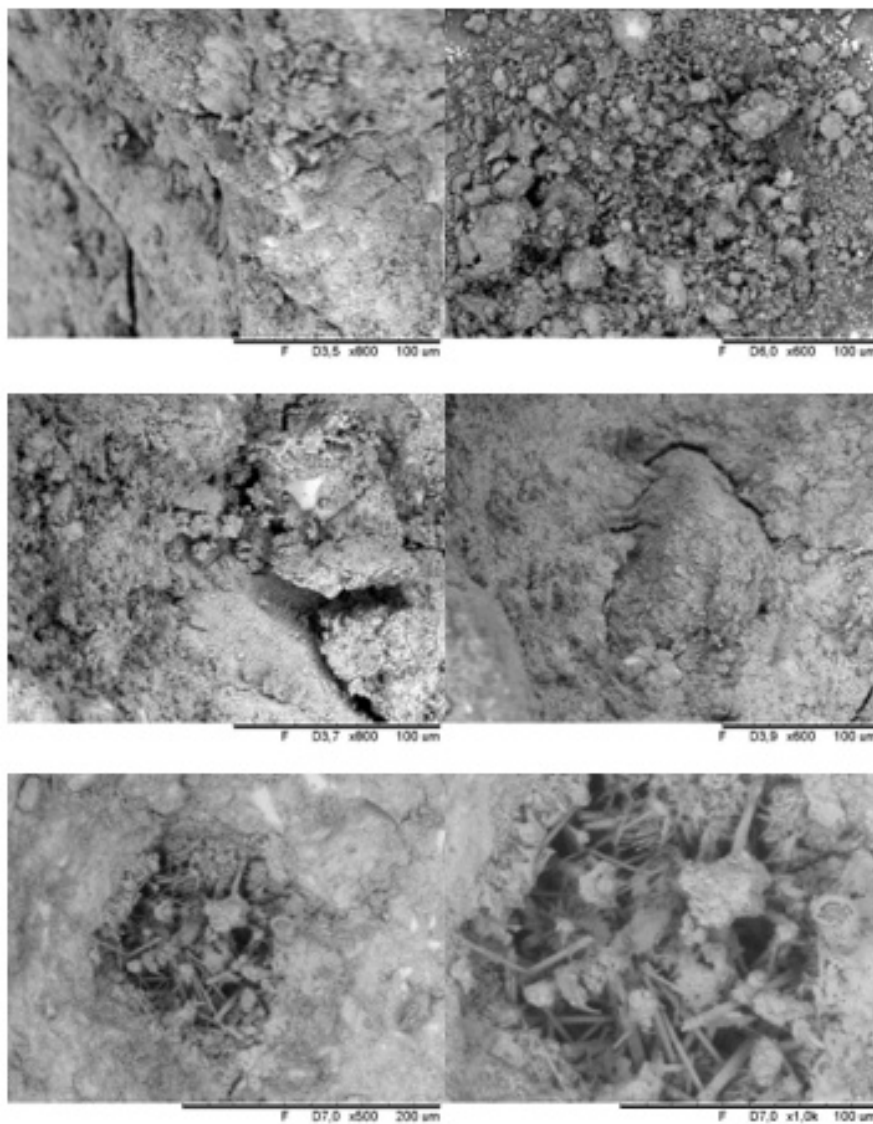
Tabela 24. Resultados de resistência mecânica na solução de NaOH- CP V

Idade	Resistência	Média	Desvio Padrão	Valores adotados	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
28	56,74	56,50	0,25	56,74	56,38	0,25	0,00
	56,51			56,51			
	56,24			56,24			
111	47,26	51,60	5,39	47,26	48,58	1,87	0,04
	57,64			-			
	49,90			49,90			

* Valores adotados correspondem ao intervalo de (média + desvio padrão) e (média - desvio padrão)

APÊNDICE C

Na sequência é apresentado todas as imagens obtidas através da análise de MEV.



**Figura 51. Imagens de MEV do CSS75.
Fonte: Pessoal.**

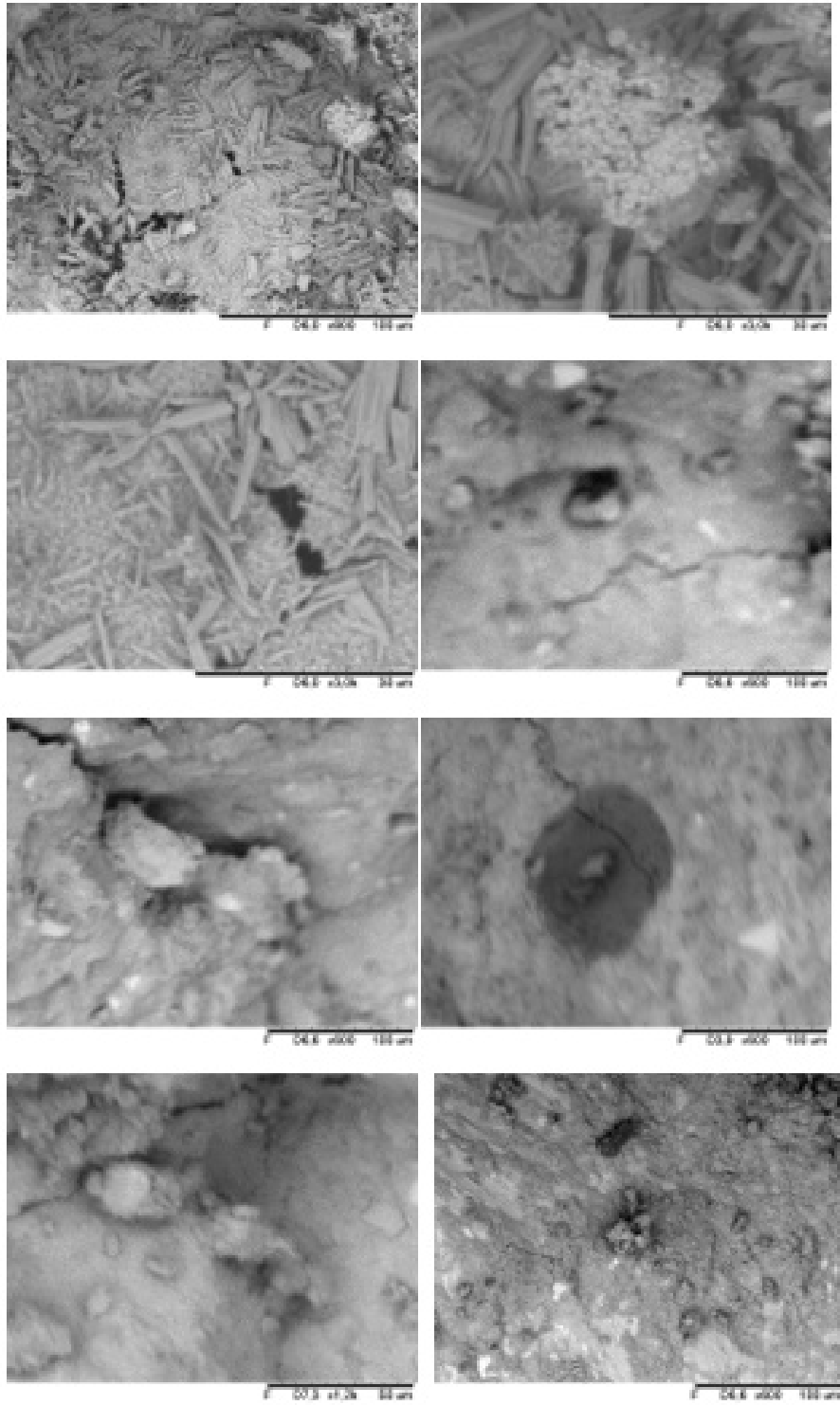
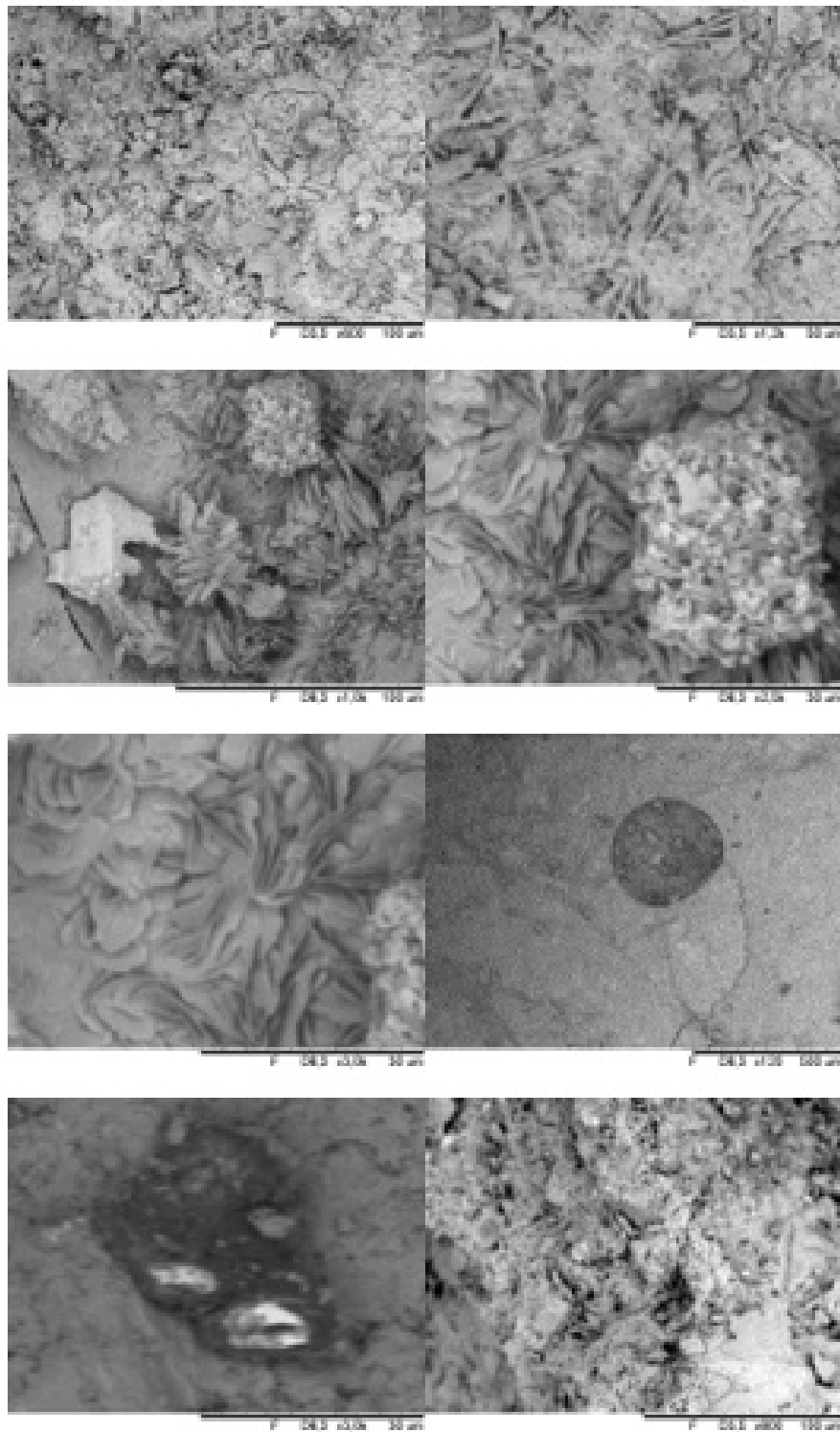


Figura 52. Imagens de MEV do CSS85.
Fonte: Pessoal.



**Figura 53. Imagens de MEV do CPV.
Fonte: Pessoal.**

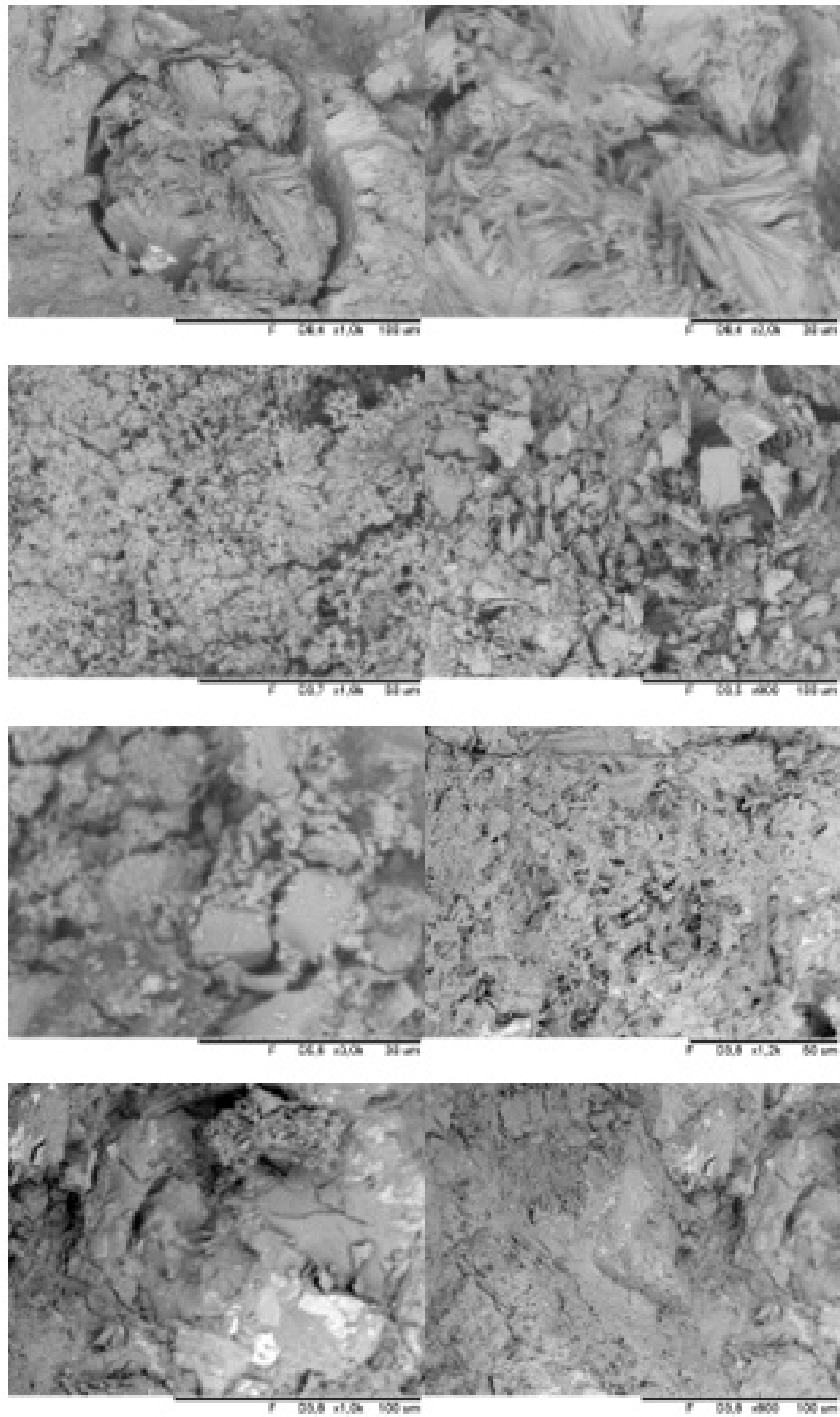


Figura 54. Imagens de MEV do CPIV.
Fonte: Pessoal.