

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE ENGENHARIA, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

BÁRBARA REBONATO CARRIJO  
LETICIA OLIVEIRA ALMANO

ESTUDO DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE SILICATO DE ETILA EM PASTA DE  
CIMENTO E ARGAMASSA PARA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

PONTA GROSSA  
2023

BÁRBARA REBONATO CARRIJO  
LETICIA OLIVEIRA ALMANO

ESTUDO DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE SILICATO DE ETILA EM PASTA DE  
CIMENTO E ARGAMASSA PARA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Trabalho apresentado à disciplina de  
OTCC como requisito parcial para a  
obtenção do título de Bacharelado em  
Engenharia Civil, da Universidade  
Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Eloise Aparecida  
Langaro

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Andressa Gobbi

PONTA GROSSA

2023

**BÁRBARA REBONATO CARRIJO**  
**LETICIA OLIVEIRA ALMANO**

**ESTUDO DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE SILICATO DE ETILA EM PASTA DE  
CIMENTO E ARGAMASSA PARA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-  
AGREGADO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Eloise Aparecida Langaro

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

---

Prof. Dr. Eduardo Pereira

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Patrícia Kruger

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 21 de novembro de 2023.

Dedicamos aos nossos pais, fonte inesgotável de apoio e incentivo, essenciais para chegarmos até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradecemos às professoras Eloise Aparecida Langaro e Andressa Gobbi por terem aceitado nos orientar durante todo esse período de Trabalho de Conclusão de Curso, pela proposta do tema que tanto gostamos, por todo apoio e suporte e principalmente por acreditar em nós na realização desse trabalho tão interessante. Somos imensamente gratas pela oportunidade de trabalhar junto a vocês, e podermos utilizar na prática uma parte dos ensinamentos transmitidos em sala de aula.

Também agradecemos aos professores Eduardo Pereira e Patrícia Kruger, por aceitarem fazer parte da nossa banca avaliadora, e pelos conhecimentos tão importantes ensinados a nós durante esse período da graduação, que foram essenciais para a realização do presente trabalho.

À todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil, também agradecemos pelos inúmeros ensinamentos transmitidos e pelos diversos auxílios que permitiram que essa pesquisa fosse realizada.

À nossa família, somos eternamente gratas por todo o apoio, incentivo e ajuda durante toda a nossa jornada até aqui, por acreditarem em nós até mesmo quando nem nós acreditávamos, por nunca nos deixarem desistir, Vocês são a fundação desse grande edifício que é a nossa carreira, que aos poucos ainda está sendo construído. Deixamos nossa gratidão especialmente aos nossos pais, Kelly, Giuliano, Luciana e Anderson.

Aos nossos amigos da graduação, agradecemos por todo o apoio durante esse percurso, e por terem feito esses anos serem mais leves e mais felizes. Levaremos vocês para a vida.

E aos nossos amigos da vida, somos gratas por toda a motivação e incentivo em todos os momentos. É uma alegria saber que podemos sempre contar com vocês.

Por fim, agradecemos uma à outra pela colaboração e pela parceria durante todos esses anos de graduação e no período de desenvolvimento desse trabalho, e também pela companhia principalmente nos dias em que ficávamos até tarde no laboratório peneirando o agregado ou moendo amostras. Somos gratas por termos finalizado essa etapa juntas.

*Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais.*

(Thomas Edison)

## RESUMO

A reação álcali-agregado é a reação química que ocorre entre uma forma reativa de sílica, presente em agregados, e componentes alcalinos que estão dissolvidos na solução dos poros de argamassas e concretos. A presença de agregados potencialmente reativos, umidade e álcalis, principalmente o sódio e o potássio, é necessária para a ocorrência da reação álcali-agregado. A utilização de agregados reativos pode ocasionar problemas relacionados a durabilidade da estrutura construída, porém, em alguns casos, não há como evitar a utilização dos mesmos. Sendo assim, é necessário buscar alternativas para que esses agregados possam ser utilizados na fabricação de concreto, sem que eles interfiram negativamente nas estruturas fabricadas. O presente trabalho tem como objetivo investigar os efeitos da adição de silicato de etila nas pastas de cimento e barras de argamassa para mitigação da reação álcali-agregado (RAA). O estudo envolve a análise das propriedades dos silicatos de etila, conhecido como ortosilicato de tetraetila (TEOS), incluindo sua composição, características químicas e físicas, bem como seus potenciais efeitos na RAA, já que esse produto tem mostrado certa propriedade hidrofóbica, capaz de bloquear poros. Foram realizadas análises MEV, DRX e o ensaio de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado para avaliar o desempenho da pasta de cimento e argamassa contendo diferentes concentrações de silicato de etila (1%, 5% e 10%), com o intuito de verificar sua influência na mitigação da reação álcali-agregado. A partir das análises MEV realizadas, foi possível constatar grande quantidade de etringita nas amostras com idade mais avançada com incorporação do produto, sugerindo uma possível redução na conversão da etringita em monossulfoaluminato de cálcio devido ao tratamento utilizado, o que reforça a ideia de que os produtos bloqueiam o acesso de água, impactando a formação desse produto de hidratação. Quanto ao teste de expansão em barras de argamassa, os resultados mostraram que, apesar das barras com incorporação de 1% dos produtos resultarem em expansões superiores, nas barras com maior concentração (a partir de 5%), as expansões diminuíram significativamente, e nas barras com 10% do produto incorporado, as expansões se mantiveram abaixo do limite estabelecido aos 30 dias, mostrando que, mesmo com um agregado potencialmente reativo, a incorporação dos produtos em concentrações adequadas é potencialmente capaz de impedir a expansão das barras de argamassa. Sendo assim, o silicato de etila (TEOS) se mostra uma estratégia promissora para a mitigação dos efeitos adversos da reação álcali-agregado.

**Palavras-chave:** Reação expansiva; Reação álcali-sílica; AMBT; Silicato de etila.

## ABSTRACT

A alkali-aggregate reaction is the chemical reaction that occurs between a reactive form of silica present in aggregates and alkali components dissolved in the pore solution of mortars and concrete. The presence of potentially reactive aggregates, moisture, and alkalis, primarily sodium and potassium, is necessary for the occurrence of the alkali-aggregate reaction. The use of reactive aggregates can lead to durability issues in the constructed structure; however, in some cases, it is unavoidable to use them. Therefore, it is necessary to seek alternatives so that these aggregates can be used in concrete production without negatively affecting the manufactured structures. This study aims to investigate the effects of adding ethyl silicate to cement pastes and mortar bars to mitigate the alkali-aggregate reaction. The research involves the analysis of the properties of ethyl silicates, known as tetraethyl orthosilicate (TEOS), including its composition, chemical and physical characteristics, as well as its potential effects on AAR since this product has shown certain hydrophobic properties capable of blocking pores. Scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and the accelerated mortar bar expansion test were performed to evaluate the performance of cement paste and mortar containing different concentrations of ethyl silicate (1%, 5%, and 10%), aiming to assess its influence on the mitigation of the alkali-aggregate reaction. From the Scanning electron microscopy analysis, a significant amount of ettringite was observed in samples with advanced age and product incorporation, suggesting a possible reduction in the conversion of ettringite to monosulfocalcium aluminate due to the treatment used, reinforcing the idea that the products block water access, impacting the formation of this hydration product. Regarding the mortar bar expansion test, the results showed that, despite bars with 1% product incorporation resulting in higher expansions, bars with higher concentrations (from 5%) experienced a significant decrease in expansions. In bars with 10% incorporated product, expansions remained below the established limit at 30 days, indicating that even with a potentially reactive aggregate, the incorporation of products in appropriate concentrations can potentially prevent mortar bar expansion. Thus, ethyl silicate (TEOS) proves to be a promising strategy for mitigating the adverse effects of the alkali-aggregate reaction.

**Keywords:** Expansive reaction; Alkali-silica reaction; AMBT; Ethyl silicate.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da reação álcali-agregado.....	16
Figura 2 - Fórmula do TS28 .....	30
Figura 3 - Fórmula do TS40 .....	30
Figura 4 - Fluxograma de moldagem e ensaios das pastas de cimento (Etapa 1)...	32
Figura 5 - Fluxograma de moldagem e ensaios das barras de argamassa (Etapa 2) .....	33
Figura 6 - Forma de silicone utilizada para a moldagem das pastas de cimento .....	34
Figura 7 - Amostras de pastas de cimento.....	34
Figura 8 - Amostrador padrão utilizado para ensaio DRX .....	36
Figura 9 - Amostras utilizadas para realização do ensaio MEV .....	37
Figura 10 - Barras de argamassa imediatamente após a moldagem.....	39
Figura 11 - Padrão de identificação das barras de argamassa .....	39
Figura 12 - Comparador e barra padrão utilizados.....	40
Figura 13 - Tanque utilizado para o ensaio .....	41
Figura 14 - Interior do tanque utilizado para o ensaio .....	41
Figura 15 - Micrografias de amostras de pastas de cimento com TS 28 aos 28 dias de idade .....	43
Figura 16 - Micrografias de amostras de pastas de cimento com TS 40 aos 28 dias de idade .....	44
Figura 17 - Micrografias de amostras de pastas de cimento com incorporação de 5% de TS40.....	45
Figura 18 - Formação semelhante à sílica na amostra de pasta de cimento com incorporação de 10% de TS28.....	46
Figura 19 - Formação de etringita na amostra de pasta de cimento com incorporação de 5% de TS28.....	47
Figura 20 - EDS da amostra com incorporação de 1% de TS28 com cura em água e idade de 28 dias.....	47
Figura 21 - Formação de etringita em diferentes amostras.....	48
Figura 22 - Formação de portlandita na amostra de pasta de cimento com incorporação de 10% de TS28.....	49
Figura 23 - EDS da amostra com incorporação de 1% de TS28 com cura em água e idade de 28 dias.....	50
Figura 24 - Formação de portlandita em diferentes amostras.....	51
Figura 25 - DRX em amostras de pastas de cimento com cura em água .....	52
Figura 26 - DRX em amostras de pastas de cimento com cura em água saturada com cal.....	53
Figura 27 - Formação com aparência similar a raízes na amostra com 1% de TS28 com cura em água com cal e idade de 28 dias .....	54
Figura 28 - Formação com aparência similar a raízes na amostra com 5% de TS40 com cura em água com cal e idade de 28 dias .....	55
Figura 29 - EDS da amostra com incorporação de 5% de TS28 com cura em água com cal e idade de 91 dias.....	55
Figura 30 - Formação com aparência similar a raízes na amostra com 1% de TS40 com cura em água e idade de 91 dias .....	56

Figura 31 - Formação com aparência similar a raízes na amostra com 5% de TS28 com cura em água com cal e idade de 182 dias .....	57
Figura 32 - Formação granular na amostra com 10% de TS40 com cura em água com cal e idade de 28 dias .....	58
Figura 33 - EDS da amostra com incorporação de 10% de TS40 com cura em água com cal e idade de 28 dias.....	58
Figura 34 - Gráfico das expansões médias das barras de argamassa .....	60
Figura 35 - Gráfico da variação das massas das barras de argamassa .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do grau de reatividade do agregado .....	26
Tabela 2 - Granulometria requerida de material para ensaio acelerado em barras de argamassa.....	37
Tabela 3 - Caracterização do agregado .....	38
Tabela 4 - Percentual teórico da etringita e da portlandita .....	48
Tabela 5 - Classificação das expansões médias das barras de argamassa .....	60
Tabela 6 - Expansão das barras de argamassa de referência .....	71
Tabela 7 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa de referência .....	71
Tabela 8 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS28.71	71
Tabela 9 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS28.....	71
Tabela 10 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS28 .....	72
Tabela 11 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS28.....	72
Tabela 12 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS28 .....	72
Tabela 13 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS28.....	72
Tabela 14 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS40 .....	72
Tabela 15 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS40.....	73
Tabela 16 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS40 .....	73
Tabela 17 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS40.....	73
Tabela 18 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS40 .....	73
Tabela 19 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS40.....	73
Tabela 20 - Massa das barras de argamassa de referência .....	74
Tabela 21 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS28 ....	74
Tabela 22 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS28 ....	74
Tabela 23 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS28 ..	74
Tabela 24 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS40 ....	75
Tabela 25 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS40 ....	75
Tabela 26 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS40 ..	75

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1. OBJETIVOS .....	13
1.1.1. Objetivos gerais .....	13
1.1.2. Objetivos específicos .....	13
1.2. JUSTIFICATIVA .....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO .....	15
2.1.1. Fatores que influenciam a reação álcali-agregado .....	19
2.1.2. Histórico da reação álcali-agregado .....	20
2.1.3. A Reação álcali-agregado no Brasil .....	21
2.2. MÉTODOS PARA IDENTIFICAR A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO .....	23
2.2.1. Análise petrográfica e ensaios complementares .....	24
2.2.2. Ensaio pelo método acelerado das barras de argamassa (AMBT) .....	25
2.2.3. Ensaio pelo método acelerado a 60 °C dos prismas de concreto .....	26
2.2.4. Ensaio pelo método de longa duração dos prismas de concreto .....	27
2.3. MÉTODOS PARA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO .....	28
2.3.1. Silicatos de etila .....	29
3. METODOLOGIA .....	32
3.1. PASTAS DE CIMENTO .....	33
3.1.1. Paralisação da hidratação .....	35
3.1.2. Ensaio de Difração de raios X (DRX) .....	36
3.1.3. Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	36
3.2. ARGAMASSAS .....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	43
4.1. Microscopia de varredura - MEV em pastas de cimento .....	43
4.2. Teste acelerado das barras de argamassa .....	59
REFERÊNCIAS .....	64
APÊNDICE .....	71

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil e é um dos materiais mais versáteis que se possui nesta área, ainda mais trata-se de um material que pode assumir diversas geometrias. A qualidade do concreto não está baseada somente em sua dosagem, mas também nas características de seus agregados, por este motivo, é indicado que seja comparada a qualidade dos agregados utilizados com as especificações fornecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2022). A escolha de agregados que se encaixem nas especificações da NBR 7211 para compor o concreto é de suma importância, já que a utilização de agregados fora dos padrões exigidos pela norma pode desencadear problemas no concreto no estado endurecido.

Existem situações em que se faz necessário utilizar os materiais disponíveis na região em que se encontra a obra que o concreto será lançado, mesmo que fora dos padrões, seja por inviabilidade do transporte de outros materiais, pelos fatores preço e distância ou, porque só se tem um fornecedor capaz de atender a demanda de materiais da obra. O uso desses agregados fora dos padrões é permitido pela NBR 7211 (ABNT, 2022) após serem ensaiados pelos métodos estabelecidos na NBR 15577 (ABNT, 2018), porém isso não garante que não haverá ocorrência de reação álcali-agregado (RAA).

A RAA é uma manifestação patológica que ainda não possui solução definitiva. Tem-se algumas maneiras para diminuir a sua intensidade e tentativas de mitigar a sua taxa de expansão, porém mesmo com essas medidas ela ainda pode continuar a ocorrer. Os danos causados pela RAA na maioria das vezes podem ser percebidos por meio de fissuras ocorrentes nas estruturas, o que a longo prazo pode vir a impactar na eficiência estrutural dos elementos afetados.

Devido aos géis expansivos gerados em consequência da RAA, ocorre um aumento das tensões internas no concreto, podendo ocorrer movimentações diferenciais e fissuras, sendo elas seguidas pela perda de resistência do concreto, fator que interfere também na sua durabilidade. Focando um pouco mais nas características mecânicas de um concreto que possui RAA, pode-se notar variações de até 60% na resistência à tração e 80% na resistência à compressão (OLINQUEVICZ *et al.*, 2019).

Em casos como, por exemplo, a construção de barragens de concreto, não há como evitar a utilização dos agregados reativos se eles forem os únicos disponíveis,

e, portanto, a ocorrência da RAA. Em todo o mundo existem diversas estruturas afetadas pela reação álcali-agregado. No caso das obras hidráulicas, até o ano de 2022 foram documentadas 35 obras afetadas pela reação no Brasil, sendo elas localizadas nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Alagoas, Bahia, Pernambuco, Espírito Santo e Rio de Janeiro (MACIOSKI *et al.*, 2023).

Sendo assim, é necessário buscar uma alternativa para que esses agregados possam ser utilizados na fabricação de concreto, sem que interfiram negativamente com as estruturas fabricadas com os mesmos. Este trabalho apresenta uma possível alternativa para que este problema seja solucionado.

Os produtos estudados neste trabalho são dois diferentes silicatos de etila denominados de TS28 e TS40, ambos comumente utilizados em tintas anticorrosivas, confecção de moldes cerâmicos refratários e até em aplicações de alta tecnologia, como aerogel, solgel e semicondutores. Além disso, já existem estudos que utilizam o TS28 e o TS40 como produtos de tratamento superficial para concretos, possuindo como objetivo a diminuição de sua porosidade.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento e uso de dois diferentes tipos de silicato de etila frente a reação álcali-agregado em argamassas.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- i. Estudar as propriedades do silicato de etila como aditivo para a pasta de cimento e argamassa, incluindo sua composição, características químicas e físicas, e potenciais efeitos na reação álcali-agregado;
- ii. Analisar a formação de compostos hidratados na pasta de cimento contendo diferentes proporções de silicato de etila;
- iii. Avaliar o desempenho da argamassa contendo diferentes concentrações de silicato de etila, analisando sua influência na mitigação da reação álcali-agregado;
- iv. Identificar os efeitos do silicato de etila na mitigação da reação álcali-agregado e suas possíveis limitações.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Em situações em que é necessário um grande volume de agregado torna-se inviável a utilização de agregados provenientes de regiões mais distantes. Nesse caso, por mais que o agregado não seja inerte e tenha indícios de contribuição no desenvolvimento da reação álcali-agregado em concretos, ele acaba sendo utilizado. Além disso, ainda não há uma solução eficaz para a recuperação de estruturas já afetadas pela RAA, sendo necessário adotar atitudes preventivas antes mesmo do início das construções.

Na tentativa de encontrar alternativas que trouxessem soluções eficazes para a mitigação da RAA, foram estudadas as patentes dos produtos TS28 e TS40 (BROWN, 2008; BROWN, 2009), onde há menção de uma possível mitigação da RAA em concretos utilizando os produtos. De acordo com Langaro (2023) ambos os produtos, quando utilizados como tratamentos superficiais, alteraram a cinética da reação álcali-sílica, com isso também ocorreu uma menor proporção de formação de gel nos corpos de prova e a formação de uma barreira hidrofóbica.

Além de serem usados como tratamentos superficiais, os silicatos de etila (TS28 e TS40) também podem ser utilizados como aditivos químicos. Nesse caso, de acordo com suas patentes (BROWN, 2008; BROWN, 2009) eles poderiam atuar como um mitigador de RAA. Por ser um líquido de baixa viscosidade, esse produto se mostra capaz de preencher as microfissuras e poros na pasta de cimento e na interface pasta-agregado, criando uma barreira física que impede a entrada de água, essencial para a ocorrência da RAA. Ao bloquear o acesso de água e íons hidroxila, o silicato de etila tende a diminuir a quantidade de álcalis disponíveis para reagir com os agregados potencialmente reativos, diminuindo assim a intensidade da RAA.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura acerca da reação álcali-agregado, destacando os principais aspectos relacionados do tema em estudo e das abordagens para mitigar os efeitos da RAA, com foco especial no uso do silicato de etila como possível agente mitigador.

### 2.1. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

O concreto pode sofrer deterioração de maneiras diferentes, sendo uma delas por meio de reações químicas, que geralmente envolvem as interações químicas entre os agentes agressivos do ambiente e os constituintes da pasta de cimento. Porém existem reações como a álcali-agregado, que é um processo químico lento que ocorre entre os álcalis presentes na pasta de cimento e determinados componentes reativos de certos tipos de agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Uma das classificações dessas reações químicas são as que envolvem formação de produtos expansivos, na qual se encaixa a RAA. A expansão, sendo ela com ou sem formação de gel, pode ocorrer inicialmente sem nenhum dano ao concreto, porém ao passar do tempo traz consigo o aumento de tensões internas causando fechamento de juntas de expansão, deformações, deslocamentos em diversas partes da estrutura, fissuração e lascamento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

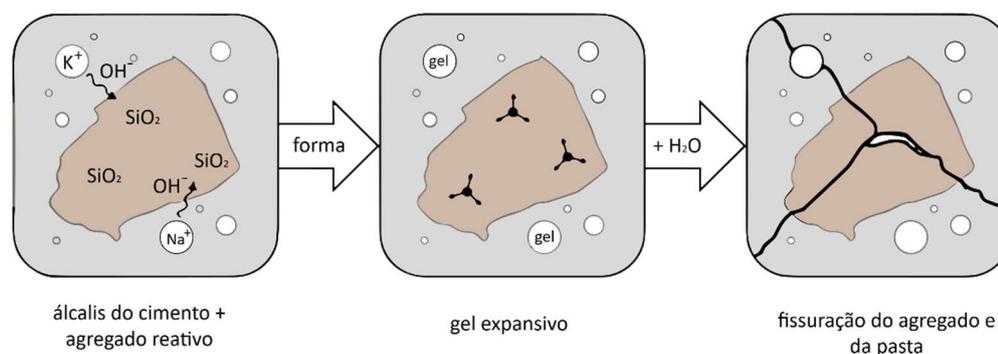
A RAA é uma manifestação patológica que pode gerar elevado grau de deterioração do concreto e conseqüentemente também possui uma maior dificuldade de recuperação, principalmente por questões de segurança e durabilidade (NOGUEIRA, 2010).

Desde 1940, ano da publicação de um dos primeiros estudos sobre reações álcali-agregado, têm-se diversos exemplos da deterioração do concreto em outras partes do mundo, que foram relatados para mostrar que a RAA pode ser uma das causas de deterioração em estruturas localizadas em ambientes úmidos, como barragens, pilares de pontes e quebra-mares (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A RAA é resultado do conjunto de três fatores: agregados reativos, hidróxidos alcalinos como íons de sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) dissolvidos na solução dos poros do concreto em alta concentração e umidade. Dessa maneira, forma-se um produto secundário, o gel, tendo ele propriedades de expansão,

característica que traz ao concreto a geração de tensões internas e a fissuração (FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000), como demonstra a figura 1.

Figura 1 - Esquema da reação álcali-agregado



Fonte: Adaptado de Deschenes (2009)

É importante ressaltar que existem dois diferentes tipos de RAA, a reação álcali-silica (RAS), sendo essa a ser tratada no presente trabalho, e a reação álcali-carbonato (RAC). Segundo Hasparyk (2005), a reação álcali-silica (RAS) é o tipo de RAA mais conhecido e relatado no meio técnico, e é responsável pela maioria dos casos de RAA em todo o mundo. Ela ocorre mais rapidamente devido às formas minerais de sílica reativa envolvidas. As formas minerais mais comuns incluem opala ou sílica amorfa, calcedônia, cristobalita, tridimita, vidros naturais e artificiais, quartzo microcristalino/criptocristalino e quartzo deformado (DIAMOND, 1975).

Segundo Glasser (1992) e Taylor (1997), os álcalis, sódio e potássio, normalmente provêm das argilas ou compostos silicosos presentes na matéria-prima do cimento. Eles podem estar presentes no cimento na forma de sulfatos ou incorporados nas fases silicatos e aluminatos do clínquer. Além disso, também podem ser fornecidos por fontes externas, como soluções de sulfato de sódio ( $Na_2SO_4$ ), cloreto de sódio ( $NaCl$ ), adições minerais ou agregados (MIZUMOTO, 2009).

Os álcalis do cimento podem estar em duas formas: solúveis e insolúveis. Os solúveis estão presentes nos sulfatos, enquanto os insolúveis estão nas fases sólidas do clínquer (DIAMOND, 1975). Glasser (1992) afirma que durante a hidratação do cimento, os álcalis solúveis são liberados mais rapidamente na solução dos poros do concreto. Já os álcalis incorporados nos grãos do clínquer ficam disponíveis mais lentamente à medida que a hidratação ocorre. Independentemente da fonte dos

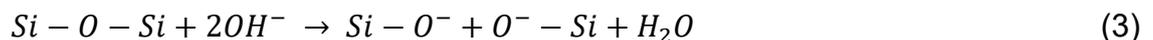
álcalis, todos eles podem participar da reação, uma vez que a RAS ocorre de forma lenta.

Na solução dos poros do concreto, são os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) que reagem com as formas de sílica reativa presentes nos agregados. Durante as reações de hidratação no concreto, os álcalis liberam íons hidroxila ao formarem produtos de baixa solubilidade, como etringita, silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e fases aluminato. Os álcalis (sódio e potássio) participam dessas reações para equilibrar as cargas negativas, sendo incorporados ao gel formado. Uma vez que os hidróxidos de sódio e potássio são solúveis, os íons hidroxila entram na solução dos poros (HASPARYK, 2005).

De acordo com Glasser e Kataoka (1981), a primeira etapa da reação é uma reação ácido-base na qual o grupo silanol ( $\text{Si-OH}$ ) na superfície da sílica é atacado pelos íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), liberando água. Os cátions presentes na solução se associam ao grupo silanol, que possui carga negativa devido ao  $\text{SiO}^-$ , formando um gel sílico-alcálico, conforme exemplificado nas Equações 1 e 2.

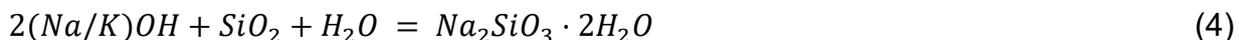


Em um segundo estágio, os íons hidroxila atacam o grupo siloxano ( $\text{Si-O-Si}$ ), rompendo suas ligações e substituindo-as por pares de  $\text{SiO}^-$ , como mostra a Equação 3. Esse processo ocorre continuamente, fragmentando a estrutura tridimensional da sílica em ânions de silicato de tamanhos variados.



As cargas negativas são equilibradas pelos cátions presentes, sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ), formando o gel da RAS (TAYLOR, 1997). O gel sílico-alcálico também pode incorporar íons de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), resultando em uma composição química variável e indefinida. A mobilidade e fluidez do gel também dependem de sua composição química, que está diretamente relacionada à sua capacidade de

expansão (HOBBS, 1988). Resumidamente, a RAS pode ser descrita pela Equação 4 (ALEXANDER, 2019).



O gel sílico-alcálico formado é hidrófilo e, ao absorver umidade, aumento de volume, gerando pressões suficientes para danificar o concreto. O volume específico e a densidade do gel variam dependendo da quantidade de água e álcalis presentes, geralmente sendo maior que o volume da sílica e causando pressões expansivas. O gel pode se concentrar ao redor dos agregados ou exsudar na superfície do concreto durante o processo de inchamento.

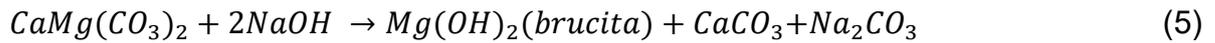
As fissuras resultantes da expansão do gel podem permitir o surgimento de outros mecanismos de deterioração, como a lixiviação, que ocorre quando a água percola através das fissuras e precipita os carbonatos de cálcio na superfície do concreto (POOLE, 1992).

A reação álcali-carbonato (RAC) é um tipo de reação química que ocorre entre as hidroxilas dos álcalis do cimento e dolomitas e impurezas argilosas presentes em agregados de origem carbonática (PAULON, 1981). Pode resultar em fissuração e desagregação do concreto, devido à desdolomitização da rocha, que enfraquece a ligação pasta-agregado, podendo levar à perda de resistência e durabilidade (BICZOK, 1972; TAYLOR, 1997)

De acordo com Poole (1992), a desdolomitização corresponde à quebra da estrutura do carbonato de cálcio-magnésio, que gera a expansão das rochas carbonáticas e de calcários dolomíticos argilosos. Na RAC não há formação de gel expansivo, mas sim de compostos cristalizados como a brucita, os carbonatos alcalinos, os carbonatos cálcicos e o silicato magnesiano (KATAYAMA, 2004).

Após a desdolomitização, o carbonato de sódio reage com os produtos da hidratação do cimento, dentro da pasta. Silva (2007) aponta que, como há regeneração dos hidróxidos alcalinos, a desdolomitização ocorrerá até que a dolomita tenha reagido completamente, ou que a concentração de álcalis tenha reduzido significativamente, como é demonstrado nas Equações 5 e 6 (POOLE, 1992).

- Reação de desdolomitização



- Reação de regeneração do hidróxido de sódio



### 2.1.1. Fatores que influenciam a reação álcali-agregado

Existem diversos fatores que influenciam a RAA, como a reatividade dos agregados, a umidade e o teor de álcalis presente.

A NBR 15577-1 (ABNT, 2018a) define como sendo agregados reativos aqueles que reagem com a solução alcalina contida nos poros do concreto resultando em manifestações patológicas devidas à RAA. Dentro desse conceito tem-se os agregados reativos específicos para cada tipo de RAA. Focando na RAS, objeto de estudo deste trabalho, os agregados reativos são aqueles que possuem em sua composição uma forma reativa de sílica (SIMS; POOLE, 2017).

Algumas características além da composição e a mineralogia, são o tamanho e a forma desses agregados que também afetam na reação (COUTO, 2008). De acordo com Mehta e Monteiro (2014), fatores como o tempo, a temperatura e a dimensão da partícula, todos os silicatos ou minerais de sílica, podem reagir com as soluções alcalinas, embora um grande número de minerais reaja apenas em grau insignificante, sendo estes classificados como minerais inócuos.

A presença de umidade é o fator essencial para a ocorrência da RAA, pois sem ela essa reação não ocorre, já que a água é um excelente solvente capaz de dissolver diversos elementos químicos, além da sua facilidade em se mover através dos poros do concreto (OLINQUEVICZ *et al.*, 2016).

A solubilidade da sílica e a migração dos íons alcalinos presentes na solução dos poros do concreto aumentam de acordo com a umidade a qual o concreto é submetido, o que acaba favorecendo a ocorrência da reação (FLORINDO, 2009).

De acordo com Mehta e Monteiro (2018), se o acesso da água ao concreto for evitado por meio de reparos às juntas com vazamento, existe a possibilidade de que a expansão deletéria possa nunca ocorrer, dependendo do nível de reatividade do agregado. Dessa maneira, pode-se concluir que a umidade é um fator de extrema importância para a RAA, já que quanto mais água o concreto possuir, maior a tendência de ocorrer a reação.

Os efeitos nocivos da RAA são geralmente observados em concretos expostos a condições ambientais de contato com o solo, imersão total ou parcial em água e elevada condensação. Além disso, podem ocorrer em concretos maciços ou impermeabilizados, nos quais a expansão pode ser resultado da presença de umidade residual interna proveniente da água utilizada na mistura, especialmente em concretos com alta relação água/cimento (CIGB/ICOLD, 1991).

O teor de álcalis presente no concreto é outro fator de importância na ocorrência da RAA. A principal fonte de álcalis do concreto é o cimento, porém pode não ser a única (SIMS; POOLE, 2017). A quantidade de álcalis presentes em um cimento depende de suas matérias-primas e do seu processo de produção, esses fatores determinam a composição mineralógica do cimento produzido (SIMS; POOLE, 2017). Esse teor de álcalis do cimento é medido em relação ao teor de óxido de sódio e é expresso como teor equivalente do mesmo (SILVA, 2007).

De acordo com a ASTM C 150, cimentos com menos de 0,6% de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente são cimentos de baixa alcalinidade e aqueles com mais de 0,6% de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente são cimentos de alta alcalinidade. Normalmente quando se tem um cimento de baixa alcalinidade, esse teor de álcalis é insuficiente para causar danos devido à RAA, porém, quando se trata de concretos com dosagens com alto consumo de cimento, mesmo os valores menores que 0,6% de álcalis podem gerar danos (METHA; MONTEIRO, 2008).

### 2.1.2. Histórico da reação álcali-agregado

Na década de 1930, foi observado o aparecimento de fissurações significativas em estruturas de concreto no sul da Califórnia, nos Estados Unidos, que não estavam relacionadas a problemas conhecidos de durabilidade, como gelo/degelo e corrosão de armaduras (KELSO, 2008). Isso despertou a atenção dos engenheiros e consultores da época, levando ao início dos estudos sobre a reação álcali-agregado (RAA).

Em meados da década de 1940, Stanton identificou a RAA como uma reação deletéria que ocorria entre os constituintes do concreto, a sílica do agregado e os álcalis presentes no cimento. Ele observou que essa reação era capaz de formar eflorescências brancas e causar fissurações semelhantes às observadas nas estruturas afetadas na Califórnia (STANTON, 1940).

Essa descoberta despertou o interesse de outros pesquisadores, e diversas pesquisas foram conduzidas sobre o tema. O *U.S. Bureau of Reclamation* realizou investigações em barragens de concreto que apresentavam fissuras, como a barragem de Parker, no Rio Colorado, e a de Stewart Mountain, no Rio Salt, Arizona, constatando a presença de RAA. Na Austrália, o CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*) coordenou um programa de pesquisas focado no entendimento do mecanismo da RAA (MIZUMOTO, 2009).

Essas investigações confirmaram os estudos de Stanton, conferindo maior importância ao teor de álcalis do cimento, à composição dos agregados e aos requisitos ambientais para o desenvolvimento da RAA (TUTHILL, 1982). De acordo com Kelso (2008), entre as décadas de 1950 e 1960, os estudos sobre a RAA perderam força, mas retornaram de forma mais rigorosa na década de 1970, à medida que foram surgindo relatos de anomalias em diversos países.

Com base nessas ocorrências e com o objetivo de compreender suas causas, foram iniciadas várias pesquisas e ensaios sobre o tema. Em todo o mundo, foram diagnosticadas várias estruturas afetadas pela RAA desde sua descoberta, incluindo a barragem Val de La Mare no Reino Unido, a barragem de Sandouping na China, a barragem La Tuque no Canadá, a barragem Kouga na África do Sul, a barragem Chambon na França, trechos de vias urbanas em Johannesburg na África do Sul e trechos da via expressa Hanshin no Japão (SILVA, 2007).

Os principais relatos de ocorrência de RAA envolvem danos em edifícios, pontes, viadutos, obras portuárias, centrais termoelétricas, obras hidráulicas, barragens, centrais hidroelétricas e túneis.

Atualmente, devido ao grande número de estruturas afetadas em diferentes países, várias pesquisas estão sendo realizadas para um melhor entendimento dos mecanismos da reação, das características reativas dos agregados, do comportamento estrutural de obras afetadas e dos efeitos da utilização de produtos inibidores.

### 2.1.3. A Reação álcali-agregado no Brasil

Assim como em outros países, a RAA é um problema sério no Brasil e tem afetado diversas estruturas de concreto, como pontes, viadutos, barragens, edifícios e túneis. A reação pode ocorrer tanto em estruturas novas como em estruturas

antigas, com alguns casos de RAA sendo identificados em estruturas com mais de 50 anos de idade.

Kihara (1993) menciona que os primeiros estudos sobre RAA no Brasil datam da década de 60, durante a construção da Barragem de Jupia. Com o avanço da tecnologia do concreto nessa época, durante a construção das grandes usinas hidrelétricas, surgiram problemas relacionados à RAA, o que demandou estudos laboratoriais sobre o assunto (MIZUMOTO, 2009). De acordo com Paulon (1981), o primeiro estudo brasileiro publicado na literatura técnica sobre RAA foi realizado por Gitahy em 1963. Ele investigou os agregados disponíveis para a construção da barragem no Rio Paraná, no estado de São Paulo.

Após ensaios de laboratório, foi constatada a presença de materiais reativos. Diante da impossibilidade de utilizar outros tipos de agregados, foram necessárias medidas preventivas, como a limitação do uso de álcalis no cimento e a utilização de 35% de pozolana artificial para substituir parte do cimento (PAULON, 1981). A CESP (Companhia Energética de São Paulo) destacou-se na época por estudar o comportamento da RAA e ser a primeira empresa a realizar estudos com adição de materiais pozolânicos e utilizá-los no concreto. Muitas construções que não consideraram os estudos preliminares sobre a potencialidade reativa dos materiais constituintes apresentaram, ao longo dos anos, os efeitos da reação.

Em 2004, devido ao interesse observado na inspeção de sapatas e blocos de fundação após o colapso do Edifício Areia Branca (OLIVEIRA, 2007), constatou-se um dos primeiros casos de reação em obras prediais nas regiões metropolitanas de Olinda e Recife/PE. Esse incidente despertou a preocupação da comunidade técnica em relação à importância dos conceitos de vida útil e durabilidade das construções. Na cidade do Recife, foi realizado um extenso trabalho de investigação na Ponte Paulo Guerra, onde foram detectadas, entre outras anomalias, a deterioração agressiva em blocos de fundação devido à reação álcali-agregado (ANDRADE *et al.*, 2006).

Em 2005, constatou-se a ocorrência da anomalia em blocos de fundação em edifícios urbanos na cidade de Recife/PE, em escala inédita no meio técnico mundial. Os principais fatores observados foram: baixa profundidade do lençol freático, presença de fases reativas nos agregados (quartzo com extinção ondulante e quartzo microgranular) e disponibilidade de álcalis. Cerca de 20 casos de elementos de fundação com reação álcali-agregado foram descobertos na região metropolitana de

Recife, com idades entre três e 30 anos (ANDRADE *et al.*, 2006). O potencial de reatividade dos agregados miúdos e graúdos da Região Metropolitana do Recife foi avaliado por Andrade *et al.* (2006) e concluiu-se que a maioria dos agregados analisados apresentava fases potencialmente reativas, que contribuíram efetivamente para a ocorrência da reação, principalmente nos blocos de fundação.

Assim, iniciou-se um movimento com profissionais e especialistas de diversas áreas para a criação de uma comissão de estudos e discussões visando à elaboração da norma brasileira relacionada ao tema. Em 2005, durante a 470<sup>a</sup> reunião anual do IBRACON, o assunto foi enfatizado com a presença do engenheiro canadense Benoit Fournier, possibilitando uma abordagem internacional sobre a RAA. Um segundo encontro do engenheiro canadense com os centros de pesquisa da ABCP, CESP e FURNAS permitiu a participação de laboratórios brasileiros na criação de um programa interlaboratorial para avaliar ensaios acelerados com agregados nacionais e internacionais. Ao longo do processo de reuniões e eventos técnico-científicos da comissão de estudos formada em 2005 pelo CB18/ABNT, foi possível criar, em 2008, a primeira norma brasileira sobre aspectos da reação álcali-agregado, chamada de NBR 15577 (MIZUMOTO, 2009). Essa norma foi atualizada recentemente, em 2018. A nova edição cancela e substitui a versão anterior (ABNT NBR 15577-1:2008), a qual passou por uma revisão técnica, incluindo uma nova parte: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado NBR 15577-7 (ABNT, 2018g).

## 2.2. MÉTODOS PARA IDENTIFICAR A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A detecção da reação álcali-agregado (RAA) é fundamental para a prevenção de danos estruturais em obras de engenharia civil. Geralmente, a presença de rachaduras e manchas pode ser indicativa da RAA, devido à expansão do gel formado internamente à estrutura.

No entanto, a observação visual não é suficiente para uma detecção precisa e pode levar a falsos positivos e negativos. Algumas metodologias já foram desenvolvidas para identificar a manifestação dessa reação, como a análise petrográfica, descrita pela NBR 15577-3 (ABNT, 2018c), o teste de expansão em barras de argamassa (método acelerado), descrito pela NBR 15577-4 (ABNT, 2018d) e o teste de expansão em prismas de concreto, descrito pela NBR 15577-6 (ABNT,

2018f), e o teste de expansão em prismas de concreto (método acelerado), descrito pela NBR 15577-7 (ABNT, 2018g).

### 2.2.1. Análise petrográfica e ensaios complementares

A análise petrográfica estuda em escala macroscópica e microscópica a amostra de rochas dos agregados que estão sendo investigados em relação ao seu potencial reativo (ARRAIS, 2011). Pode ser feita no agregado conforme as prescrições da NBR 15577-3 (ABNT, 2018c) quando se trata de rocha ou agregado graúdo. Tratando de agregado miúdo, a caracterização mineralógica deve ser realizada conforme a NBR 15577-1 (ABNT, 2018a).

A parte 3 da NBR 15577 (2018c) estabelece um método para execução de análise petrográfica de amostras representativas de rochas para uso como agregados em concreto, com ênfase nos fatores condicionantes para a ocorrência da reação álcali-agregado (RAA) e mais especificamente da reação álcali-sílica (RAS). Assim sendo, estabelece também os procedimentos de análise petrográfica por microscopia ótica. Sims e Poole (2003) citam o uso da petrografia como uma técnica de observação direta da reação, passando por estágios de inspeção visual à caracterização em lâminas finas. A análise petrográfica é caracterizada como um ensaio laboratorial qualitativo, exigindo um tempo de preparo da amostra e experiência do operador na identificação da reação no concreto (MIZUMOTO, 2009).

A análise deve ser realizada por pessoas qualificadas, com formação e experiência para aplicar as técnicas de reconhecimento das propriedades características de rochas e minerais, bem como para descrever e classificar os constituintes de uma amostra de agregado. Sobre a classificação do agregado quanto à RAA, com base na análise petrográfica da rocha, deve-se classificar o agregado em potencialmente inócuo ou potencialmente reativo. De acordo com a NBR 15577-3 (ABNT, 2018c), os valores máximos aceitáveis de uma ou mais fases reativas geralmente adotados para classificar um agregado como potencialmente inócuo são: 5% de quartzo microgranular ou deformado, 3% de calcedônia, 1% de tridimita ou cristobalita, 3% de vidro vulcânico e 0,55 de opala. Acima desses valores os agregados são considerados potencialmente reativos.

Entretanto, algumas técnicas complementares podem ser necessárias, como microscopia eletrônica de varredura (MEV) com detector de dispersão de energia de

raios-X (EDS), análise por difração de raios-X (DRX), análise termogravimétrica (TGA) e a análise de raio X por energia dispersiva (EDS), entre outras.

A análise de imagens com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) permite a observação macroscópica do concreto, demonstrando suas três fases de grande importância: agregado, matriz da pasta de cimento e sua interface bem definida, denominada de zona de transição (ZT). O emprego do MEV permite evidenciar a morfologia dos compostos hidratados em função das condições de hidratação (DUART, 2008).

Além do MEV, são realizadas análises complementares de difração de raios-X (DRX) e análises térmicas (TGA) para avaliar o grau de cristalinidade, identificar fases e estudar as transições que ocorrem durante o aquecimento dos materiais (PEREIRA *et al.*, 2017). A difração de raios-X (DRX) é uma análise que permite a identificação da fase cristalina que compõe materiais a base de cimento e a obtenção de maiores informações sobre suas características cristalográficas (DUART, 2008). Já a análise termogravimétrica (TGA) é utilizada para quantificar a presença de fases hidratadas por meio da perda de massa causada pela desidratação, descarbonetação ou decomposição dos hidratados devido ao aumento da temperatura (BALDIN; FILHO; BALDIN, 2019).

Mesmo após a identificação das fases reativas por meio da análise petrográfica, é importante confirmar a relevância da sua presença no desenvolvimento das reações através de testes de expansão em barras de argamassa e em prismas de concreto, que avaliam a formação do gel expansivo. Embora haja diferentes métodos de avaliação disponíveis, a norma NBR 15577-1 (ABNT, 2018a) considera os ensaios acelerados como uma abordagem preliminar para obter indicações mais rápidas da reação (MACIOSKI *et al.*, 2023).

#### 2.2.2. Ensaio pelo método acelerado das barras de argamassa (AMBT)

É recomendado o método acelerado de barra de argamassa (AMBT - *accelerated mortar bar test*), que é um método padronizado pela ASTM C-1260/07 e pela NBR 15577-4 (ABNT, 2018d), para avaliar a reatividade potencial de agregados frente à álcalis por meio do ensaio de imersão acelerada em solução alcalina. O ensaio consiste em produzir barras de argamassa utilizando o agregado em estudo e imergi-

las em uma solução alcalina saturada, composta de hidróxido de sódio (NaOH) à concentração de 1 N, a temperatura de 80 °C.

O resultado do ensaio é dado pela medida da variação dimensional da barra de argamassa, que é a diferença entre o comprimento da barra imediatamente após a moldagem e o comprimento após a imersão em solução alcalina e subsequente armazenamento em água. São realizadas leituras para constatar essa variação nas idades de 16 e 30 dias, a partir da data de moldagem e pelo menos três leituras intermediárias em cada período, aproximadamente na mesma hora. A expansão média é calculada e comparada com os critérios estabelecidos pela norma.

A norma NBR 15577-1 (ABNT, 2018a) estabelece limites para a expansão das barras de argamassa, ela apresenta as possíveis classificações dos agregados de acordo com os valores de expansão registrados ao longo do ensaio pelo método acelerado das barras de argamassa. A tabela 1 resume todos os parâmetros apresentados pela norma.

Tabela 1 - Classificação do grau de reatividade do agregado

<b>Classificação da reatividade potencial do agregado</b>	<b>Expansão das barras de argamassa aos 30 dias (%)</b>	<b>Expansão dos prismas de concreto aos 365 dias (%)</b>
Potencialmente inócuo grau R0	Menor que 0,19%	Menor que 0,04%
Potencialmente reativo grau R1	Entre 0,19% e 0,40%	Entre 0,04% e 0,12%
Potencialmente reativo grau R2	Entre 0,41% e 0,60%	Entre 0,13% e 0,24%
Potencialmente reativo grau R3	Maior que 0,60%	Maior que 0,24%

Fonte: NBR 15577-1 (ABNT, 2018a).

No entanto, a norma indica que a confirmação deste resultado seja obtida pelo ensaio de longa duração dos prismas de concreto de acordo com a NBR 15577-6 (ABNT, 2018f), prevalecendo o seu resultado em caso de divergência, já que o ensaio acelerado em barras de argamassa é um ensaio preliminar, podendo apresentar falsos positivos ou negativos.

### 2.2.3. Ensaio pelo método acelerado a 60 °C dos prismas de concreto

O ensaio em prismas de concreto pelo método acelerado é uma técnica utilizada para avaliar a reatividade álcali-agregado em concretos de forma mais rápida

do que o método convencional de longa duração, citado pela NBR 15577-6 (ABNT 2018f). Esse ensaio busca simular as condições agressivas que podem levar à reação álcali-agregado, acelerando o processo de expansão do concreto em um ambiente controlado.

O procedimento segue as diretrizes estabelecidas pela NBR 15577-7 (ABNT 2018g). Essa norma define os requisitos para a preparação dos prismas de concreto e a imersão desses prismas em soluções alcalinas durante um período determinado. Os prismas de concreto são moldados com dimensões e proporções padronizadas, utilizando-se os materiais e proporções especificados pela norma. Após a moldagem, os prismas são submetidos a um processo de cura para garantir o desenvolvimento adequado das propriedades do concreto.

Em seguida, os prismas são imersos em soluções alcalinas, que simulam a exposição do concreto a altos teores de álcalis presentes no ambiente (140 dias a 60 °C). Durante a imersão, os prismas de concreto são monitorados quanto à expansão dimensional. A expansão é medida ao longo do tempo, permitindo observar a taxa de expansão e o potencial de danos causados pela reação álcali-agregado. Se o resultado obtido neste ensaio indicar expansão menor que 0,03% na idade de 20 semanas, o agregado é considerado potencialmente inócuo para uso em concreto. Porém, se o resultado indicar uma expansão maior ou igual a 0,03% no mesmo período, o agregado é considerado potencialmente reativo (ABNT, 2018g).

Essas normas não descartam a realização do ensaio em prismas de concreto até a idade de 365 dias conforme NBR 15577-6 (ABNT, 2018f), permitindo uma avaliação mais completa e abrangente do potencial de expansão.

#### 2.2.4. Ensaio pelo método de longa duração dos prismas de concreto

O ensaio em prismas de concreto realizado conforme diretrizes da NBR 15577-6 (ABNT, 2018f) conhecido como “de longa duração”, prevê a medição das expansões obtidas em corpos-de-prova mantidos em cura à 38 °C por 12 meses. O procedimento segue as diretrizes estabelecidas pela NBR 15577-6 (ABNT, 2018f), que define os requisitos para a preparação dos prismas de concreto e o processo de cura antes de serem submetidos ao ensaio de longa duração. Os prismas de concreto são moldados de acordo com dimensões e proporções padronizadas (75 mm x 75 mm x 285 mm), seguindo as especificações da norma. Após a moldagem, os prismas são submetidos

a cura úmida por 24 horas para permitir o desenvolvimento das propriedades do concreto.

Após o período de cura, os prismas de concreto são armazenados em condições ambientais controladas, em um recipiente com alta umidade a 38 °C durante um ano inteiro. Durante esse período, são realizadas medições periódicas da expansão dimensional dos prismas para acompanhar a evolução da reação álcali-agregado ao longo do tempo. A expansão é registrada em intervalos regulares para determinar a taxa de expansão e avaliar o comportamento do concreto em relação à reatividade álcali-agregado.

Ao final do período de um ano, os resultados obtidos no ensaio em prismas de concreto são analisados para determinar a extensão da reação álcali-agregado. Essa análise inclui a classificação dos prismas de acordo com critérios estabelecidos pela norma, demonstrados no Quadro 1 citado no item 2.2.2, permitindo uma avaliação da durabilidade do concreto em relação à reatividade álcali-agregado.

### 2.3. MÉTODOS PARA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Um dos principais métodos para evitar que a reação álcali-agregado ocorra, é a partir da escolha de agregados adequados, com baixa reatividade, além da utilização de cimentos com baixo teor de álcalis (LUCCA, 2010). Porém, nem sempre é possível a utilização de outro tipo de agregado, havendo apenas a disponibilidade de agregados reativos, e apenas a substituição do tipo do cimento pode não ser suficiente.

De acordo com Barroso (2011), o uso de materiais pozolânicos se mostra como uma alternativa, já que esses materiais, quando adicionados ao cimento, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando compostos de natureza pozolânica. A adição desse tipo de material pode ajudar a diminuir a reatividade dos agregados, reduzindo a quantidade de gel e, conseqüentemente, diminuindo a expansão do concreto (ADORNO, 2017).

Dentre os materiais pozolânicos mais comumente utilizados, destacam-se a cinza volante, a sílica ativa e o metacaulim. Esses materiais apresentam atividade pozolânica devido à presença de sílica reativa em sua composição (COSTA, 2020). De acordo com Magri e Berton (2016), quando incorporados à mistura de concreto, eles participam das reações de hidratação e formam produtos pozolânicos, que

contribuem para a formação de uma matriz mais densa e menos permeável, aumentando a durabilidade do concreto.

Outra possibilidade de evitar a ocorrência da RAA é através do controle da umidade. A umidade é um fator crítico na RAA, e a manutenção da umidade adequada é importante para prevenir a ocorrência da reação. Por isso, o controle da umidade pode ser uma opção para reduzir a expansão causada pela RAA, dependendo do nível de reatividade do agregado (METHA; MONTEIRO, 2018). Isso pode ser feito através da utilização de membranas de cura ou um sistema de umidificação. Porém, caso a reatividade do agregado seja elevada, a umidade presente no próprio concreto já será suficiente para desencadear a ocorrência da RAA, como cita Bouzabata *et al.* (2012). Sendo assim, é necessário a busca por alternativas para a possível mitigação da reação.

Uma alternativa para mitigar a RAA é através do uso de tratamentos superficiais. A utilização de agentes hidrófobos, como impregnantes, penetrantes, selantes e membranas, pode ser adotada como tratamento superficial, para formar uma barreira que evite a entrada de umidade no concreto e reduza a absorção de água (ANDRIOLO, 1997). Os materiais devem possuir elasticidade suficiente para não fissurar ou até mesmo fragmentar devido às expansões associadas à RAA.

Gomes (2008) recomenda pinturas à base de silano e siloxano (eficazes para restringir o avanço das expansões em peças finas de concreto). O silicato de etila também tem apresentado bons resultados como tratamento de superfície em concretos sujeitos a agentes agressivos, devido à alteração da cinética da RAS e formação de uma barreira hidrofóbica, como demonstra Langaro (2023).

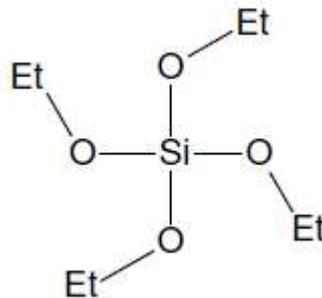
Outra opção para mitigação da RAA são os aditivos químicos. Esses aditivos podem ser adicionados diretamente ao concreto durante a mistura para reduzir o efeito da RAA. O silicato de etila também se mostra um possível agente mitigador da RAA quando utilizado como aditivo químico, sendo que seus efeitos foram estudados ao decorrer deste trabalho.

#### 2.3.1. Silicatos de etila

O ortosilicato de tetraetila (TEOS), um tipo de silicato de etila, conhecido como TS28, é um líquido incolor de baixa viscosidade, que contém no mínimo 28% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e possui a fórmula química  $\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$ , como mostra a Figura 1. Já o polissilicato de etila, conhecido como TS40, é um produto parcialmente hidrolisado,

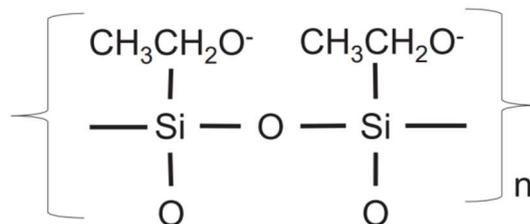
com maior concentração de  $\text{SiO}_2$  (no mínimo 40%) e possui a fórmula química  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3\text{Si}[(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_2\text{OSi}]_n\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ , representada na Figura 2 (DATIQUIM, 2014). É produzido através da reação do etanol com o tetracloreto de silício, e gera gás cloreto de hidrogênio como sub-produto. Através da hidrólise parcial e purificação do ortossilicato de tetraetila (TS28), que corresponde à forma pura do produto, obtém-se o produto condensado contendo 40% de  $\text{SiO}_2$ , denominado TS40. Posteriormente o silicato de etila é hidrolisado com água, ácido e um solvente, como exemplo o álcool, para produzir líquidos ligantes contendo geralmente de 10 a 25% de  $\text{SiO}_2$  (MACHADO, 2005).

Figura 2 - Fórmula do TS28



Fonte: Datiquim

Figura 3 - Fórmula do TS40



Fonte: Langaro (2023)

Apesar de serem mais comumente utilizados em tintas anticorrosivas, confecção de moldes cerâmicos refratários e até em aplicações de alta tecnologia, como aerogel, solgel e semicondutores (DATIQUIM, 2014), devido às suas propriedades ligantes, na área da engenharia civil podem ser utilizados como tratamentos superficiais com a finalidade de redução da porosidade do concreto

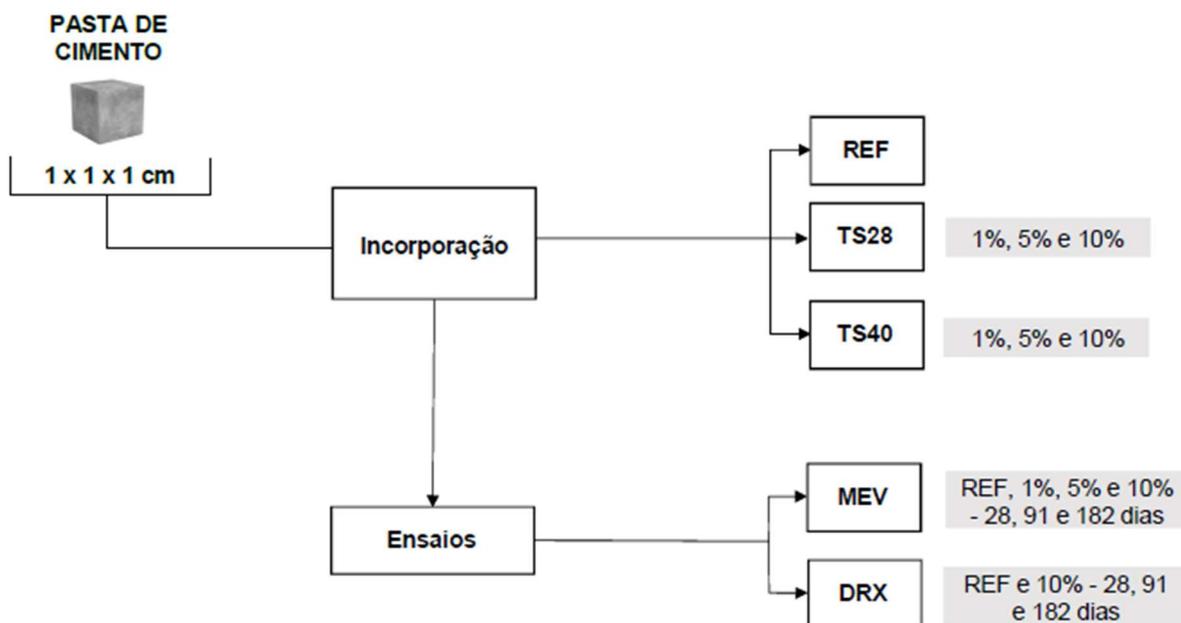
(LANGARO, 2023). Como a maioria dos produtos existentes no mercado, o TS28 e o TS40 são produtos patenteados. Dentro das patentes referenciadas (BROWN, 2008; BROWN, 2009) são mostrados diversos exemplos de utilização dos produtos TS28 e TS40. Uma possível utilização é como adição no momento da fabricação do concreto, diminuindo sua porosidade e possibilitando uma possível mitigação da reação álcali-agregado à qual ele está sujeito.

O silicato de etila reage com o hidróxido de cálcio, presente na solução alcalina, para formar uma matriz de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Devido à baixa viscosidade, essa matriz preenche as microfissuras e poros na pasta de cimento e na interface pasta-agregado, criando uma barreira física que impede a entrada de água e íons hidroxila, mas ainda permitindo que a umidade saia do concreto (SILVA; LIBORIO, 2005). Ao bloquear o acesso de água e íons hidroxila, o silicato de etila tende a diminuir a quantidade de álcalis disponíveis para reagir com os agregados potencialmente reativos, diminuindo assim a intensidade da RAA.

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi dividido em duas etapas, sendo a primeira referente às pastas de cimento e representada pela Figura 4, e a segunda referente às barras de argamassa e representada pela Figura 5.

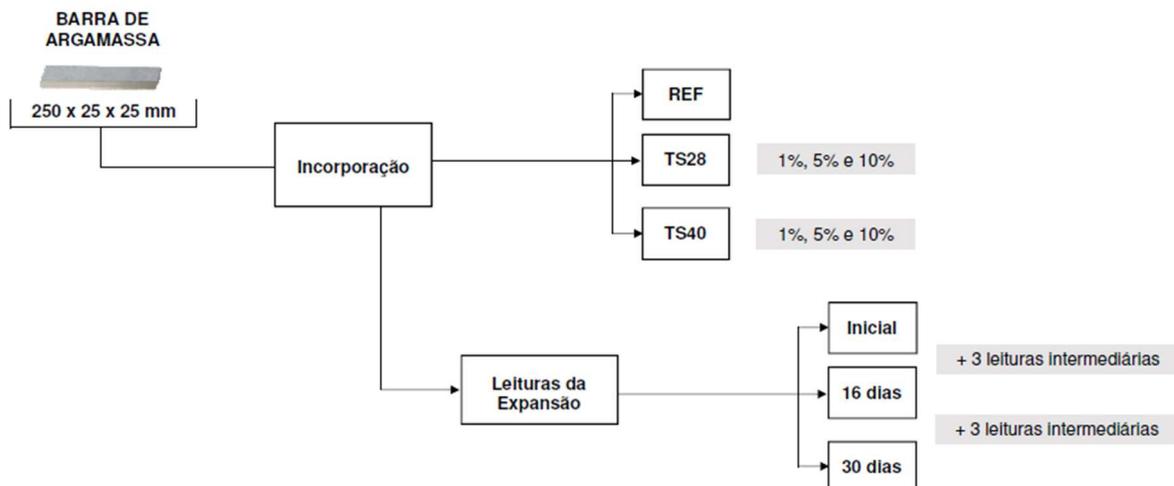
Figura 4 - Fluxograma de moldagem e ensaios das pastas de cimento (Etapa 1)



Fonte: De autoria própria

Como demonstrado na Figura 4 a primeira etapa deste trabalho trata das pastas de cimento, sendo que essas foram moldadas com o intuito de entender melhor o comportamento dos produtos TS28 e TS40 quando incorporados a pastas de cimento. Os ensaios realizados nesta etapa foram direcionados para uma melhor compreensão dos produtos formados pela interação entre o cimento e os silicatos.

Figura 5 - Fluxograma de moldagem e ensaios das barras de argamassa (Etapa 2)



Fonte: De autoria própria

Como demonstrado na Figura 5, a segunda etapa deste trabalho trata das barras de argamassa. Essas foram moldadas com o objetivo de realizar o ensaio acelerado em barras de argamassa descrito na NBR 15577-4 (ABNT, 2018d). O método acelerado foi escolhido devido ao cronograma disponível para elaboração do trabalho. Nesse caso, o objetivo foi analisar se os silicatos de etila adicionados à argamassa possuíam potencial mitigador da RAS. Para tanto foi utilizado um agregado potencialmente reativo já verificado em outra pesquisa (LANGARO, 2023).

Os materiais utilizados para as duas etapas do trabalho foram o cimento (CP-V), água, formas de silicone, os produtos TS28 e TS40, molde de metal padrão para moldagem das barras de argamassa e agregado miúdo, neste caso areia de britagem, conhecida como pó de pedra.

### 3.1. PASTAS DE CIMENTO

Ao iniciar o estudo de como os produtos TS28 e TS40 se comportariam dentro do concreto, a primeira proposta foi a confecção de pastas de cimento, feitas em pequena escala, para analisar a interação dos produtos com os compostos do cimento.

As pastas de cimento foram compostas por água e cimento, sendo este o CP V, com relação água/cimento de 0,45, e foram moldadas em formas de silicone que continham capacidade de 160 cubos de 1 cm<sup>3</sup>. A Figura 6 demonstra uma das formas utilizadas durante as moldagens. Cada forma então representa o equivalente a uma

amostra, sendo que cada amostra foi submetida a diferentes condições de cura (em água ou solução de água saturada com cal).

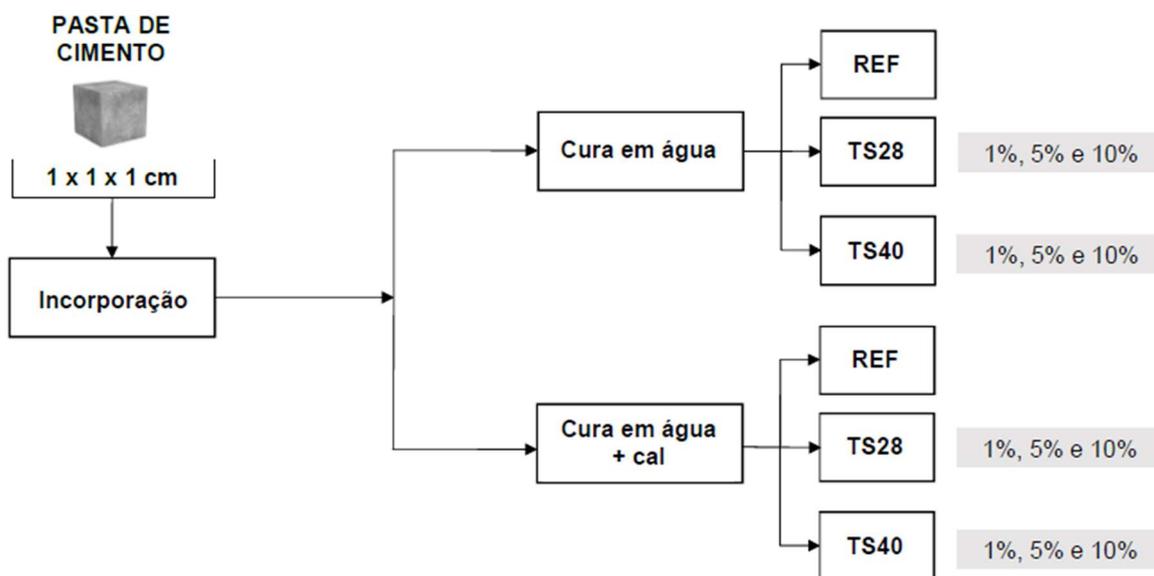
Figura 6 - Forma de silicone utilizada para a moldagem das pastas de cimento



Fonte: De autoria própria

A Figura 7 apresenta um esquema da quantidade de amostras produzidas e suas respectivas características de composição e cura, sendo que cada cubo de pasta de cimento representa uma forma moldada.

Figura 7 - Amostras de pastas de cimento



Fonte: De autoria própria

De acordo com a Figura 7, foram moldadas as pastas de referência, as quais não possuem as variáveis a serem estudadas, para que possam servir de

comparativo para comprovação ou não das reações esperadas quando aplicadas às variáveis, que neste caso corresponde à adição dos produtos TS28 e TS40.

As amostras de referência foram produzidas somente com água e cimento, seguindo a relação água/cimento mencionada anteriormente, sendo uma amostra para cada condição de cura: cura em água ou cura em solução de água com cal. Sendo assim, no total foram moldadas 2 amostras de referência, como representado na Figura 7.

A segunda etapa foi a realização da moldagem das amostras de pasta de cimento com incorporação dos produtos TS28 e TS40 como aditivos. Foram consideradas três diferentes porcentagens de produto a serem utilizadas, sendo todas elas calculadas a partir da massa de cimento utilizada na sua moldagem. As porcentagens determinadas foram de 1%, 5% e 10% de TS28 ou TS40. Após o desmolde, essas amostras foram submetidas às mesmas condições de cura das amostras de referência. No total foram moldadas 12 amostras com o produto incorporado, como representado na Figura 7.

### 3.1.1. Paralisação da hidratação

As amostras de pastas foram ensaiadas aos 28, 91 e 182 dias. Nestas idades foi paralisada a hidratação das mesmas. Dessa forma foi separado uma parcela de cada amostra disponível, cerca de 30 cubos de 1 cm<sup>3</sup> para cada idade.

A paralisação da hidratação ocorreu da mesma maneira em todas as amostras, seguindo o passo a passo a seguir:

- i. Separação de 30 cubos da amostra;
- ii. Realização da fragmentação de cada um dos cubos, individualmente, em pedaços menores;
- iii. Imersão dos pedaços resultantes da fragmentação em álcool isopropílico P.A. durante 24h;
- iv. Realização da drenagem do álcool isopropílico e em seguida colocação em estufa por 48h da amostra de pasta;
- v. Após a retirada da estufa, as amostras foram armazenadas em potes herméticos bem vedados, para impedir o contato com a umidade presente no ar, evitando que as amostras voltem ao processo de cura até o dia de

realização dos testes necessários, e guardados com sílica, que atua como um agente dessecador devido à sua facilidade para absorção de umidade.

### 3.1.2. Ensaio de Difração de raios X (DRX)

O ensaio de difração de raios X foi realizado em dois laboratórios distintos, sendo eles o Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU) e no Laboratório de Óptica de Raios-X e Instrumentação, localizados na Universidade Estadual de Ponta Grossa e na Universidade Federal do Paraná, respectivamente.

As medidas de DRX foram realizadas em amostras na forma de pó, sendo elas colocadas em amostrador padrão demonstrado na Figura 8, em equipamento Difratorômetro de Raios-x Shimadzu XRD-7000, tendo utilizado os seguintes parâmetros experimentais: dados coletados entre os ângulos de  $5^\circ$  a  $90^\circ$ , varredura com passo angular de  $0,02^\circ$  com velocidade de 2 graus por minuto.

Figura 8 - Amostrador padrão utilizado para ensaio DRX



Fonte: De autoria própria

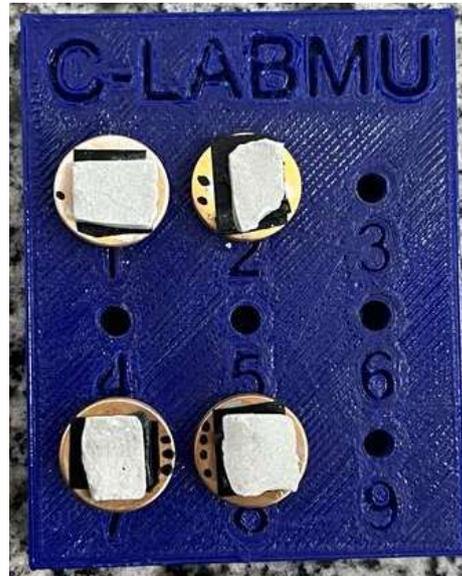
### 3.1.3. Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O ensaio microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizado no Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU), localizado na Universidade Estadual de Ponta Grossa. Foram utilizados dois equipamentos nos ensaios realizados, sendo eles o TESCAN MIRA3 FEG-SEM, que possibilitou a execução também do EDS de algumas das mostras, e o TESCAN VEGA3, utilizado devido à falta de disponibilidade do equipamento anterior.

As imagens do MEV foram realizadas em amostras previamente fragmentadas na fase de paralização da hidratação, sendo elas escolhidas com o intuito de serem

o mais planas e menores o possível como demonstrado na Figura 9. Foi adotada a tensão de aceleração dos elétrons em 15kV como o padrão.

Figura 9 - Amostras utilizadas para realização do ensaio MEV



Fonte: De autoria própria

### 3.2. ARGAMASSAS

A segunda etapa deste trabalho compreendeu o estudo das argamassas. Foram moldadas barras de argamassa de acordo com o método descrito pela NBR 15577-4 (ABNT, 2018d). Para a moldagem de 3 barras de argamassa, na dosagem foi utilizado um traço de 1: 2,25 com uma relação água/cimento de 0,47, sendo 440 g de cimento padrão (neste caso, CP V), 206,8 g de água e 990 g de agregado miúdo de granulometria indicada na tabela 2.

Tabela 2 - Granulometria requerida de material para ensaio acelerado em barras de argamassa

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
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

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

A tabela 3 apresenta a caracterização do agregado utilizado, que se trata de um gnaisse.

Tabela 3 - Caracterização do agregado

NORMA	CARACTERIZAÇÃO	AGREGADO
	Tipo	Gnaisse
Miúdo: NM 30:2000 / Graúdo: NM 53:2009	Absorção (%)	0,41
Miúdo: NM 52:2009 / Graúdo: NM 53:2009	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,59
NM 45:2006	Massa unitária compacta seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,49
NM 45:2006	Massa unitária solta seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,38
NBR NM 46:2003	Material pulverulento (%)	0,34

Fonte: De autoria própria

Para realizar a mistura, toda a quantidade de água foi colocada inicialmente no misturador mecânico, e posteriormente foi acrescentado o cimento, misturando estes materiais por 30 segundos em velocidade baixa. Sem interromper, foi acrescentado gradualmente o agregado miúdo com todas as frações já homogeneizadas, em um intervalo de 30 segundos. Em seguida, a velocidade foi aumentada e mantida por mais 30 segundos. A argamassa descansou por 1 min e 15 segundos na cuba coberta com um pano úmido e, por fim, iniciou-se novamente a mistura na velocidade alta por mais 1 minuto.

A moldagem das barras foi realizada utilizando um molde de metal com dimensões de 25 mm x 25 mm x 250 mm. O molde foi preenchido com a argamassa preparada e compactado com 25 golpes em cada uma das quatro camadas, utilizando um soquete padronizado. Após a compactação, a superfície superior da argamassa foi nivelada com uma régua. A Figura 10 mostra as barras de argamassa imediatamente após a moldagem.

Figura 10 - Barras de argamassa imediatamente após a moldagem



Fonte: De autoria própria

As barras foram então deixadas em repouso por 24 horas em uma câmara úmida a aproximadamente 30 °C. Após isso, as barras foram identificadas de acordo com um padrão pré-definido, demonstrado na Figura 11, sendo indicado o seu respectivo número e o sentido de medição. O lado em que estavam escritas estas informações foi sempre o primeiro lado a ser medido, e as seguintes medições ocorreram no sentido horário.

Figura 11 - Padrão de identificação das barras de argamassa



Fonte: De autoria própria

As barras foram imersas em água em um recipiente de armazenamento, o qual foi aquecido em  $6 \pm 2$  horas até 80 °C, e permanecer durante 24 horas, contando a partir do início do aquecimento. Em seguida, dentro de um período de 12 horas, iniciaram-se as leituras das barras. Para a leitura inicial, as barras foram removidas

da água uma de cada vez. Cada barra então foi colocada no comparador, demonstrado na Figura 12, sempre na mesma posição, e girada lentamente 360° no mesmo sentido, anotando-se a menor leitura. Esse processo foi realizado dentro do período de  $15 \pm 5$  segundos, a partir da retirada da barra de argamassa da água. As argamassas também foram pesadas em balança para aferir sua massa.

Figura 12 - Comparador e barra padrão utilizados



Fonte: De autoria própria

Após a leitura e pesagem inicial, as barras foram imersas em um tanque com uma solução de hidróxido de sódio à concentração de 1 N, a 80 °C, selado e mantido na estufa ventilada ou banho-termorregulador. A Figura 13 demonstra o tanque utilizado para o ensaio e a Figura 14 o interior do mesmo.

Figura 13 - Tanque utilizado para o ensaio



Fonte: De autoria própria

Figura 14 - Interior do tanque utilizado para o ensaio



Fonte: De autoria própria

Foram realizadas leituras para constatar a variação dimensional da barra de argamassa nas idades de 16 e 30 dias, a partir da data de moldagem e pelo menos três leituras intermediárias em cada período, aproximadamente na mesma hora. Essa variação é a diferença entre o comprimento da barra imediatamente após a moldagem e o comprimento após a imersão em solução alcalina e subsequente armazenamento

em água. A expansão média foi calculada e comparada com os critérios estabelecidos pela norma. A cada leitura as barras também foram pesadas e a variação de massa durante todo o ensaio também foi calculado.

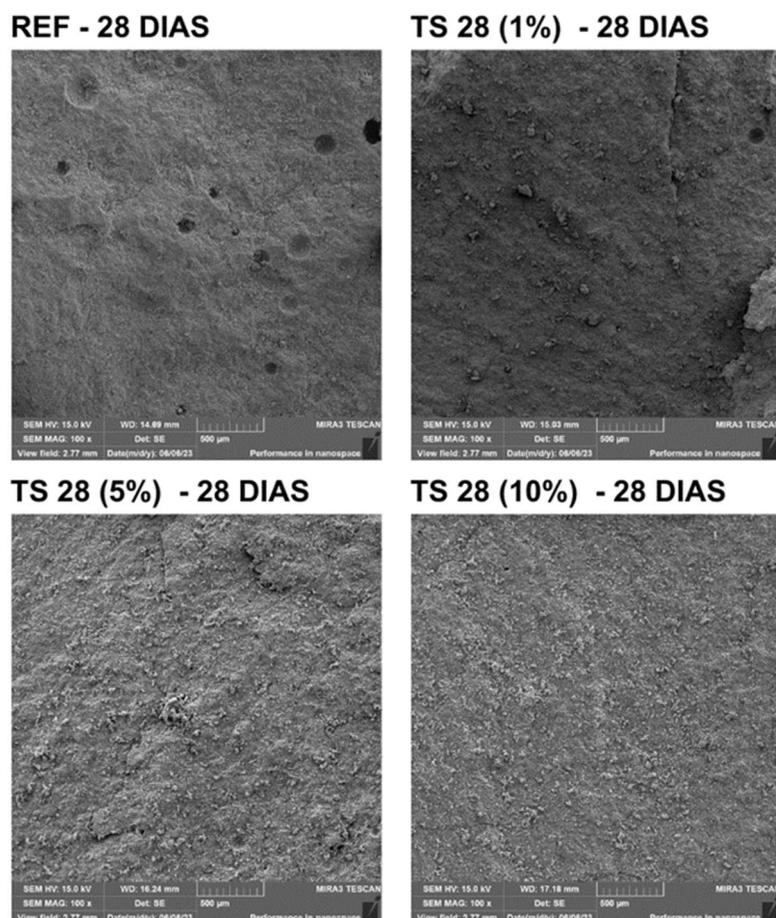
#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo a seguir discorre sobre os resultados e conclusões obtidos nos ensaios do presente trabalho. O primeiro ensaio a ser apresentado será a microscopia de varredura (MEV), pois foi a etapa inicial para entendimento das reações e formações ocasionadas pela adição dos produtos, juntamente com a difração de Raios X, responsável pela análise dos compostos das pastas de cimento. O segundo será o teste acelerado das barras de argamassa, responsável por confirmar a hipótese inicial do trabalho.

##### 4.1. Microscopia de varredura - MEV e difração de raios-X (DRX) em pastas de cimento

A Figura 15 mostra as micrografias das amostras de pasta de cimento de referência e com incorporação do TS28 aos 28 dias de idade com cura em água.

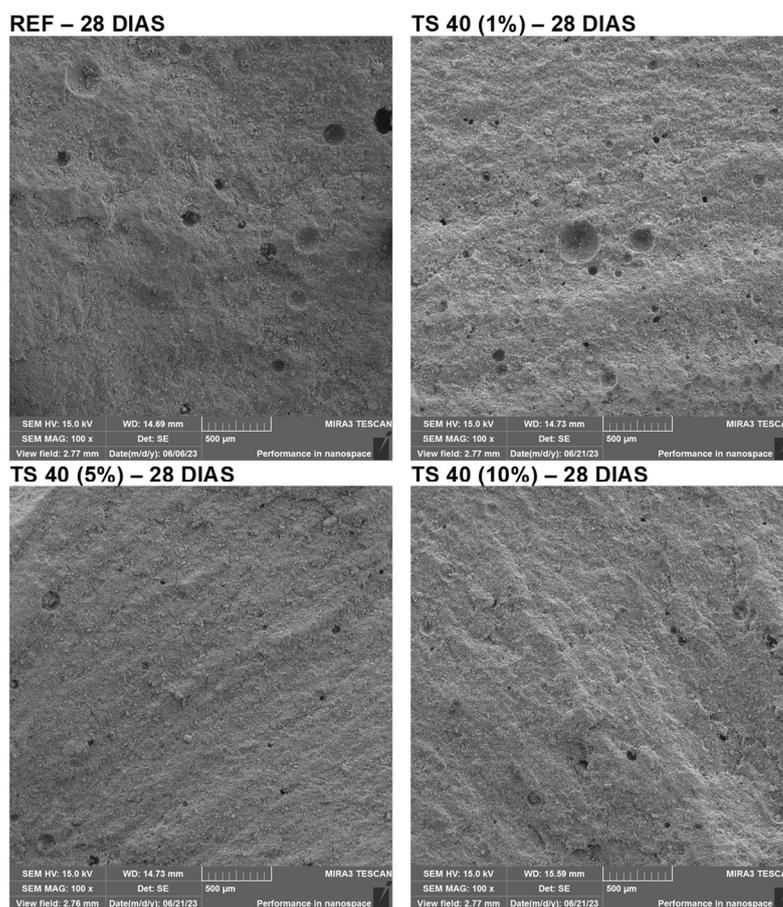
Figura 15 - Micrografias de amostras de pastas de cimento com TS 28 aos 28 dias de idade



Fonte: De autoria própria

Estas micrografias possuem magnificação de 100x, e foram realizadas em todas as amostras com a finalidade de observar se havia diferença visível na quantidade e tamanho dos poros com a incorporação do produto. É possível perceber visualmente uma possível redução considerável da porosidade das pastas à medida que o TS28 é incorporado. A mesma comparação foi realizada nas amostras com incorporação de TS40 aos 28 dias de idade com cura em água, demonstrada na Figura 16.

Figura 16 - Micrografias de amostras de pastas de cimento com TS 40 aos 28 dias de idade



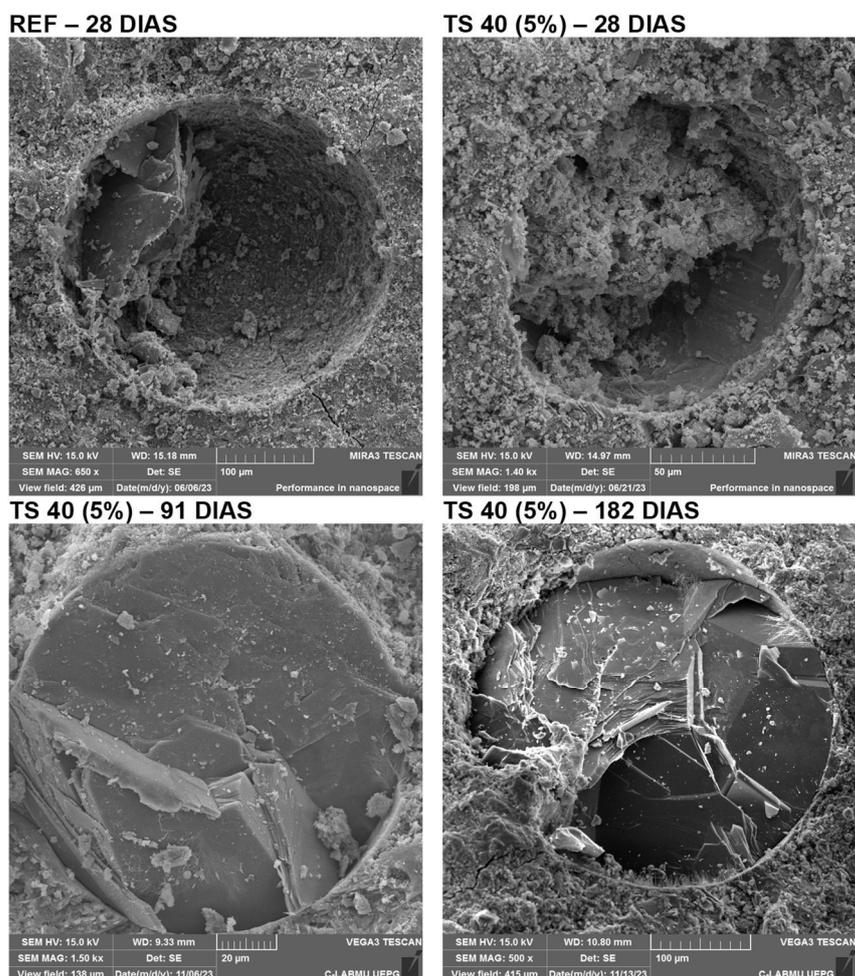
Fonte: De autoria própria

A Figura 16 mostra micrografias com magnificação de 100x, e foram realizadas nas amostras com incorporação de TS40 com a finalidade de observar se o produto traria o mesmo efeito visual de redução na quantidade de poros que o TS28.

Analisando as Figuras 15 e 16 conclui-se que os produtos obtiveram efeitos similares em relação a possível redução de porosidade ao serem incorporados nas pastas de cimento, comprovando a ação de diminuição da porosidade mencionada na patente dos produtos e reafirmando a conclusão de Langaro (2023). Porém, isso trata-se de uma hipótese, já a que a redução na porosidade também pode estar relacionada à viscosidade do produto, que pode ter aprisionado o ar ainda no estado fresco, resultando em uma menor presença de vazios no estado endurecido.

A Figura 17 mostra uma comparação entre poros encontrados nas amostras de referência e com adição de 5% de TS40, ambos nas idades de 28, 91 e 182 dias.

Figura 17 - Micrografias de amostras de pastas de cimento com incorporação de 5% de TS40



Fonte: De autoria própria

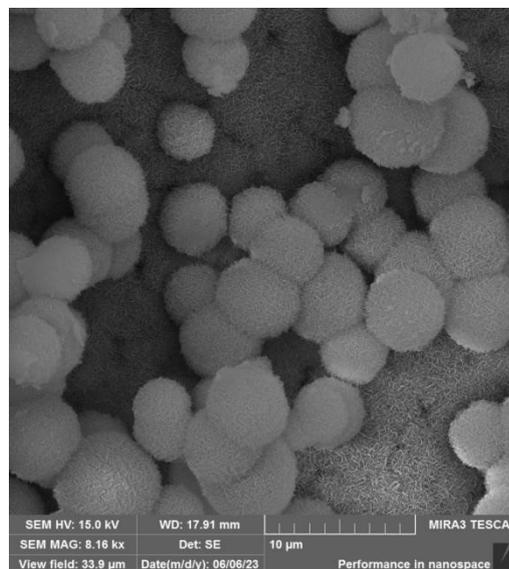
Na figura 17 nota-se que os poros das amostras de referência se encontram sem preenchimento, enquanto os poros das amostras com incorporação vão sendo

preenchidos ao longo do tempo. Na amostra com incorporação na idade de 182 dias encontra-se um poro praticamente todo preenchido, situação recorrente na maioria dos poros das amostras onde foram incorporados os produtos.

Após essa análise, pode-se concluir que os produtos influenciam na quantidade de vazios existentes.

A Figura 18 mostra a micrografia da amostra de pasta de cimento com incorporação de 10% de TS28 com cura em água com uma formação de aspecto similar à sílica com algum produto de formação ao seu redor.

Figura 18 - Formação semelhante à sílica na amostra de pasta de cimento com incorporação de 10% de TS28

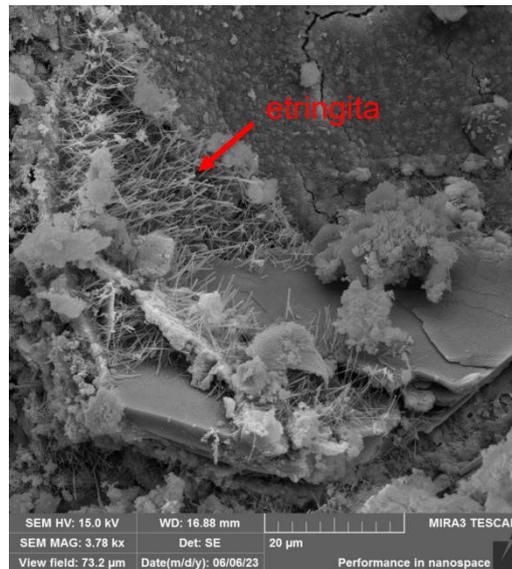


Fonte: De autoria própria

A Figura 18 apresenta uma micrografia com magnificação de 8,16 kx, ampliação necessária para que a estrutura da formação ficasse visível. Devido à sua localização dentro de um poro e não ter sido encontrada a mesma formação na superfície, não foi possível a realização de EDS para confirmar sua composição e assegurar o produto que se formou. Essa estrutura foi encontrada apenas nas amostras com 28 dias de idade.

A Figura 19 mostra a micrografia da amostra de pasta de cimento com incorporação de 5% de TS28 com cura em água com uma formação similar à etringita.

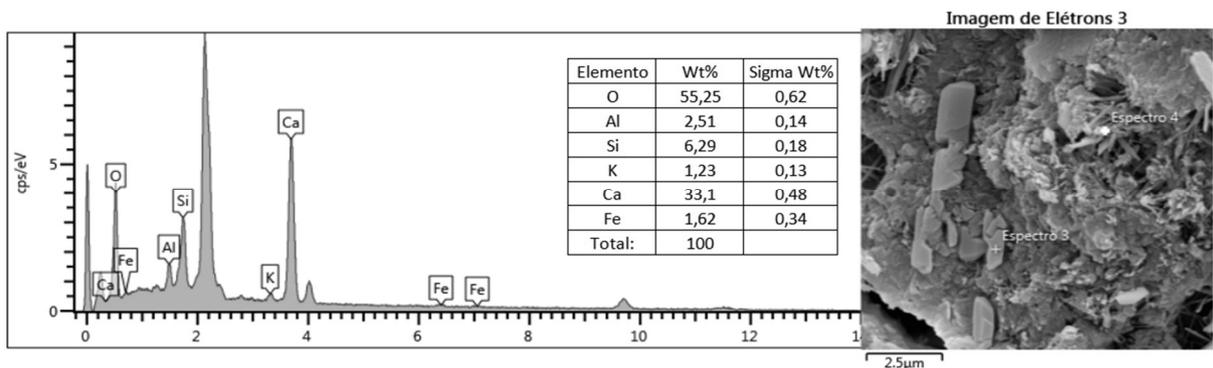
Figura 19 - Formação de etringita na amostra de pasta de cimento com incorporação de 5% de TS28



Fonte: De autoria própria

A Figura 19 mostra uma micrografia com magnificação de 3,78 kx, ampliação necessária para que a estrutura da formação ficasse visível para realização de comparação com a literatura. A fim de confirmar que se tratava de etringita, foi realizado o EDS da amostra, mostrado na Figura 20.

Figura 20 - EDS da amostra com incorporação de 1% de TS28 com cura em água e idade de 28 dias



Fonte: De autoria própria

O resultado do EDS mostrou que a composição da formação encontrada era semelhante a composição teórica encontrada na literatura, demonstrada na tabela 3. Há uma variação entre os valores obtidos através do EDS realizado e o percentual teórico do elemento, já que átomos adjacentes ao ponto podem ser atingidos pela

incidência dos raios X, o que não descaracteriza o cristal encontrado, como explica Langaro (2023).

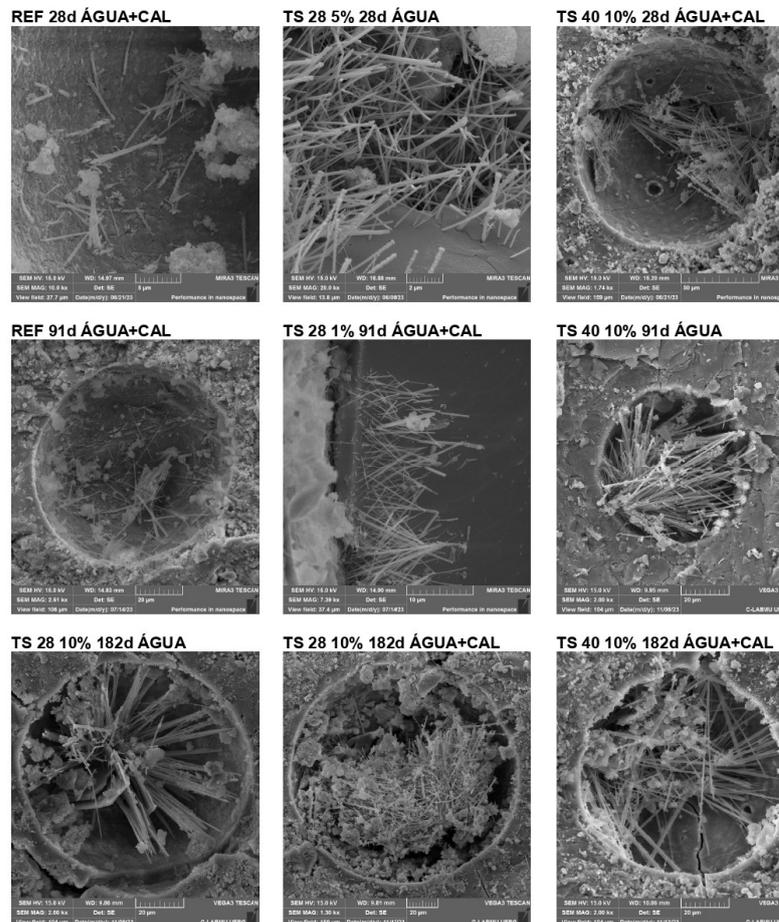
Tabela 4 - Percentual teórico da etringita e da portlandita

Elemento químico	Percentual teórico da etringita (%)	Percentual teórico da portlandita (%)
O	63,74	43,19
Ca	19,13	53,99
S	7,67	-
H	5,14	2,82
Al	4,3	-

Fonte: Langaro (2023)

Analisando as demais amostras, encontrou-se a mesma formação em todas as amostras em que a análise foi realizada, como exemplificado na Figura 21.

Figura 21 - Formação de etringita em diferentes amostras

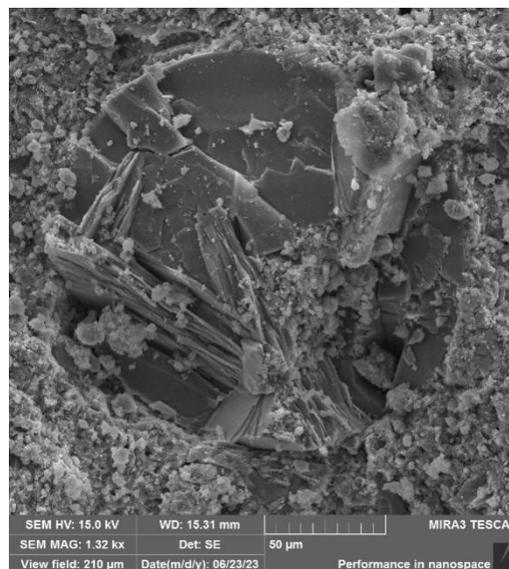


Fonte: De autoria própria

A formação de etringita nas amostras de pasta de cimento já era esperada, pois ela se forma devido a interação entre o sulfato e aluminato presentes na solução dos poros da matriz cimentícia, sendo sua formação comum no processo da hidratação do cimento. Quando se observa a comparação realizada na Figura 21, nota-se uma diferença na quantidade e comprimento da etringita nas amostras com incorporação, sendo elas em maior quantidade e mais compridas, em ambos os tratamentos. Essa mudança sugere que os produtos interferem na formação de etringita nas pastas de cimento, reafirmando a hipótese de Langaro (2023), que cita que é possível que os produtos tenham reduzido o processo da conversão da etringita em monossulfoaluminato de cálcio, por bloquear o acesso de água.

Além da etringita, também foi encontrado uma possível formação de hidróxido de cálcio (portlandita), outro produto resultante do processo de hidratação do cimento Portland. A Figura 22 mostra a micrografia da amostra de pasta de cimento de 28 dias de idade com incorporação de 10% de TS28 com cura em água com cal com formação similar à portlandita.

Figura 22 - Formação de portlandita na amostra de pasta de cimento com incorporação de 10% de TS28

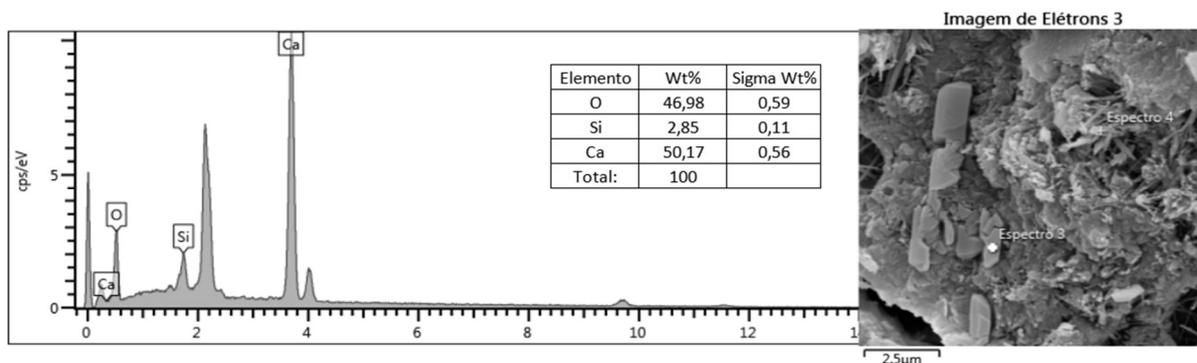


Fonte: De autoria própria

A Figura 22 mostra uma micrografia com magnificação de 1,32 kx, ampliação necessária para que a estrutura da formação ficasse visível para realização de

comparação com a literatura. A fim de confirmar que se tratava de portlandita, foi realizado o EDS da amostra, mostrado na Figura 23.

Figura 23 - EDS da amostra com incorporação de 1% de TS28 com cura em água e idade de 28 dias



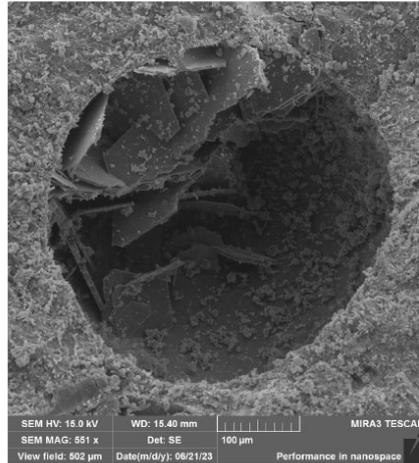
Fonte: De autoria própria

O resultado do EDS mostrou que a composição da formação encontrada tinha predominância dos elementos cálcio e oxigênio, sendo semelhante a composição teórica encontrada na literatura, presente na tabela 3.

Analisando as demais amostras, encontrou-se a mesma formação em todas as amostras com idades de 28 e 91 dias, como demonstrado na Figura 24.

Figura 24 - Formação de portlandita em diferentes amostras

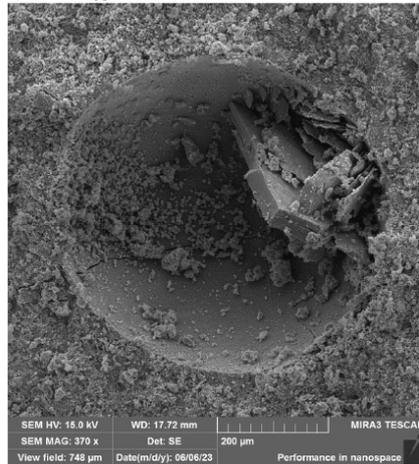
**REF 28d ÁGUA+CAL**



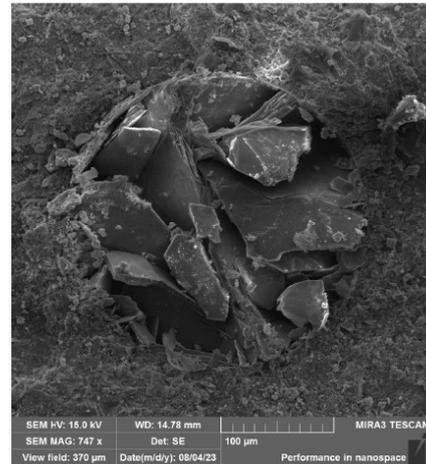
**TS 28 5% 28d ÁGUA**



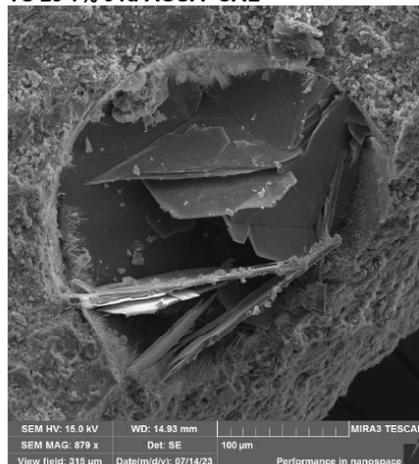
**TS 28 10% 28d ÁGUA**



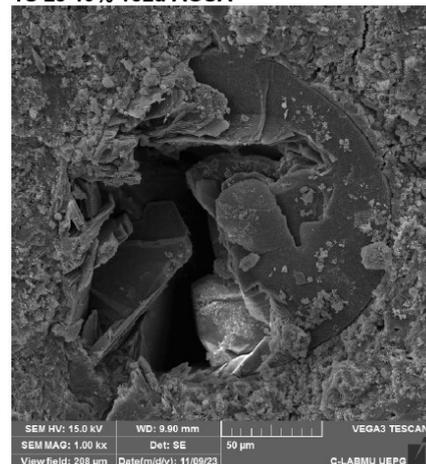
**REF 91d ÁGUA**



**TS 28 1% 91d ÁGUA+CAL**



**TS 28 10% 182d ÁGUA**



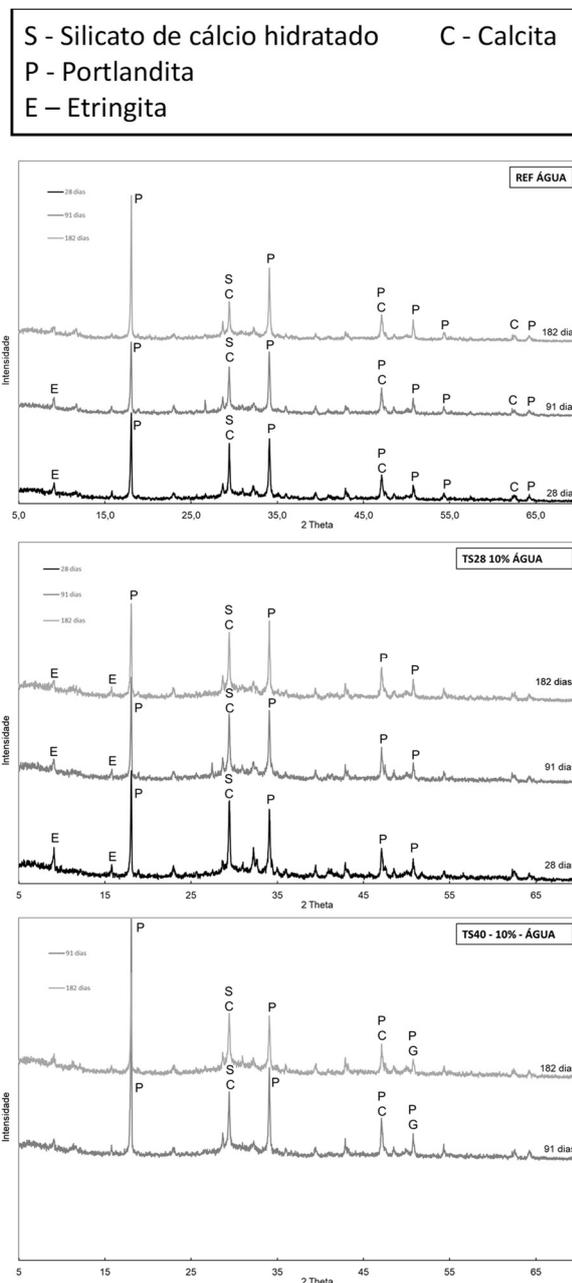
Fonte: De autoria própria

A formação de portlandita nas amostras de pasta de cimento já era esperada, sendo sua formação comum no processo da hidratação do cimento. Quando se 52

observa a comparação realizada na Figura 24, nota-se uma diferença na quantidade de portlandita nas amostras com incorporação, sendo ela em maior quantidade, em ambos os tratamentos. Essa mudança sugere que os produtos interferem na formação de portlandita nas pastas de cimento.

A figura 25 mostra o resultado dos ensaios de difração de raio-X (DRX) em amostras de referência e com incorporação de 10% de TS 28 e TS 40 aos 28, 91 e 182 dias de idade com cura em água.

Figura 25 - DRX em amostras de pastas de cimento com cura em água

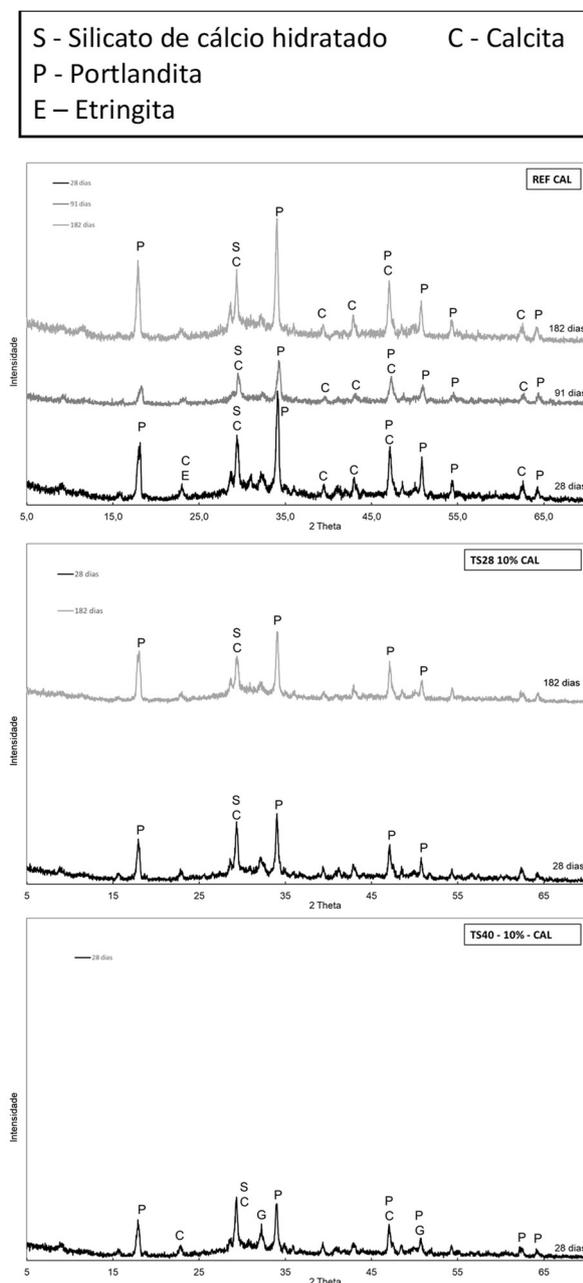


Fonte: De autoria própria

Na imagem 25, é possível analisar a constância de picos de portlandita, etringita e silicato de cálcio hidratado (C-S-H) em todas as idades. Porém, na amostra com incorporação de 10% de TS 40, foi identificada uma parte amorfa aos 28 dias, que não consta na figura devido à necessidade de repetição do ensaio para confirmação.

A figura 26 mostra o resultado dos ensaios de difração de raio-X (DRX) em amostras de referência e com incorporação de 10% de TS 28 e TS 40 aos 28, 91 e 182 dias de idade com cura em água saturada com cal.

Figura 26 - DRX em amostras de pastas de cimento com cura em água saturada com cal

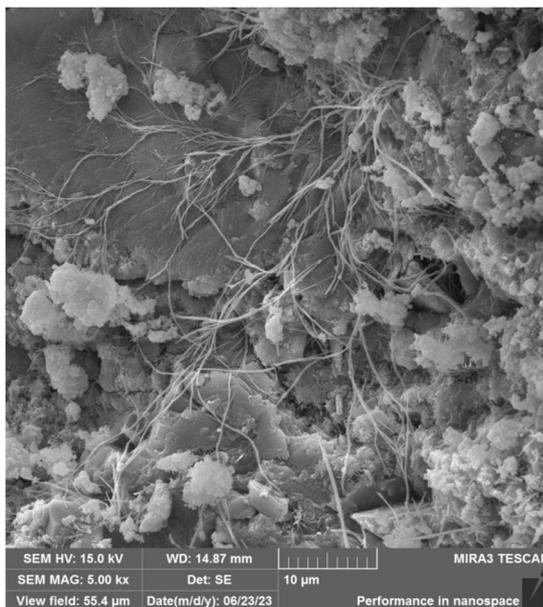


Fonte: De autoria própria

A Figura 26 mostra os picos de portlandita e C-S-H nas amostras com cura em água saturada com cal. Também houveram picos muito distintos não presentes na imagem, desta vez nas amostras com incorporação de TS28 e também de TS40, sendo assim, entende-se que houve erro no equipamento na execução desse ensaio, necessitando que seja refeito.

As Figuras 27 e 28 mostram uma formação com aparência similar à raízes, encontrada na amostra com incorporação 10% de TS40 com cura em água com cal e idade de 28 dias.

Figura 27 - Formação com aparência similar a raízes na amostra com 1% de TS28 com cura em água com cal e idade de 28 dias



Fonte: De autoria própria

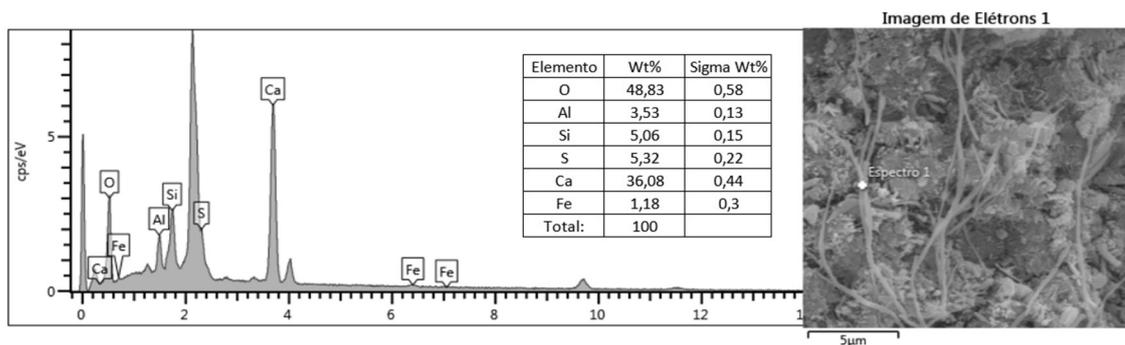
Figura 28 - Formação com aparência similar a raízes na amostra com 5% de TS40 com cura em água com cal e idade de 28 dias



Fonte: De autoria própria

As Figuras 27 e 28 mostram micrografias com magnificação de 5,00 kx e 11,4 kx, ampliação necessária para que a estrutura da formação ficasse visível para realização de comparação com a literatura. A fim de confirmar do que se tratava, foi realizado o EDS da amostra, mostrado na Figura 29.

Figura 29 - EDS da amostra com incorporação de 5% de TS28 com cura em água com cal e idade de 91 dias

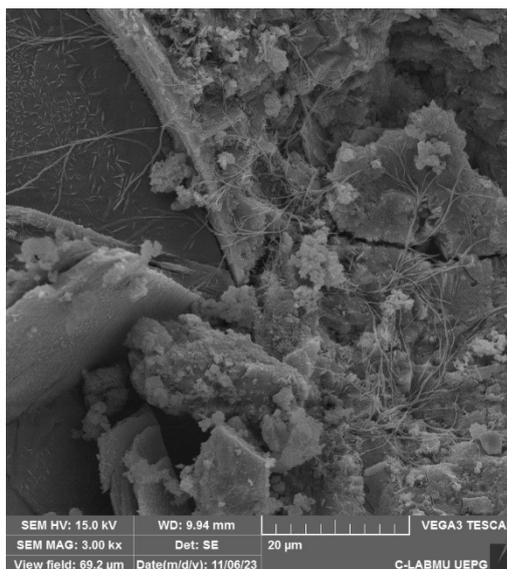


Fonte: De autoria própria

O resultado do EDS mostrou que a composição da formação encontrada tinha predominância dos elementos cálcio e oxigênio, contendo também os elementos alumínio, silício, enxofre e ferro em menores porcentagens.

Inicialmente, essa morfologia foi encontrada nas amostras que tinham condição de cura em uma solução de água com cal, porém ao longo da realização dos ensaios elas também foram encontradas nas amostras com cura em água, como mostrado na Figura 30.

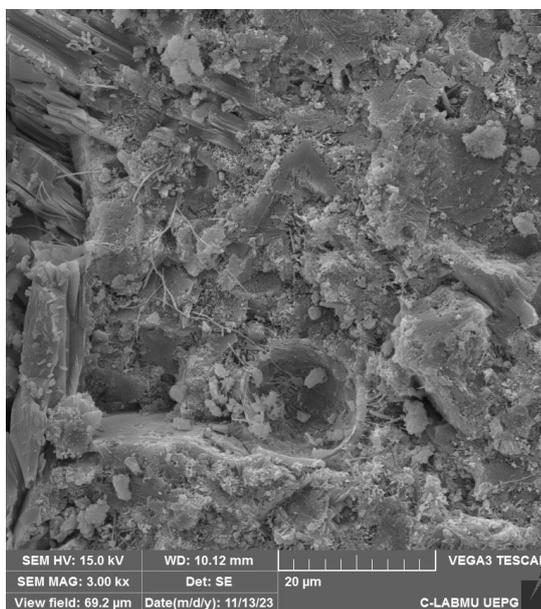
Figura 30 - Formação com aparência similar a raízes na amostra com 1% de TS40 com cura em água e idade de 91 dias



Fonte: De autoria própria

Procurando por essa mesma morfologia em amostras com idades mais avançadas notaram-se mudanças em suas características nas amostras com idade de 182 dias, como mostrado na Figura 31.

Figura 31 - Formação com aparência similar a raízes na amostra com 5% de TS28 com cura em água com cal e idade de 182 dias



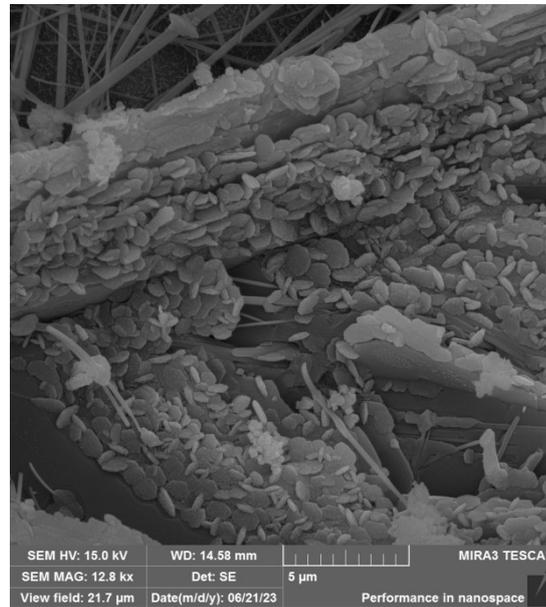
Fonte: De autoria própria

Na Figura 31 é possível observar que com o tempo as formações semelhantes a raízes são encontradas, porém em menor quantidade e mais dispersas, sugerindo uma gradual dissolução.

Essa formação foi identificada na maioria das amostras, sugerindo que o fator em comum para que ela ocorra sejam os produtos incorporados nas pastas de cimento. Recorrendo a literatura em busca de algo que se assemelhasse à sua morfologia e composição, não foi encontrado nada similar para que pudesse ser realizada uma comparação.

Também foram encontradas formações granulares em algumas amostras, como mostra a Figura 32.

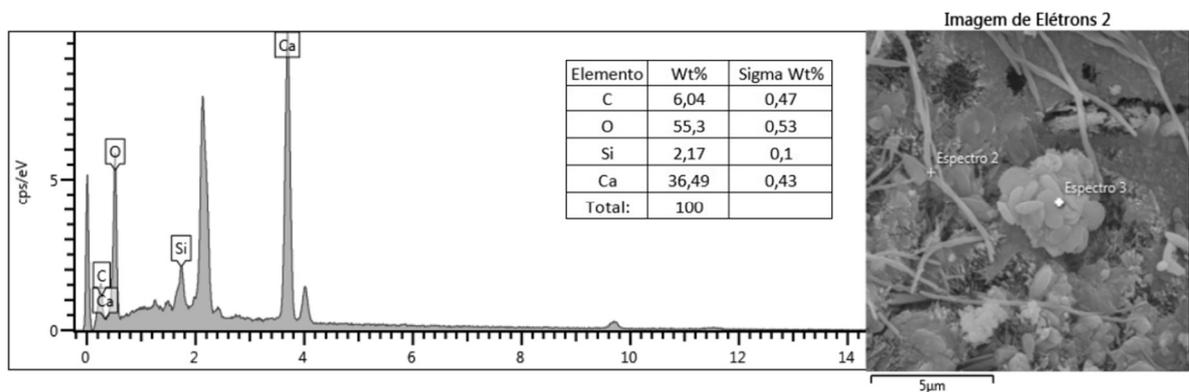
Figura 32 - Formação granular na amostra com 10% de TS40 com cura em água com cal e idade de 28 dias



Fonte: De autoria própria

A Figura 32 mostra uma micrografia com magnificação de 12,8 kx, ampliação necessária para que a estrutura da formação ficasse visível para realização de comparação com a literatura, pode-se ver que se tratam de formações granulares aglomeradas. A fim de confirmar do que se tratava, foi realizado o EDS da amostra, mostrado na Figura 33.

Figura 33 - EDS da amostra com incorporação de 10% de TS40 com cura em água com cal e idade de 28 dias



Fonte: De autoria própria

O resultado do EDS mostrou que a composição da formação encontrada tinha predominância dos elementos carbono, cálcio e oxigênio, contendo também o elemento silício em menor porcentagem.

Essa formação foi identificada predominantemente nas amostras com incorporação de TS40 com cura em água com cal, possuindo duas exceções: uma amostra com incorporação de TS40 porém com cura em água e uma amostra com incorporação de TS28 com cura em água com cal. A menor ocorrência dessas formações mostra a necessidade de um estudo mais aprofundado para entender como a mesma se forma, podendo-se concluir com as informações atuais que ambos o produto e a cura podem ser fatores que influenciam na sua formação.

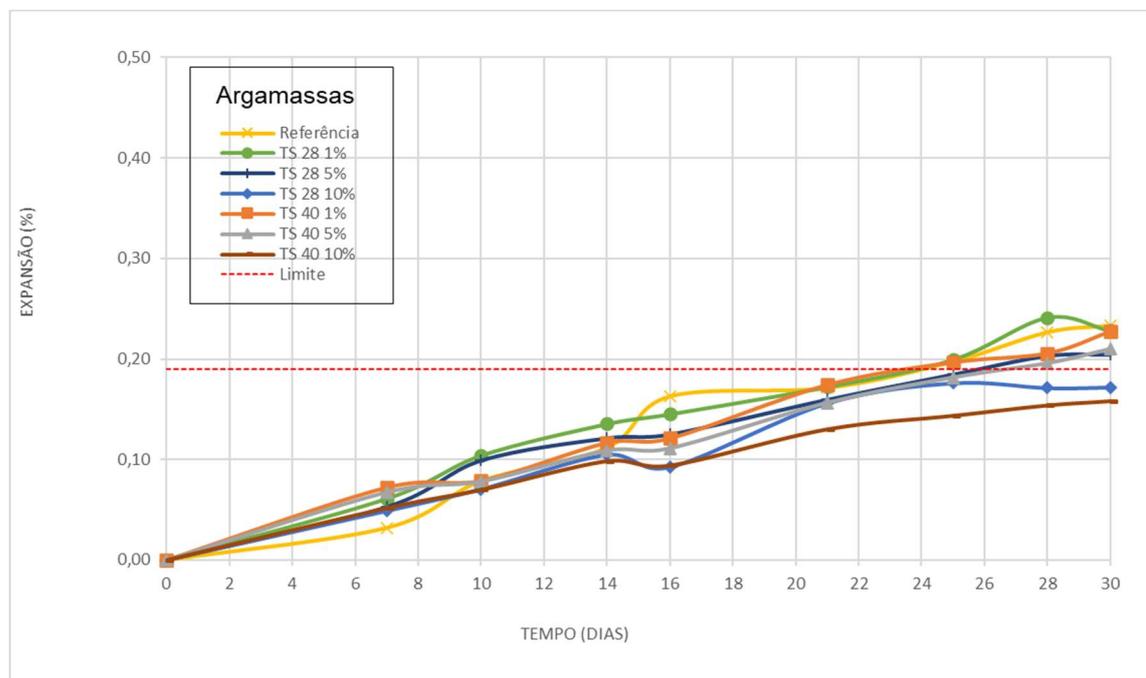
#### 4.2. Teste acelerado das barras de argamassa

Na fase de moldagem do ensaio acelerado das barras de argamassa notou-se que a adição dos silicatos de etila teve um impacto negativo na trabalhabilidade da argamassa quando adicionados em maiores porcentagem, em relação a argamassa sem nenhuma adição, assim como também ocorreu na moldagem das pastas de cimento. Essa diminuição na trabalhabilidade está relacionada com a maior necessidade de água vinda dos silicatos, pois eles necessitam de uma maior quantidade de água para que possam realizar a sua hidrólise.

Outro aspecto afetado pela adição dos silicatos de etila foi o tempo de cura das barras de argamassa. Ao final das primeiras 24 horas de cura, as barras que continham 10% de adição de ambos os produtos ainda possuíam aspecto de úmidas e conseqüentemente estavam mais frágeis do que as demais barras, o que ocasionou em sua quebra no momento da desmoldagem. Por este fator, foi necessário um maior cuidado ao desmoldar essas barras, e a moldagem do dobro das barras necessárias para o ensaio, com a finalidade de garantir que ao final pelo menos 3 barras teriam sido desmoldadas com sucesso.

Os resultados das expansões obtidos em cada barra de argamassa estão contidos no Apêndice. O gráfico do resultado do teste acelerado em barras de argamassa pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 - Gráfico das expansões médias das barras de argamassa



Fonte: De autoria própria

Para maior entendimento do gráfico, a tabela 5 apresenta as médias das expansões obtidas aos 30 dias de idade, com as respectivas classificações de cada amostra, de acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018a).

Tabela 5 - Classificação das expansões médias das barras de argamassa

Tipo	Expansão (%) - aos 30 dias	Classificação
Referência	0,233	Potencialmente reativo grau R1
TS 28 1%	0,228	Potencialmente reativo grau R2
TS 28 5%	0,204	Potencialmente reativo grau R3
TS 28 10%	0,172	Potencialmente inócuo grau R0
TS 40 1%	0,227	Potencialmente reativo grau R2
TS 40 5%	0,21	Potencialmente reativo grau R3
TS 40 10%	0,158	Potencialmente inócuo grau R0

Fonte: De autoria própria

A NBR 15777-1 (ABNT, 2018a) classifica o agregado como potencialmente reativo quando a expansão das barras de argamassa ultrapassa 0,19% aos 30 dias, e potencialmente inócuo quando permanece abaixo desse valor.

O agregado utilizado se mostrou potencialmente reativo no ensaio de expansão de barras de argamassa, uma vez que as barras de referência utilizadas,

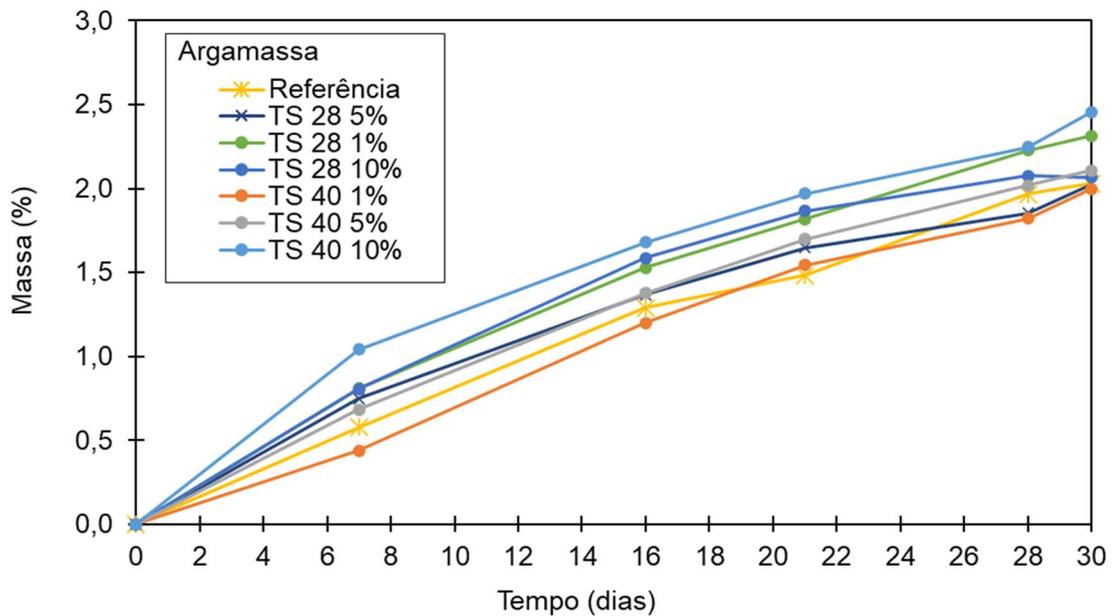
sem adição de produto, apresentaram uma expansão média de 0,233% aos 30 dias, sendo classificado como potencialmente reativo grau R1, faixa que compreende expansões que vão de 0,19% a 0,40% para as barras de argamassa.

Ao analisar o resultado das expansões de barras de argamassa com adição de 1% dos produtos, nota-se que as médias das expansões aos 30 dias foram minimamente inferiores às barras de referência, sendo que até os 28 dias estavam se mantendo superiores à referência. Um possível motivo para que as barras com incorporação de 1% dos produtos tenham superado as expansões das barras de referência durante a maior parte do período de ensaio, é a necessidade de uma concentração mínima de produto para que ele possa desempenhar o comportamento sugerido em suas patentes.

Nas barras com maior concentração do tratamento, as expansões diminuíram significativamente, e nas barras com 10% do produto incorporado, as expansões se mantiveram abaixo do limite de 0,19% aos 30 dias. As barras com incorporação de 10% de TS 28 obtiveram uma expansão média de 0,172% aos 30 dias, enquanto a expansão média das barras com incorporação de 10% de TS 40 foi de 0,158 na mesma idade. Isso mostra que com uma incorporação dos produtos a partir de 10%, eles possuem um comportamento potencial de impedir a expansão das barras de argamassa, mesmo elas contendo um agregado potencialmente reativo, sendo o TS 40 mais eficiente que o TS 28.

Além de monitorar a expansão das barras, houve o monitoramento do seu ganho de massa ao longo do ensaio, a Figura 35 mostra a variação de massa das barras de argamassa durante o ensaio acelerado de expansão.

Figura 35 - Gráfico da variação das massas das barras de argamassa



Fonte: De autoria própria

Nota-se que, apesar de apresentarem as menores expansões médias, as barras de argamassa com incorporação de 10% de produto (TS 28 10% e TS 40 10%) foram as que apresentaram a maior variação de massa durante o período do ensaio. O maior ganho de massa pode estar relacionado à uma maior absorção de água pelas barras, sendo que o produto quando incorporado, para que possa fazer a reação de hidrólise, absorvendo água da argamassa e conseqüentemente do meio de cura em questão, o que explica o aumento de massa em barras com maior porcentagem do produto.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões elaboradas através das análises dos resultados obtidos no presente trabalho.

No que se refere às pastas de cimento, a incorporação do TEOS demonstrou uma possível redução da porosidade. Visualmente, os dois produtos testados apresentaram efeitos semelhantes na redução da porosidade, corroborando com as conclusões de trabalhos anteriores. Além disso, a análise da formação de etringita e portlandita revelou diferenças significativas nas amostras com incorporação, indicando uma interferência dos produtos nesse processo. A maior quantidade e comprimento da etringita nas amostras com incorporação sugerem uma possível redução na conversão da etringita em monossulfoaluminato de cálcio, conforme hipótese também anteriormente proposta. Essa mudança reforça a ideia de que os produtos bloqueiam o acesso de água, impactando a formação desses produtos de hidratação.

Quanto aos resultados obtidos no teste de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, foi observado que o agregado utilizado apresentou potencial reativo, evidenciado pela expansão média das barras de referência superior ao limite apresentado pela norma. A incorporação de 1% dos produtos resultou em expansões superiores, possivelmente devido à necessidade de uma concentração mínima para que os produtos desempenhem seu papel conforme descrito nas patentes. No entanto, nas barras com maior concentração (a partir de 5%), as expansões diminuíram significativamente, e nas barras com 10% do produto incorporado, as expansões se mantiveram abaixo do limite estabelecido aos 30 dias. Isso confirma que, mesmo com um agregado potencialmente reativo, a incorporação dos produtos em concentrações adequadas é capaz de impedir a expansão das barras de argamassa.

Dessa forma, conclui-se que o silicato de etila (TEOS) se mostra uma estratégia promissora para a mitigação dos efeitos adversos da reação álcali-agregado, sendo necessário a continuidade dos estudos e de outros ensaios para confirmação desta hipótese.

## REFERÊNCIAS

ADORNO, Cleberson dos Santos. **EFEITOS FÍSICO-QUÍMICOS DE ADIÇÕES MINERAIS NA REATIVIDADE ÁLCALIAGREGADO EM COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND**. 2017. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ALBERTINI, Paloma Gazolla de Oliveira. **Sistema de proteção superficial de estruturas de concreto de usinas hidrelétricas para controle da Reação Álcali-Agregado**. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” L, Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/111147/000797239.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 abr. 2023.

ALEXANDER, M. G. **Alkali–aggregate reaction**. [S.l.]: Elsevier LTD, 2019. 87–113 p. ISBN 9780081026168.

ANDRIOLO, F. R. **Proposições para conservação de estruturas afetadas pela reação álcali-agregado**. In: I SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais. São Paulo: IBRACON, 1997. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro: [S.N.], 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto**. Rio de Janeiro: [S.N.], 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto**. Rio de Janeiro: [S.N.], 2018c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro: [S.N.], 2018d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro: [S.N.], 2018e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto**. Rio de Janeiro: [S.N.], 2018f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto**. Rio de Janeiro: [S.N.], 2018g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: [S.N.], 2005.

ASTM C – 289/07: **Standard Test Method for Potential AlkaliSilica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)**. Philadelphia, 2007.

ASTM C – 1260/07: **Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)**. Philadelphia, 2007.

BALDIN, Claudia Regina Bernardi; PEREIRA FILHO, José Ilo; BALDIN, Vitor. **Estudo da influência da substituição do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha na fabricação de placas de fibrocimento**. Matéria (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 26, n. 1, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1214>.

BONATO, Luciano Cezar. **REAÇÃO ALCALI-AGREGADO, PRINCIPAIS CAUSAS E ESTUDO DE REATIVIDADE POTENCIAL**. 2015. 69 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

BOUZABATA, H.; MULTON, S.; SELIER, A.; HOUARI, H. **Swellings due to alkalisilica reaction and delayed ettringite formation: Characterisation of expansion isotropy and effect of moisture conditions**. Cement and Concrete Composites, 2012, 34 (3), pp.349–356.

BROWN, East W.. **PORE REDUCING TECHNOLOGY FOR Publication Classification CONCRETE**. Titular: United States Patent. US n. US 2008/0163797 A1. Depósito: 14 jun. 2006. Concessão: 10 jul. 2008.

BROWN, Paul W.. **METHODS OF REDUCING HYDROXYL IONS FOREIGN PATENT DOCUMENTS IN CONCRETE PORE SOLUTIONS**. Titular: United States Patent. US n. US 7,608,143 B2. Depósito: 21 jun. 2005. Concessão: 27 out. 2009.

COMMITTEE ON MATERIALS FOR CONCRETE DAMS – CIGB/ICOLD. **Alkali-aggregate reaction in concrete dams: review and recommendations**. Paris: Imprimerie de Montligeon, 1991. 158 p. (Bulletin 79).

CONGRESSO ANUAL DA ABM, 72., 2017, São Paulo. **ANÁLISE MICROESTRUTURAL ENTRE O CONCRETO GEOPOLIMÉRICO E O CONCRETO PORTLAND**. São Paulo: Aaaa, 2017.

COSTA, Leonardo Martins. **INFLUÊNCIA DA POZOLANICIDADE NA ATIVAÇÃO ALCALINA**. 2020. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

COUTO, Tiago Andrade. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**: estudo do fenômeno em rochas silicosas. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

DATIQUIM. **Silicato - Siliethyl TS28**. Disponível em: <https://www.datiquim.com.br/produtos/silicatos/siliethyl-ts28>. Acesso em: 02 fev. 2023.

DATIQUIM. **Silicato - Siliethyl TS40**. Disponível em: <https://www.datiquim.com.br/produtos/silicatos/siliethyl-ts40>. Acesso em: 02 fev. 2023.

DESCHENES, Dean Joseph. **ASR/DEF-DAMAGED BENT CAPS**: shear tests and field implications. 295 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engineering, The University Of Texas At Austin, Austin, 2009.

DIAMOND, S. **A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms – 1: alkalis in cements and in concrete pore solutions**. Cement and Concrete Research, v.5, p. 329-345, 1975.

DIAMOND, S. **Unique response of LiNO<sub>3</sub> as an alkali silica reaction-preventive admixture**. Cement and Concrete Research. Vol. 29, pp. 1271-1275. 1999.

DORIA, Mariana Rezende. **ATIVAÇÃO ALCALI-SÍLICA POR APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS E PASSIVAÇÃO DE AGREGADO REATIVO POR TRATAMENTO COM NITRATO DE LÍTIU**. 2020. 94 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.

DUART, Marcelo Adriano. **ESTUDO DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ RESIDUAL SEM BENEFICIAMENTO**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

DUTRA, Alexander Ian Ferreira. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE AGREGADOS DA REGIÃO SUDOESTE DO RIO GRANDE DO SUL FRENTE A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND**. 2018. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018.

DUTRA, Alexander Ian Ferreira; VENQUIARUTO, Simone Dornelles; TEMP, Aldo Leonel. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: ESTUDO COMPARATIVO DE AGREGADOS DA FRONTEIRA OESTE DO RIO GRANDE DO SUL, FRENTE A UTILIZAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND: CPV ARI**. Ijuí. nov. 2017.

ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 27., 2019, Ponta Grossa. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO – TÉCNICAS UTILIZADAS PARA CARACTERIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE PRODUTOS FORMADOS**. Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2019. Disponível em: [https://siseve.apps.uepg.br/storage/EAIC2019/8\\_Matheus\\_Villian\\_Valenga-156841866792292.pdf](https://siseve.apps.uepg.br/storage/EAIC2019/8_Matheus_Villian_Valenga-156841866792292.pdf). Acesso em: 17 maio 2023.

FERRO, Ivan Passuelo. **OCORRÊNCIA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM BLOCOS DE CONCRETO DE FUNDAÇÕES NA CIDADE DO RECIFE-PE**. 2015. 79 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba, Piracicaba, 2015.

FLORINDO, Renata Nobrega. **ESTUDO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA EM CONCRETOS ATRAVÉS DE RESSONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR DE ALTA RESOLUÇÃO**. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade de Sao Paulo, São Carlos, 2009.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. A. **Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications**. Canadian Journal of Civil Engineering, 27, p.167- 191, 2000.

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

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

GOBI, Camila Marçal. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE NANO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> NA REATIVIDADE DE AGREGADOS EM ARGAMASSAS E CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND**. 2017. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

GOMES, E. A. O. **Recuperação estrutural de blocos de fundação afetados pela reação álcali-agregado - a experiência do Recife**. 2008. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

HASPARYK, Nicole Pagan. **INVESTIGAÇÃO DE CONCRETOS AFETADOS PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E CARACTERIZAÇÃO AVANÇADA DO GEL EXSUDADO**. 326 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P.; GOMIDES, M. J.; ANDRADE, M. A. S.; SILVA, H. H. A. B.; CARASEK, H. **Estudo em laboratório de concretos contendo agregados com sulfetos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. Anais... São Paulo:IBRACON, 2005.

FOURNIER, Benoit; BÉRUBÉ, Marc-André. **Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications**. Canadian Journal Of Civil Engineering, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 167-191, 1 abr. 2000. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/l99-072>.

HOBBS, D. W. **Alkali-silica reaction in concrete**. London: Thomas Telford, 1988. 183p.

HOLANDA, Raphael *et al.* **Reatividade Álcali-Agregado (RAA): O câncer do concreto.** 2019. Disponível em: <https://www.atecnologiadoconcreto.com.br/raa-o-cancer-do-concreto/>. Acesso em: 06 jun. 2023.

INTERNATIONAL CENTER FOR AGGREGATES RESEARCH, 2006, Austin. **Test Methods for Evaluating Preventive Measures for Controlling Expansion due to Alkali-Silica Reaction in Concrete.** Austin, 2006. 62 p. Disponível em: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/35368/302-1.pdf?sequence=2>. Acesso em: 17 maio 2023.

KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993. São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP, 1993. v. 1, p. 319-337.

LANGARO, Eloise Aparecida. **ESTUDO DE DIAGNÓSTICO E INIBIÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA UTILIZANDO CINZA VOLANTE E PROTEÇÃO DE SUPERFÍCIE COM SILICATOS.** 2023. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

LANGARO, Eloise Aparecida; SANTOS, Cleberson Adorno dos; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; JESUS, Diego Souza de; PEREIRA, Eduardo. Rice husk ash as supplementary cementing material to inhibit the alkali-silica reaction in mortars. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 14, n. 4, maio 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952021000400004>.

LIMA, Thamires Ohana Coelho; OLIVEIRA, Rosane Maria Pessoa Betânio. **REAÇÕES EXPANSIVAS EM CONCRETOS COM AGREGADOS MINERAIS: UMA REVISÃO.** *Perspectivas da Ciência e Tecnologia*, São Cristóvão, v. 12, p. 165-187, nov. 2020.

LUCCA, Ana Carolina Kamura de. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: EFEITO DO USO DE CINZA VOLANTE.** 2010. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MACHADO, Ioná Macedo Leonardo. **AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DE CASCAS CERÂMICAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE MOLDES PARA O PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA.** 2005. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MACIOSKI, Gustavo *et al.* Reações expansivas em barragens de concreto causadas por agregados reativos. **Concreto & Construções**, [S.L.], v. , n. 109, p. 56-62, 2023. Editora Cubo.

MAGRI, Carlos Henrique Ribeiro; BERTON, Rhanna. **EFEITO DA REDUÇÃO DO TEOR DE CIMENTO NO DESEMPENHO DE MATRIZES E COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.** 2016. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MARTINS, Monalisa Coelho; MEDEIROS, Marcelo H. F.. Estudo do efeito do sulfato de amônio na corrosão do concreto armado por meio de técnicas eletroquímicas. **Espaço Energia**, Curitiba, n. 37, p. 20-27, out. 2022. Disponível em: <http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/37/EE037-07-05.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2023.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **CONCRETO: MICROESTRUTURA, PROPRIEDADES E MATERIAIS**. 2. ed. Ibracon, 2014.

MIZUMOTO, Camilo. **Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em Testemunhos de Concreto e Agregados Constituintes**. 2009. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MUNHOZ, Guilherme da Silva. **EFEITO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE ARGAMASSAS NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

NOGUEIRA, Kelso Antunes. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: DIRETRIZES E REQUISITOS DA ABNT NBR 15577/2008**. 2010. 93 f. Monografia (Especialização) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

OLINQUEVICZ, Gustavo *et al.* **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA) E SEUS EFEITOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO**. União da Vitória, 2016.

OLIVEIRA, R. A. **O Colapso do edifício areia branca e os novos conceitos de vistorias de edifícios**. Revista IBRACON, São Paulo, v. 46, n. 2, p. 18-21, 2007.

PAULON, A. W. **Reações Álcali-Agregado em Concreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. 1981.

PECCHIO, M.; KIHARA Y.; BATTAGIN A. F.; ANDRADE T. **Produtos da Reação Álcali-Silicato em Concretos de Edificações da Região do Grande Recife - PE**. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006. Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

POOLE, A. B. **Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete**. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

SABBAG, Anderson Finamore. **VERIFICAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO NO CONCRETO DA UHE DE MASCARENHAS**. 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SANTOS, Altair. **Reação Álcali-Agregado: 60% das obras não previnem patologia. 60% das obras não previnem patologia**. 2019. Disponível em:

<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/reacao-alkali-agregado-60-das-obras-nao-previnem-patologia/>. Acesso em: 06 jun. 2023.

SANTOS, Angelica Sousa dos; MORAIS, Tereza Rachel Coelho. **ESTUDO COMPARATIVO DA POTENCIALIDADE REATIVA DOS AGREGADOS COLETADOS EM DIFERENTES JAZIDAS LOCALIZADAS NA REGIÃO DE SÃO PAULO**. 2021. 88 f. Monografia (Especialização) - Curso de Patologia das Obras Civas, Instituto Idd, São Paulo, 2021.

SILVA, C. M. **Estudo da potencialidade de compostos a base de silanos no combate da reação álcali-agregado**. 2009. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SILVA, C. S. *et al.* **Procedimentos de recuperações em elementos de fundações por problemas de reação álcali agregado**. Investigação documental. Alconpat, v. 11, n. 2, p. 124-145, maio 2021.

SILVA, Felipe Krauss de Souza e. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE CONCRETO**: avaliação de agregados gnáissicos provenientes do município de varginha. 2019. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário do Sul de Minas – Unis Mg, Varginha, 2019.

SILVA, Fernanda Giannotti da; LIBORIO, Jefferson B. L.. **Durabilidade do concreto de alto desempenho com sílica de Fe-Si ou silício metálico em ambientes marinhos**. São Carlos: Universidade Federal do Rio Grande, 2005.

SILVA, P.N. **Reação Álcali-agregado nas Usinas Hidrelétrica do Complexo Paulo Afonso/Chesf**. Influência da reação nas propriedades do concreto. São Paulo, 2007. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-26032009-113640/publico/Dissertacao\\_Patricia\\_Neves\\_Silva.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-26032009-113640/publico/Dissertacao_Patricia_Neves_Silva.pdf). Acesso em: 30 jan. 2023.

SIMS, Ian; POOLE, Alan. **Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: a world review**. Londres: Crc Press, 2017. 805 p.

STANTON, T. E. **Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate**. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, New York, v. 66, n. 10, p. 1781-1811, 1940.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TUTHILL, L.H. Alkali-silica reaction – 40 years later. **Concrete International**, v. 4, n. 4, p.32-36, 1982.

## APÊNDICE

As tabelas 6, 8, 10, 12, 14, 16 e 18 mostram os resultados das expansões dos corpos de prova dos ensaios acelerados de barras de argamassa. O desvio relativo máximo (DRM), representado nas tabelas 7, 9, 11, 13, 15, 17 e 19 foi calculado para cada valor de expansão conforme especificado na NBR 15577-4 (ABNT, 2018d). Os valores em negrito foram excluídos da média de cálculo devido à não conformidade com o requisito de DRM estabelecido (até 40% da expansão média dos corpos de prova).

Tabela 6 - Expansão das barras de argamassa de referência

CP/Dia	Referência								
	Expansão (%)								
	0 (2)	7	10	14	16	21	25	28	30
CP 1	0,000	<b>-0,079</b>	<b>-0,028</b>	<b>0,014</b>	<b>0,056</b>	<b>0,065</b>	<b>0,098</b>	<b>0,126</b>	<b>0,134</b>
CP 2	0,000	0,040	0,094	0,116	0,160	0,182	0,208	0,236	0,244
CP 3	0,000	0,024	0,063	0,108	0,165	0,160	0,187	0,217	0,222
Média	0,000	0,032	0,079	0,112	0,163	0,171	0,197	0,227	0,233

Tabela 7 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa de referência

CP/Dia	Referência								
	DMR (%)								
	7	10	14	16	21	25	28	30	
CP 1	<b>346,0</b>	<b>135,1</b>	<b>87,8</b>	<b>65,4</b>	<b>61,9</b>	<b>50,6</b>	<b>44,4</b>	<b>42,4</b>	
CP 2	-24,2	-20,1	-3,4	1,5	-6,5	-5,4	-4,3	-4,6	
CP 3	24,2	20,1	3,4	-1,5	6,5	5,4	4,3	4,6	

Tabela 8 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS28

CP/Dia	TS 28 1%								
	Expansão (%)								
	0 (2)	7	10	14	16	21	25	28	30
CP 1	0,000	0,070	0,122	0,153	0,202	0,201	0,223	0,257	0,256
CP 2	0,000	0,047	0,080	0,125	0,128	0,170	0,189	0,212	0,218
CP 3	0,000	<b>0,015</b>	<b>0,052</b>	0,102	0,104	0,131	0,160	0,182	0,187
CP 4	0,000	0,066	0,110	0,162	0,147	0,187	0,226	0,314	0,252
Média	0,000	0,061	0,104	0,135	0,145	0,172	0,200	0,241	0,228

Tabela 9 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS28

CP/Dia	TS 28 1%								
	DMR (%)								
	7	10	14	16	21	25	28	30	
CP 1	-14,0	-16,9	-13,1	-39,4	-16,8	-11,9	-6,5	-12,1	
CP 2	22,7	22,7	7,8	11,8	1,6	5,2	12,3	4,4	
CP 3	<b>75,1</b>	<b>50,0</b>	25,0	28,7	23,9	20,0	24,4	17,9	
CP 4	-8,7	-5,8	-19,6	-1,1	-8,6	-13,3	-30,2	-10,3	

Tabela 10 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS28

TS 28 5%									
CP/Dia	Expansão (%)								
	0 (2)	7	10	14	16	21	25	28	30
CP 1	0,000	<b>0,096</b>	0,134	0,143	0,162	0,185	0,205	0,222	0,224
CP 2	0,000	0,056	0,095	0,116	0,110	0,153	0,178	0,212	0,202
CP 3	0,000	0,056	0,089	0,115	0,118	0,152	0,182	0,195	0,199
CP 4	0,000	0,047	0,078	0,111	0,111	0,148	0,174	0,184	0,192
Média	0,000	0,053	0,099	0,121	0,125	0,160	0,185	0,203	0,204

Tabela 11 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS28

TS 28 5%									
CP/Dia	DMR (%)								
	7	10	14	16	21	25	28	30	
CP 1	<b>-82,1</b>	-35,2	-18,1	-29,2	-15,8	-11,1	-9,4	-9,4	
CP 2	-5,0	4,3	4,4	11,8	4,3	3,8	-4,1	1,1	
CP 3	-5,8	10,0	5,0	6,0	4,5	1,2	4,1	2,5	
CP 4	10,8	20,9	8,7	11,4	7,0	6,0	9,4	5,8	

Tabela 12 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS28

TS 28 10%									
CP/Dia	Expansão (%)								
	0 (2)	7	10	14	16	21	25	28	30
CP 1	0,000	0,053	0,079	0,112	0,118	0,144	0,168	0,185	0,179
CP 2	0,000	<b>-0,006</b>	0,062	0,097	0,069	<b>0,069</b>	<b>0,076</b>	<b>0,093</b>	<b>0,105</b>
CP 3	0,000	0,045	<b>0,107</b>	0,105	0,091	0,168	0,184	0,158	0,164
Média	0,000	0,049	0,071	0,105	0,093	0,156	0,176	0,171	0,172

Tabela 13 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS28

TS 28 10%									
CP/Dia	DMR (%)								
	7	10	14	16	21	25	28	30	
CP 1	-8,6	-12,2	-7,3	-27,1	7,9	4,5	-7,9	-4,3	
CP 2	<b>113,1</b>	12,2	7,6	25,2	<b>55,6</b>	<b>56,8</b>	<b>45,6</b>	<b>38,8</b>	
CP 3	8,6	<b>-51,8</b>	-0,4	1,9	-7,9	-4,5	7,9	4,3	

Tabela 14 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS40

TS 40 1%									
CP/Dia	Expansão (%)								
	0 (2)	7	10	14	16	21	25	28	30
CP 1	0,000	0,066	0,076	0,114	0,121	0,172	0,199	0,209	0,228
CP 2	0,000	0,081	0,072	0,120	0,123	0,165	0,195	0,202	0,224
CP 3	0,000	0,081	0,079	0,115	0,124	0,176	0,196	0,210	0,229
CP 4	0,000	0,069	0,088	0,117	0,116	0,183	0,196	0,201	0,228
Média	0,000	0,074	0,079	0,117	0,121	0,174	0,197	0,206	0,227

Tabela 15 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS40

TS 40 1%								
CP/Dia	DMR (%)							
	7	10	14	16	21	25	28	30
CP 1	11,3	3,2	2,2	-0,2	1,0	-1,3	-1,8	-11,6
CP 2	-9,1	8,7	-3,3	-1,5	5,2	0,7	1,8	-9,8
CP 3	-9,1	-0,4	1,5	-2,1	-1,0	0,3	-2,1	-12,0
CP 4	7,0	-11,5	-0,5	3,8	-5,2	0,3	2,1	-11,8

Tabela 16 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS40

TS 40 5%									
CP/Dia	Expansão (%)								
	0 (2)	7	10	14	16	21	25	28	30
CP 1	0,000	0,083	0,086	0,114	0,126	0,170	0,192	0,217	0,226
CP 2	0,000	0,064	0,083	0,108	0,108	0,157	0,179	0,190	0,206
CP 3	0,000	0,065	0,069	0,108	0,113	0,152	0,182	0,193	0,209
CP 4	0,000	0,057	0,075	0,106	0,098	0,147	0,174	0,183	0,198
Média	0,000	0,067	0,078	0,109	0,111	0,157	0,182	0,196	0,210

Tabela 17 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS40

TS 40 5%								
CP/Dia	DMR (%)							
	7	10	14	16	21	25	28	30
CP 1	-22,8	-9,5	-5,1	-13,7	-8,4	-5,5	-10,9	-7,9
CP 2	4,5	-6,4	1,2	2,9	-0,4	1,3	2,8	1,7
CP 3	3,3	12,0	0,8	-1,4	2,6	0,0	1,5	0,3
CP 4	15,1	3,8	3,0	12,2	6,2	4,2	6,6	5,9

Tabela 18 - Expansão das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS40

TS 40 10%									
CP/Dia	Expansão (%)								
	0 (2)	7	10	14	16	21	25	28	30
CP 1	0,000	0,040	0,075	0,093	0,092	0,138	0,140	0,144	0,155
CP 2	0,000	0,053	0,071	0,105	0,101	0,129	0,150	0,166	0,168
CP 3	0,000	0,062	0,064	0,098	0,089	0,123	0,141	0,152	0,152
Média	0,000	0,052	0,070	0,099	0,094	0,130	0,144	0,154	0,158

Tabela 19 - Desvio máximo relativo das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS40

TS 40 10%								
CP/Dia	DMR (%)							
	7	10	14	16	21	25	28	30
CP 1	21,9	-6,9	5,4	2,0	-6,2	2,6	6,2	1,9
CP 2	-2,8	-1,1	-6,4	-7,4	0,8	-4,6	-7,5	-5,9
CP 3	-19,1	8,0	0,9	5,4	5,4	2,0	1,3	4,0

As Tabelas 20 a 26 mostram os resultados das massas das barras de argamassa, medidas ao longo do tempo do ensaio de expansão de barras de argamassa pelo método acelerado.

Tabela 20 - Massa das barras de argamassa de referência

Referência						
Massa (g)						
CP/DIA	0 (2)	7,0	16,0	21,0	28,0	30,0
1,0	405,6	407,9	411,5	411,2	413,5	413,5
2,0	417,8	420,3	422,7	423,8	426,0	426,4
3,0	418,9	421,2	424,1	425,7	427,2	427,6
Média	414,1	416,5	419,4	420,2	422,2	422,5
Desvio padrão	7,4	7,4	6,9	7,9	7,6	7,8

Tabela 21 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS28

TS 28 1%						
Massa (g)						
CP/DIA	0 (2)	7,0	16,0	21,0	28,0	30,0
1,0	413,0	415,7	418,6	420,1	421,5	421,8
2,0	396,3	399,6	402,4	403,6	405,2	405,6
3,0	398,4	401,7	404,6	405,4	407,4	407,9
4,0	406,0	409,7	412,7	413,9	415,5	415,7
Média	403,4	406,7	409,6	410,8	412,4	412,8
Desvio padrão	7,6	7,4	7,5	7,7	7,5	7,4

Tabela 22 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS28

TS 28 5%						
Massa (g)						
CP/DIA	0 (2)	7,0	16,0	21,0	28,0	30,0
1,0	400,4	402,6	405,2	406,3	407,4	407,6
2,0	415,3	419,0	421,6	422,9	424,2	424,9
3,0	421,5	424,8	427,5	428,7	429,0	430,1
4,0	411,5	414,7	417,0	418,0	418,7	419,6
Média	412,2	415,3	417,8	419,0	419,8	420,6
Desvio padrão	8,9	9,4	9,5	9,5	9,3	9,6

Tabela 23 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS28

TS 28 10%						
Massa (g)						
CP/DIA	0 (2)	7,0	16,0	21,0	28,0	30,0
1,0	416,2	419,3	422,6	423,4	424,7	424,8
2,0	404,7	408,3	411,4	412,3	413,6	413,6
3,0	424,8	428,1	431,4	433,2	433,2	433,0
Média	415,2	418,6	421,8	423,0	423,8	423,8
Desvio padrão	10,1	9,9	10,0	10,5	9,8	9,7

Tabela 24 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 1% de TS40

TS 40 1%						
Massa (g)						
CP/DIA	0 (2)	7,0	16,0	21,0	28,0	30,0
1,0	407,6	409,2	412,5	413,7	414,6	415,5
2,0	405,0	406,8	409,9	411,4	412,2	413,3
3,0	409,7	411,6	414,7	416,2	417,5	418,1
4,0	407,1	408,9	411,8	413,2	414,7	415,0
Média	407,3	409,1	412,2	413,6	414,8	415,5
Desvio padrão	1,9	2,0	2,0	2,0	2,2	2,0

Tabela 25 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 5% de TS40

TS 40 5%						
Massa (g)						
CP/DIA	0 (2)	7,0	16,0	21,0	28,0	30,0
1,0	414,3	417,0	419,9	421,2	422,6	423,0
2,0	414,6	417,4	420,3	421,6	422,9	423,4
3,0	418,9	421,4	424,2	425,8	426,8	427,3
4,0	419,7	423,0	426,0	427,2	428,8	428,9
Média	416,9	419,7	422,6	424,0	425,3	425,7
Desvio padrão	2,8	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9

Tabela 26 - Massa das barras de argamassa com incorporação de 10% de TS40

TS 40 10%						
Massa (g)						
CP/DIA	0 (2)	7,0	16,0	21,0	28,0	30,0
1,0	407,4	411,8	414,3	415,6	416,2	417,4
2,0	422,0	426,4	429,0	430,3	431,7	432,4
3,0	407,1	411,3	414,0	415,0	416,4	417,1
Média	412,2	416,5	419,1	420,3	421,4	422,3
Desvio padrão	8,5	8,6	8,6	8,7	8,9	8,7