

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELOISE APARECIDA LANGARO

ESTUDO DE DIAGNÓSTICO E INIBIÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA  
UTILIZANDO CINZA VOLANTE E PROTEÇÃO DE SUPERFÍCIE COM  
SILICATOS

CURITIBA  
2023

ELOISE APARECIDA LANGARO

ESTUDO DE DIAGNÓSTICO E INIBIÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA  
UTILIZANDO CINZA VOLANTE E PROTEÇÃO DE SUPERFÍCIE COM  
SILICATOS

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Área de concentração em Materiais e Estruturas, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Pieralisi

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Langaro, Eloise Aparecida

Estudo de diagnóstico e inibição da reação álcali-sílica utilizando cinza volante e proteção de superfície com silicatos. / Eloise Aparecida Langaro.  
– Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros.  
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Peralisi.

1. Cinza volante. 2. Modelos matemáticos. 3. Superfícies. I. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. II. Peralisi, Ricardo. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ELOISE APARECIDA LANGARO** intitulada: **ESTUDO DE DIAGNÓSTICO E INIBIÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA UTILIZANDO CINZA VOLANTE E PROTEÇÃO DE SUPERFÍCIE COM SILICATOS**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 03 de Março de 2023.

Assinatura Eletrônica  
06/03/2023 14:54:18.0  
MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
06/03/2023 12:16:59.0  
ANTÔNIO ACACIO DE MELO NETO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ )

Assinatura Eletrônica  
06/03/2023 11:44:30.0  
SELMO KUPERMAN  
Avaliador Externo (DESEK)

Assinatura Eletrônica  
07/03/2023 14:59:52.0  
ALUIZIO CALDAS E SILVA  
Avaliador Externo (COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO)

## **AGRADECIMENTOS**

Um agradecimento especial ao meu orientador Professor Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros, por toda a paciência, dedicação e conhecimento repassados ao longo destes anos, além de toda a confiança que sempre depositou no meu trabalho. Sou muito grata pela oportunidade de ter sido orientada por um grande mestre.

Gostaria de agradecer também o meu coorientador, Prof. Dr. Ricardo Pieralisi, que por horas intermináveis me acompanhou nos ensaios no laboratório em meio a uma pandemia. Obrigado pelo conhecimento compartilhado.

Ao meu amor, Leonardo, que comprou este desafio comigo desde o início, se doando sem precedentes, abdicando de uma estabilidade para viajar mais de 350 km durante 5 anos para estar sempre por perto me apoiando. Muito obrigado por tudo, sem seu apoio e amor eu não teria chegado onde estou.

Aos meus pais, Moacir e Denilde, que sempre foram os meus maiores incentivadores e nunca mediram esforços para me deixar voar, me amando incondicionalmente. Obrigado pai e mãe por serem quem são e por todos os ensinamentos ao longo desta vida.

Ao meu irmão Ricardo que sempre me deu suporte e me ajudou a resolver problemas da minha pesquisa que eu não conseguia sozinha. Obrigado pelas vídeos chamadas, pelas aulas e por toda a paciência.

A UFPR pelo ensino gratuito e de qualidade, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e todos os Professores, e a Capes pelo auxílio financeiro. Agradeço também a todos os amigos que fiz durante estes anos do doutorado. Obrigado a cada um pela troca de experiências e companheirismo. Em especial agradeço às meninas da sala do doutorado, vocês foram essenciais nesta caminhada, obrigada a cada uma de vocês por todo o carinho desde sempre. Tenho certeza que fiz grandes amigas neste período e que nos encontraremos muitas vezes nesta vida.

Aos alunos de iniciação científica, Thaislaine e Alessandro. Vocês fizeram os dias difíceis de moldagens e ensaios durante a pandemia, dias mais leves.

Agradeço também aos técnicos do laboratório de Materiais e Estruturas da UFPR, que sempre me auxiliaram nos desafios encontrados no laboratório. Também ao Professor Juarez Hoppe Filho por ter me auxiliado em diversas vezes no laboratório com ensaios e seu conhecimento.

Quero agradecer ainda algumas pessoas especiais que passaram no meu caminho e que permanecem até hoje, a Giovana, a Andressa e a Monalisa. Três

mulheres fortes que se tornaram mais que amigas neste período. Vocês tornaram o caminhar mais leve, obrigada por tudo.

As minhas grandes amigas de vida, Liciane, Aline, Ana Claudia e Gabriela, que mesmo longe sempre se fizeram presentes. A distância foi só um obstáculo que tornou nossos laços mais fortes. Obrigada por todo o incentivo, amor e carinho que vocês têm por mim.

E por fim, agradeço aos amigos que fiz na UEPG, que me receberam de braços abertos e me apoiaram no fim desta jornada.

## RESUMO

A reação álcali-silica (RAS) é um dos principais processos deletérios que afetam as estruturas de concreto em todo o mundo. Quando se trata de durabilidade de obras de grande porte, como usinas hidrelétricas, prever o desempenho dos agregados e materiais ao longo de sua vida útil se torna fator importante. Entretanto, os testes de laboratório ainda não conseguem simular de forma efetiva o comportamento e o desenvolvimento da RAS em campo. Visando contribuir no diagnóstico e controle da reação álcali-silica, esta pesquisa pretendeu avaliar o uso de duas ferramentas de diagnóstico e prognóstico da reação, *Stiffness Damage Test* (SDT) e *Damage Rating Index* (DRI), frente ao uso de concretos contendo agregados reativos, cinza volante e tratamentos de superfície a base de silicato de etila. Numa segunda etapa da pesquisa, os dados gerados em laboratório tiveram por objetivo calibrar e contribuir para a validação de um modelo matemático analítico. Um estudo preliminar de reatividade de quatro diferentes agregados foi conduzido, utilizando diferentes ensaios de expansão preconizados pela NBR 15577 (2018), em concretos e argamassas, a fim de determinar o potencial reativo destes agregados. Os resultados deste primeiro estudo apontaram discrepâncias entre as classificações obtidas no ensaio em barras de argamassa e concreto, indicando que o ensaio de barras de argamassa, deve ser utilizado apenas como balizador. Em seguida foram confeccionados concretos com substituição parcial do cimento por cinza volante (35% e 50%). Também foram moldados concretos nos quais foram aplicados dois tipos de tratamento de superfície a base de silicato de etila (TS28 e TS40). Todos os concretos foram confeccionados utilizando dois tipos de agregados com potencial reativo e submetidos a uma câmara para aceleração da reação álcali-silica. Foram realizados ensaios de expansão, resistência à compressão, SDT, módulo de elasticidade e DRI, além dos ensaios de ângulo de contato e capilaridade nos concretos onde foram aplicados os tratamentos de superfície. Além destes, foram realizados ensaios microestruturais em pastas de cimento a fim de avaliar a interação dos tratamentos de superfície com a matriz de cimento. Os resultados mostraram que ambas as ferramentas utilizadas (SDT e DRI) se mostraram satisfatórias para avaliar o dano causado devido à reação álcali-silica. Além disso, observou-se que os mecanismos de desenvolvimento dos danos causados pela RAS são semelhantes em concretos com ou sem adição da cinza volante, como também naqueles onde os tratamentos foram aplicados. Entretanto, os diferentes materiais (tratamentos e cinza volante) retardaram o desencadeamento da reação deletéria, bem como, modificaram a cinética de desenvolvimento da RAS e formação do gel. Por fim, observou-se que há um efeito escala associado ao tamanho/formato dos corpos de prova quando submetidos ao ensaio de expansão.

**Palavras-chave:** cinza volante; tratamento de superfície; TEOS; modelo matemático analítico; agregados reativos.

## ABSTRACT

Alkali-silica reaction (ASR) is one of the main deleterious processes that affect concrete structures worldwide. Due to the durability of large concrete structures, such as hydroelectric power plants, it is important to predict the performance of aggregates and materials over their useful life. However, laboratory tests still cannot effectively perform the behavior and development of ASR in the field. Aiming to contribute to the control and diagnosis of the alkali-silica reaction, this research aimed to evaluate the use of two diagnostic and prognostic techniques, the Stiffness Damage Test (SDT) and the Damage Rating Index (DRI), for concretes containing reactive aggregates, fly ash, and ethyl silicate surface treatments. In the second stage of the research, the laboratory results aimed to calibrate and contribute to the validation of a mathematical and analytical model. First, to determine the reactivity of four different aggregates, expansion tests were carried out in mortars and concrete using the standard ABNT NBR 15577 (2018). The results obtained in this first study showed divergence between the classifications obtained in the mortar bars test and concrete test, shows that the mortar bars test should only be used as an indication. Concretes with partial cement replacement of fly ash (35% and 50%) were developed. Also, concretes with two types of surface treatment based on ethyl silicate were manufactured (TS28 and TS40). All concretes were manufactured using two potential reactive aggregates and submitted to ASR-induced expansion. Expansion tests, compressive strength, SDT, elastic modulus and DRI tests were carried out. In addition, contact angle and capillarity tests were realized on concretes with surface treatments. Microstructural tests were also carried out on cement pastes to evaluate the interaction of surface treatments with the cement matrix composites. The results showed that SDT and DRI tools were appropriate to evaluate the of ASR damage. Besides, it was observed that the ASR damage mechanisms are similar in concrete with or without fly ash, as well as in those where the surface treatments were applied. However, the different materials (surface treatments and fly ash) delayed the ASR progress, as well as modified the ASR-gel kinetics and formation. Finally, the expansion test showed that there is a scale effect related to the size/shape of specimens.

**Keywords:** fly ash; surface treatment; TEOS; analytical mathematical model; reactive aggregates.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Resultado da avaliação da reatividade de agregados enviados para a ABCP por diferentes segmentos da construção civil . . .	22
FIGURA 1.2 – Estrutura da Tese . . . . .	26
FIGURA 2.1 – Esquema da reação álcali-sílica . . . . .	29
FIGURA 2.2 – Representação esquemática de materiais com similar porosidade: (a) alta permeabilidade - poros capilares interconectados, (b) baixa permeabilidade e poros capilares parcialmente conectados	35
FIGURA 2.3 – Esquema e descrição dos diferentes tipos de tratamentos de superfície . . . . .	37
FIGURA 2.4 – Comparação entre o tamanho das moléculas . . . . .	38
FIGURA 2.5 – Imagem representativa da técnica de DRI mostrando algumas das características petrográficas que podem ser encontradas . .	43
FIGURA 2.6 – Modelo qualitativo do dano devido a RAA versus níveis de expansão	44
FIGURA 2.7 – Determinação do SDI e PDI com base nas respostas do SDT . .	46
FIGURA 3.1 – Artigos publicados em periódicos entre os anos de 2000 e abril de 2022 relacionados a RAS e ao uso dos ensaios AMBT (em argamassa), CPT e ACPT (em concreto) e artigos que comparam o ensaio em argamassa com ensaios em concreto . . . . .	51
FIGURA 3.2 – Artigos publicados em periódicos entre os anos de 2000 e abril de 2022 sobre o uso dos métodos AMBT e CPT para a investigação da reatividade de agregados e para o uso de materiais mitigadores	52
FIGURA 3.3 – Agregados utilizados . . . . .	55
FIGURA 3.4 – Média das expansões das argamassas ao longo do tempo - ensaio AMBT de acordo com a NBR 15577-4 (2018) . . . . .	59
FIGURA 3.5 – Média das expansões dos concretos ao longo do tempo - ensaio ABCPT (T=80 °C) . . . . .	59
FIGURA 3.6 – Média das expansões dos concretos ao longo do tempo - ensaio ACPT (T=60°C) de acordo com a NBR 15577-7 (2018) . . . . .	60
FIGURA 3.7 – Média das expansões dos concretos ao longo do tempo - ensaio CPT (T=38°C) de acordo com a NBR 15577-6 (2018) . . . . .	60
FIGURA 3.8 – Comparação entre as expansões médias obtidas nos ensaios CPT e AMBT . . . . .	62
FIGURA 3.9 – Comparação entre as expansões médias obtidas nos ensaios CPT e ABCPT . . . . .	62
FIGURA 3.10 – Comparação entre as expansões médias obtidas nos ensaios CPT e ACPT . . . . .	63

FIGURA 3.11 – Variação de massa das argamassas ao longo do tempo - ensaio AMBT de acordo com a NBR 15577-4 (2018) . . . . .	64
FIGURA 3.12 – Variação de massa dos concretos ao longo do tempo - ensaio ABCPT (T=80 °C) . . . . .	65
FIGURA 3.13 – Variação de massa dos concretos ao longo do tempo - ensaio CPT (T=60 °C) de acordo com a NBR 15577-7 (2018) . . . . .	65
FIGURA 3.14 – Variação de massa dos concretos ao longo do tempo - ensaio CPT (T=38 °C) de acordo com a NBR 15577-6 (2018) . . . . .	66
FIGURA 3.15 – Argamassas após término do ensaio AMBT . . . . .	67
FIGURA 3.16 – Concretos após término do ensaio ACPT e CPT . . . . .	67
FIGURA 4.1 – Artigos publicados com o tema reações deletérias no concreto e uso de ferramentas de diagnóstico e prognóstico . . . . .	71
FIGURA 4.2 – Resultados do ensaio Fratini para a referência (cimento Portland CPV) e misturas de cimento contendo cinza volante (35% e 50%)	75
FIGURA 4.3 – Difratograma da cinza volante . . . . .	76
FIGURA 4.4 – Curva granulométrica agregado miúdo . . . . .	77
FIGURA 4.5 – Expansão do agregado miúdo pelo método AMBT - NBR 15577-4	77
FIGURA 4.6 – Curva granulométrica dos agregados utilizados . . . . .	79
FIGURA 4.7 – Esquema de moldagem e avaliação dos corpos de prova . . . . .	79
FIGURA 4.8 – Corpos de prova contendo os pinos de expansão . . . . .	80
FIGURA 4.9 – Relógio comparador para medir expansão de corpos de prova cilíndricos . . . . .	81
FIGURA 4.10 – Ensaio de SDT - corpo de prova com extensômetro e gráfico gerado	82
FIGURA 4.11 – (A) Processo de polimento dos corpos de prova; (B) Corpo de prova após polimento . . . . .	83
FIGURA 4.12 – (A) Marcação dos corpos de prova; (B) Microscópio utilizado . . . . .	84
FIGURA 4.13 – Média das expansões dos corpos de prova de concreto ao longo do tempo . . . . .	85
FIGURA 4.14 – A - Corpos de prova de expansão (Agregado G1); B - Corpos de prova de expansão (Agregado G2), aos 365 dias de acompanhamento . . . . .	87
FIGURA 4.15 – Variação de massa dos concretos ao longo do tempo . . . . .	87
FIGURA 4.16 – Representação dos resultados de tensão-deformação dos corpos de prova REF-G1 aos 28, 91, 182 e 365 dias . . . . .	89
FIGURA 4.17 – Representação dos resultados de tensão-deformação dos corpos de prova REF-G2 aos 28, 91, 182 e 365 dias . . . . .	90
FIGURA 4.18 – Resultados do SDI dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança . . . . .	91

FIGURA 4.19 – Resultados do PDI dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança . . . . .	93
FIGURA 4.20 – Área de histerese - corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança . . . . .	95
FIGURA 4.21 – Evolução do DRI ao longo do tempo para todas as séries contendo os agregados G1 e G2 . . . . .	96
FIGURA 4.22 – Características petrográficas dos concretos contendo os agregados G1 e G2, analisados ao longo do tempo . . . . .	97
FIGURA 4.23 – Fissuras observadas nos agregados G1 e G2 . . . . .	98
FIGURA 4.24 – Imagem representativa do modelo qualitativo do dano devido a RAA contendo os dois tipos de fissuras tipicamente presentes no agregado - tipo A " <i>sharp</i> " e tipo B " <i>onion skin/echelon</i> " - e sua evolução de acordo com o nível de expansão . . . . .	99
FIGURA 4.25 – Características microscópicas das misturas (desconsiderando os fatores de ponderação) contendo os agregados G1 e G2 . . . . .	100
FIGURA 4.26 – Gel de RAS presente nos concretos de referência contendo o agregado G1 . . . . .	101
FIGURA 5.1 – Artigos publicados em periódicos entre os anos de 1990 a abril de 2022 - Uso de TEOS como tratamento de superfície no concreto	105
FIGURA 5.2 – Corpos de prova de pasta de cimento (1x1x1 cm) para investigar o efeito dos tratamentos com os produtos TS28 e TS40 . . . . .	108
FIGURA 5.3 – Esquema de moldagem e avaliação das pastas . . . . .	108
FIGURA 5.4 – Esquema de moldagem e avaliação dos corpos de prova destinados ao estudo do efeito dos tratamentos de superfície no ângulo de contato e na absorção de água por capilaridade do concreto	111
FIGURA 5.5 – Esquema de moldagem e avaliação dos corpos de prova - RAS	113
FIGURA 5.6 – (A) Absorção por imersão e (B) índice de vazios nas amostras com e sem tratamento de superfície . . . . .	114
FIGURA 5.7 – Amostra TS28 em pastas com 7, 182 e 365 dias mostrando a ocorrência dos produtos encontrados na matriz cimentícia . . . . .	116
FIGURA 5.8 – Amostra TS40 em pastas com 7, 182 e 365 dias mostrando a ocorrência dos produtos encontrados na matriz cimentícia . . . . .	116
FIGURA 5.9 – Estrutura molecular dos produtos utilizados como tratamento de superfície - TS28 e TS40 . . . . .	118
FIGURA 5.10 – Difração de raios X das pastas de referência aos 7, 182 e 365 dias	118
FIGURA 5.11 – Difração de raios X das pastas com tratamento (TS28) aos 7, 182 e 365 dias . . . . .	118

FIGURA 5.12 – Difração de raios X das pastas com tratamento (TS40) aos 7, 182 e 365 dias . . . . .	119
FIGURA 5.13 – Difrátogramas parciais, com ênfase na região de localização do principal pico da portlandita ( $34,2^\circ\theta$ ), das pastas de cimento de referência (REF) e com os tratamentos (TS28 e TS40), aos 7, 182 e 365 dias . . . . .	119
FIGURA 5.14 – Difrátogramas parciais, com ênfase na região de localização do principal pico da C-S-H ( $29,4^\circ\theta$ ), das pastas de cimento de referência (REF) e com os tratamentos (TS28 e TS40), aos 7, 182 e 365 dias . . . . .	120
FIGURA 5.15 – Termogravimetria das pastas de referência aos 7, 182 e 365 dias	121
FIGURA 5.16 – Termogravimetria das pastas com TS28 aos 7, 182 e 365 dias .	121
FIGURA 5.17 – Termogravimetria das pastas com TS40 aos 7, 182 e 365 dias .	121
FIGURA 5.18 – A - Absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) para concretos com e sem tratamento de superfície, B - Absortividade ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{1/2}$ ) para os concretos com tratamento de superfície . . . . .	123
FIGURA 5.19 – Interação entre a gota de água e a superfície de concreto com e sem tratamento, medição às 24h, 7 e 28 dias - após a aplicação do tratamento . . . . .	125
FIGURA 5.20 – Estrutura molecular dos tratamentos TS28 e TS40 mostrando a interação com o substrato . . . . .	126
FIGURA 5.21 – Média das expansões dos corpos de prova de concreto ao longo do tempo . . . . .	127
FIGURA 5.22 – Variação de massa dos concretos ao longo do tempo . . . . .	128
FIGURA 5.23 – Resultados do SDI dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança . . . . .	129
FIGURA 5.24 – Resultados do PDI dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança . . . . .	131
FIGURA 5.25 – Área de histerese - corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança . . . . .	133
FIGURA 5.26 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2 - resistência à compressão e módulo de elasticidade	134
FIGURA 5.27 – Análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, nas idades de 28 e 365 dias	135

FIGURA 5.28 – Evolução do DRI ao longo do tempo para todas as séries contendo os agregados G1 e G2 . . . . .	137
FIGURA 5.29 – Características petrográficas dos concretos contendo os agregados G1 e G2, analisados ao longo do tempo . . . . .	137
FIGURA 5.30 – Fissuras observadas nos agregados G1 aos 365 dias - análise microscópica . . . . .	138
FIGURA 5.31 – Fissuras observadas nos agregados G2 aos 365 dias - análise microscópica . . . . .	139
FIGURA 6.1 – Forma da curva devido à expansão induzida obtida a partir do modelo de Larive adaptado - níveis de expansão meramente ilustrativos . . . . .	144
FIGURA 6.2 – Coeficientes utilizados conforme o tipo e natureza/reactividade dos agregados utilizados . . . . .	150
FIGURA 6.3 – Modelo semi-empírico de Grazia <i>et al.</i> (2021) para o agregado G1	151
FIGURA 6.4 – Modelo semi-empírico de Grazia <i>et al.</i> (2021) para o agregado G2	152
FIGURA 6.5 – Curva ajustada agregado G1 . . . . .	155
FIGURA 6.6 – Curva ajustada agregado G2 . . . . .	156

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Limites de álcalis, estipulados internacionalmente, para controle da expansão devido o uso de agregados reativos . . . . .	31
TABELA 2.2 – Fatores de ponderação DRI . . . . .	42
TABELA 3.1 – Características físicas, químicas e requisitos exigidos pela NBR15577:2018 para o cimento . . . . .	54
TABELA 3.2 – Consumo de materiais para concreto ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) . . . . .	56
TABELA 3.3 – Classificação geral dos agregados conforme os ensaios realizados . . .	64
TABELA 4.1 – Ranqueamento dos artigos publicados em periódicos contendo o tema: uso de técnicas para diagnóstico e prognóstico de reações deletérias do concreto . . . . .	73
TABELA 4.2 – Análise química da cinza volante . . . . .	74
TABELA 4.3 – Resultados do ensaio Fratini aos 8 e 15 dias . . . . .	74
TABELA 4.4 – Caracterização do agregado miúdo . . . . .	76
TABELA 4.5 – Consumo de materiais para dosagem dos concretos em ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) . . . .	78
TABELA 5.1 – Características dos silicatos de etila . . . . .	107
TABELA 5.2 – Consumo de materiais para dosagem dos concretos em ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) e relação $a/c = 0,45$ . . . . .	110
TABELA 5.3 – Percentual dos elementos na formação dos compostos hidratados de etringita e hidróxido de cálcio . . . . .	117
TABELA 5.4 – Perda de massa das amostras em pasta com 7, 182 e 365 dias (TGA) .	122
TABELA 5.5 – Perda de massa das amostras em pasta com 7, 182 e 365 dias, corrigidas para base de não voláteis (TGA) . . . . .	122
TABELA 6.1 – Níveis de expansão de referência, tipo de agregado e coeficientes de natureza/reactividade . . . . .	146
TABELA 6.2 – Coeficientes determinados de acordo com a temperatura do ensaio . .	146
TABELA 6.3 – Coeficientes determinados de acordo com a umidade do ensaio . . . .	147
TABELA 6.4 – Coeficientes determinados de acordo com a quantidade de álcalis . . .	148
TABELA 6.5 – Coeficientes utilizados de acordo com a temperatura, umidade e quantidade de álcalis utilizada no ensaio . . . . .	151
TABELA 6.6 – Coeficientes A e C ajustados para o ensaio de prismas de concreto, conforme a classificação do agregado . . . . .	156
TABELA A.1 – Granulometria da areia utilizada . . . . .	183
TABELA A.2 – Determinação do volume de agregado graúdo ( $V_c$ ) . . . . .	184
TABELA A.3 – Consumo de agregado graúdo ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) . . . . .	184
TABELA B.1 – Expansão dos corpos de prova de argamassa com o agregado G1 . . .	186
TABELA B.2 – Desvio relativo máximo dos corpos de prova de argamassa com o agregado G1 . . . . .	186

TABELA B.3–Expansão dos corpos de prova de argamassa com o agregado G2 . . .	186
TABELA B.4–Desvio relativo máximo dos corpos de prova de argamassa com o agregado G2 . . . . .	187
TABELA B.5–Expansão dos corpos de prova de argamassa com o agregado B1 . . .	187
TABELA B.6–Desvio relativo máximo dos corpos de prova de argamassa com o agregado B1 . . . . .	187
TABELA B.7–Expansão dos corpos de prova de argamassa com o agregado B2 . . .	187
TABELA B.8–Desvio relativo máximo dos corpos de prova de argamassa com o agregado B2 . . . . .	188
TABELA B.9–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G1 - ABCPT	188
TABELA B.10–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G2 - ABCPT	188
TABELA B.11–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B1 - ABCPT	188
TABELA B.12–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B2 - ABCPT	189
TABELA B.13–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G1 - ensaio ACPT . . . . .	189
TABELA B.14–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G2 - ensaio ACPT . . . . .	189
TABELA B.15–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B1 - ensaio ACPT . . . . .	189
TABELA B.16–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B2 - ensaio ACPT . . . . .	190
TABELA B.17–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G1 - ensaio CPT . . . . .	190
TABELA B.18–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G2 - ensaio CPT . . . . .	190
TABELA B.19–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B1 - ensaio CPT . . . . .	190
TABELA B.20–Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B2 - ensaio CPT . . . . .	191
TABELA B.21–Massa dos corpos de prova de argamassa contendo o agregado G1 . .	191
TABELA B.22–Massa dos corpos de prova de argamassa contendo o agregado G2 . .	191
TABELA B.23–Massa dos corpos de prova de argamassa contendo o agregado B1 . .	192
TABELA B.24–Massa dos corpos de prova de argamassa contendo o agregado B2 . .	192
TABELA B.25–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G1 . . .	192
TABELA B.26–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G2 . . .	192
TABELA B.27–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B1 . . .	193
TABELA B.28–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B2 . . .	193
TABELA B.29–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G1 . . .	193
TABELA B.30–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G2 . . .	193

TABELA B.31–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B1 . . .	194
TABELA B.32–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B2 . . .	194
TABELA B.33–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G1 . . .	194
TABELA B.34–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G2 . . .	194
TABELA B.35–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B1 . . .	195
TABELA B.36–Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B2 . . .	195

## LISTA DE SIGLAS

ABCPT	Método acelerado brasileiro de prismas de concreto ( <i>Accelerated Brazilian concrete prism test</i> )
ACPT	Método acelerado de prismas de concreto ( <i>Accelerated concrete prism test</i> )
AMBT	Ensaio acelerado de barras de argamassa ( <i>Accelerated mortar bar test</i> )
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono ( <i>Carbon dioxide</i> )
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado ( <i>Hydrated calcium silicate</i> )
CPT	Ensaio de prismas de concreto ( <i>Concrete prism test</i> )
DRI	Índice de Classificação de Danos ( <i>Damage Rating Index</i> )
DRX	Difração de raios X ( <i>X Ray Diffraction</i> )
MEV	Microscopia eletrônica de varredura ( <i>Scanning Electron Microscopy</i> )
PDI	Índice de Deformação Plástica ( <i>Plastic Deformation Index</i> )
RAA	Reação álcali-agregado ( <i>Álkali-aggregate reaction</i> )
RAS	Reação álcali-sílica ( <i>Alkali-silica reaction</i> )
RAC	Reação álcali-carbonato ( <i>Alkali-carbonate reaction</i> )
SDI	Índice de Dano da Rigidez ( <i>Stiffness Damage Index</i> )
SDT	Teste de Dano da Rigidez ( <i>Stiffness Damage Test</i> )
TEOS	Ortossilicato de tetraetila ( <i>Tetraethyl orthosilicate</i> )
TGA	Análise termogravimétrica ( <i>Thermogravimetric Analysis</i> )

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
1.1	OBJETIVO	24
1.1.1	Objetivo geral	24
1.1.2	Objetivos específicos	24
1.2	JUSTIFICATIVA E INOVAÇÃO	25
1.3	ESTRUTURA DA TESE	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>28</b>
2.1	REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	28
2.2	INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES DE DOSAGEM E CONDIÇÕES DO AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO NO CONTROLE DA RAS	30
2.2.1	Teor de álcalis	30
2.2.2	Uso de adições minerais	32
2.2.3	Relação água/cimento, umidade e condições externas de exposição	33
2.2.4	Tratamentos de superfície	35
2.3	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA DETERIORAÇÃO CAUSADA PELA RAA	39
2.3.1	Índice de Classificação de Danos ( <i>Damage Rating Index</i> )	41
2.3.2	Teste de Dano da Rigidez ( <i>Stiffness Damage Test</i> )	44
2.4	MODELAGEM MATEMÁTICA - MODELOS ANALÍTICOS	46
<b>3</b>	<b>TESTE DE REATIVIDADE DOS AGREGADOS</b>	<b>49</b>
3.1	INTRODUÇÃO	49
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	53
3.2.1	Materiais	53
3.2.2	Proporções das misturas e teste acelerado das barras de argamassa (AMBT)	55
3.2.3	Proporções das misturas para os testes em concreto e condições de ensaio	56
3.2.3.1	Método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT)	57
3.2.3.2	Método acelerado de prismas de concreto (ACPT)	57
3.2.3.3	Método de prismas de concreto (CPT)	58
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
<b>4</b>	<b>REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA EM CONCRETOS CONTENDO CINZA VOLANTE</b>	<b>70</b>

4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E OBJETIVO DO CAPÍTULO . . .	70
4.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL . . . . .	74
4.2.1	Materiais . . . . .	74
4.2.2	Moldagem e preparação dos concretos . . . . .	77
4.2.3	Métodos de avaliação do concreto . . . . .	80
4.2.3.1	Análise de expansão . . . . .	80
4.2.3.2	Stiffness Damage Test - SDT . . . . .	81
4.2.3.3	Damage Rating Index - DRI . . . . .	82
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	84
4.3.1	Análise de expansão . . . . .	84
4.3.2	Análise da deterioração dos corpos de prova . . . . .	89
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	102
<b>5</b>	<b>TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE PARA REDUZIR OS EFEITOS DA RAS EM CONCRETOS . . . . .</b>	<b>104</b>
5.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E OBJETIVO DO CAPÍTULO . . .	104
5.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL . . . . .	106
5.2.1	Materiais . . . . .	106
5.2.2	Moldagem das pastas e métodos de ensaio . . . . .	107
5.2.3	Preparação e moldagem dos corpos de prova . . . . .	110
5.2.4	Avaliação e métodos de ensaio - tratamento de superfície . . . . .	111
5.2.5	Avaliação e métodos de ensaio - reação álcali-sílica . . . . .	112
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	114
5.3.1	Avaliação dos tratamentos de superfície em pastas . . . . .	114
5.3.1.1	Porosidade aparente e absorção de água . . . . .	114
5.3.1.2	Microscopia eletrônica de varredura - MEV . . . . .	115
5.3.1.3	Difração de raios X - DRX . . . . .	118
5.3.1.4	Análise termogravimétrica - TGA . . . . .	120
5.3.2	Avaliação dos tratamentos de superfície em concreto . . . . .	123
5.3.2.1	Absorção por capilaridade . . . . .	123
5.3.2.2	Ângulo de contato . . . . .	124
5.3.3	Análise da expansão decorrente da RAS . . . . .	126
5.3.4	Análise da deterioração dos corpos de prova . . . . .	129
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	140
<b>6</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA . . . . .</b>	<b>142</b>
6.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E OBJETIVO DO CAPÍTULO . . .	142
6.2	MODELO SEMI-EMPÍRICO DA RAS . . . . .	143
6.2.1	Tipo e natureza/reatividade do agregado . . . . .	145
6.2.2	Temperatura . . . . .	146

6.2.3	Umidade . . . . .	147
6.2.4	Quantidade de álcalis . . . . .	147
6.2.5	Exposição . . . . .	148
6.3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .	148
6.3.1	Parâmetros utilizados - ensaio CPT . . . . .	149
6.4	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	151
6.5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	157
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	<b>158</b>
7.1	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	158
7.1.1	Quanto a utilização de diferentes ensaios para avaliar o potencial reativo dos agregados . . . . .	158
7.1.2	Quanto aos mecanismos de desenvolvimento da reação álcali-sílica em concretos com diferentes teores de cinza volante . . . . .	158
7.1.3	Quanto ao efeito dos tratamentos de superfície no desencadeamento da reação álcali-sílica em concretos . . . . .	159
7.1.4	Quanto ao uso do modelo semi-empírico proposto por Grazia <i>et al.</i> (2021) . . . . .	160
7.2	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	160
7.3	<b>ATUAÇÃO NA ELABORAÇÃO DE ARTIGOS</b> . . . . .	161
7.3.1	Publicações em eventos . . . . .	161
7.3.2	Publicações em periódicos . . . . .	161
7.4	<b>ATUAÇÃO EM CURSOS NO PERÍODO</b> . . . . .	162
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>163</b>
<b>A</b>	<b>ANEXO A</b> . . . . .	<b>183</b>
A.1	<b>MÉTODO DE DOSAGEM PARA A DEFINIÇÃO DO TRAÇO DE CONCRETO</b> . . . . .	183
A.1.1	Traço para os concretos utilizando areia natural . . . . .	185
<b>B</b>	<b>ANEXO B</b> . . . . .	<b>186</b>
B.1	<b>RESULTADOS DE EXPANSÃO DOS CORPOS DE PROVA - PRISMÁTICOS - CAPÍTULO 3</b> . . . . .	186
B.2	<b>RESULTADOS DE MASSA DOS CORPOS DE PROVA - CAPÍTULO 3</b>	191

## 1 INTRODUÇÃO

É trivial tratar o elevado consumo do cimento como ponto relevante quando se fala de meio ambiente e emissão de CO<sub>2</sub>. Mas se faz necessário destacar que esse consumo de cimento e a construção de obras de concreto vem crescendo a cada ano (UN Environment *et al.*, 2018). No Brasil, conforme os dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o total acumulado de vendas de cimento ultrapassou 54 milhões de toneladas no ano de 2019, atingindo 64 milhões de toneladas no ano de 2021. Outro dado relevante, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) e da Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC), é a demanda crescente de agregados para a construção civil nos últimos anos. Em 2013 a produção atingiu o recorde, cerca de 745 milhões de toneladas. Nos anos seguintes houve uma queda significativa na produção, mas desde 2018 a perspectiva é crescente a cada ano, sendo que em 2019 a produção atingiu 530 milhões de toneladas (IBRAM, 2012; IBRAM, 2015; IBRAM, 2020).

Apesar de o mundo ter enfrentado uma pandemia entre os anos de 2019 e 2022, o setor da construção civil apresentou crescimento no seu PIB (Produto Interno Bruto) de aproximadamente 12,5%, valor este registrado no segundo trimestre de 2022 e comparado ao início da pandemia. Além disso, entre 2020 e 2022 o setor registrou quase 600 mil novas vagas com carteira assinada, sendo que a construção de edifícios foi o segmento com maior demanda, cerca de 243 mil vagas (VASCONCELOS, 2022). Não se tem registros gerais de obras construídas, porém esses dados refletem qualitativamente a quantidade de novas construções e a preocupação gerada é justamente frente a durabilidade dessas novas estruturas.

Quando se trata de durabilidade em obras de grande porte como barragens, a reação álcali-agregado (RAA) surge, normalmente, como fator preponderante a ser considerado. Destaca-se que em média 60% da energia disponível para consumo hoje no Brasil é gerado a partir de usinas hidrelétricas (Empresa de Pesquisa Energética - Brasil, 2021) e, portanto, essas obras são de grande importância dentro desse contexto, uma vez que elas precisam ter elevada vida útil para suprir as necessidades para qual foram projetadas.

A forma mais fácil de prevenir o desenvolvimento da reação álcali-agregado em estruturas de concreto é não utilizando agregados reativos. Porém, isso não é tão simples na prática. A utilização de um agregado reativo, na maior parte das vezes, se dá devido ao tipo e local da obra a ser executada. Por exemplo, na construção de uma

barragem em local remoto não é economicamente viável a retirada de agregados de jazidas muito distantes, uma vez que isso gera custos e deslocamentos que normalmente não são previstos. Além disso, em diversos países, como é o caso do Canadá, a maioria dos agregados são reativos. A solução adotada nesses casos é a utilização de técnicas que minimizem o impacto desse tipo de agregado no concreto.

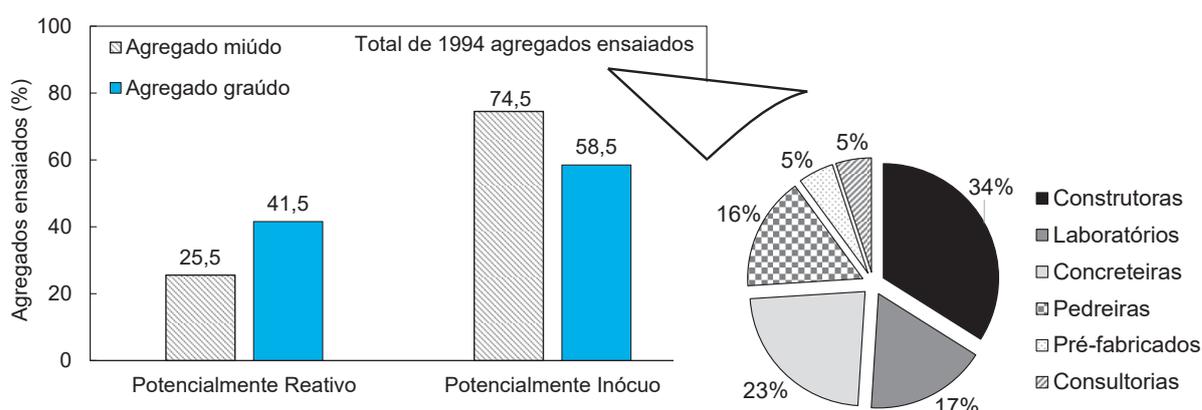
Frare *et al.* (2022) trazem um panorama das pesquisas de RAA no Brasil. Os autores mostram como as publicações sobre o tema cresceram desde os anos de 1996 até os dias atuais, principalmente após divulgação de publicações e conferências importantes ocorridas, como o I e II Simpósios sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, ocorridos em 1997 e 2006; o 15th *International Conference on Alkali-Aggregate Reaction* (15ª ICAAR), em 2016; a publicação do Guia da prevenção da reação álcali-agregado – Práticas Recomendadas do IBRACON (Instituto Brasileiro de Concreto), em 2018; além da publicação da NBR 15577, com sua primeira versão em 2008 e sua recente atualização, em 2020. Mas apesar disso, no Brasil não se tem um mapeamento preciso de obras que apresentaram ou apresentam indícios do desenvolvimento da RAA.

Em uma publicação recente, Hasparyk (2022) traz um levantamento de obras diagnosticadas com RAA no Brasil, no qual aponta 35 casos de barragens e 8 diferentes obras, como túneis, pontes e fundações de edifícios. Além disso, diversos destes casos já foram diagnosticados e apontados em estudos, além de outras obras que também foram diagnosticadas com RAA no Brasil (HASPARYK, 2005; ANDRADE, 2006; SILVA, 2007; GALLO *et al.*, 2007; MARQUES, 2009; ANDRADE, 2014; ZAMBOTTO, 2014; ANDRADE, 2014; ARAÚJO; SOBRINHO, 2016; FERRO; BRITO, 2016; SATO, 2017; SILVA *et al.*, 2021). Mas apesar dessas informações, o mapeamento de obras diagnosticadas com RAA é ainda incipiente, uma vez que não apontam as obras de vários estados, como do Paraná.

Outro dado importante, levantado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) no ano de 2015, é sobre uma parcela de agregados reativos existentes no Brasil. Do total de 1994 agregados enviados para análise de reatividade, em média 41,5% dos agregados graúdos e 25,5% dos agregados miúdos apresentaram resultados potencialmente reativo (Figura 1.1) (BATTAGIN *et al.*, 2016). Além disso, outra observação que pode ser levantada é sobre o número de análises por parte dos segmentos da construção civil. Esse número de análises realizadas vêm crescendo a cada ano, sendo que construtoras e concreteiras detém o maior número de pedidos; porém grande parte das solicitações foram feitas pelos estados de São Paulo e Pernambuco.

Ambos os estados têm diversas obras diagnosticadas com RAA. Vale destacar ainda que essa abordagem consiste apenas no ensaio acelerado de barras de argamassa, sendo o ensaio mais solicitado. Battagin *et al.* (2016) mostram que em 2015 apenas 63 amostras de agregados foram enviadas para teste em concreto, caracterizando em média 14% do total de agregados testados, no mesmo ano, pelo ensaio de barras de argamassa.

FIGURA 1.1 – Resultado da avaliação da reatividade de agregados enviados para a ABCP por diferentes segmentos da construção civil



FONTE: Adaptado de Battagin *et al.* (2016)

O teste acelerado em barras de argamassa, conhecido como AMBT (*accelerated mortar bar test*) é alvo de críticas por diversos autores e estudos (FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000; THOMAS *et al.*, 2006; GOLMAKANI; HOOTON, 2016) devido a diferenças nos resultados de reatividade quando o mesmo agregado é testado em concreto. Thomas *et al.* (2006) afirmam que o teor de álcalis necessário para produzir uma expansão neste teste é muito maior que a exigida no método dos prismas de concreto, acabando por gerar resultados não totalmente confiáveis. Além disso, os testes de laboratório ainda não conseguem desempenhar de forma efetiva o comportamento e o desenvolvimento da RAA visto em campo. Faltam dados de desempenho em campo para balizar a construção de novas estruturas, calibragem de ensaios e uso de materiais diversos.

Desde 1990 (GRATTAN-BELLEW, 1995; CHRISP; WALDRON; WOOD, 1993) têm se estudado técnicas que auxiliem no diagnóstico e prognóstico da reação álcali-agregado em construções existentes. Até os dias atuais ainda há dificuldades de se entender o quanto a deterioração por parte da RAA interfere numa estrutura do ponto de seu desempenho mecânico e tempo de vida útil. Diversos estudos (SMAOUI *et al.*, 2004a; RIVARD; BALLIVY, 2005; SANCHEZ *et al.*, 2014; SANCHEZ *et al.*, 2016a;

RASHIDI *et al.*, 2016; GAUTAM *et al.*, 2017a; SANCHEZ *et al.*, 2017; SANCHEZ *et al.*, 2017; GAUTAM *et al.*, 2017b; MARTIN *et al.*, 2017; GAUTAM; PANESAR, 2017; SOUZA; SANCHEZ; GRAZIA, 2019) têm sido desenvolvidos acerca desse assunto e os resultados apresentados são promissores num panorama técnico-científico. Porém, muito ainda deve ser feito, e o primeiro passo é validar no mundo o uso de técnicas que auxiliem nas respostas sobre diagnóstico e prognóstico em estruturas reais.

Considerando todos os tópicos apontados, o estudo da RAA ainda é assunto relevante se tratando principalmente de obras de caráter socioeconômico, como é o caso de usinas hidrelétricas. Aumentar a durabilidade e tempo de vida útil dessas obras traz vantagens econômicas e ambientais, visto a complexidade da obra e o envolvimento de várias demandas, como o funcionamento das cidades. Além disso, as barragens apresentam condições favoráveis de temperatura e umidade ao desenvolvimento da RAA além de apresentarem grandes volumes de concreto massa.

Nesse contexto, a cinza volante, por exemplo, é bastante empregada para a construção de barragens. Materiais pozolânicos já são considerados eficientes na mitigação e redução de danos causados devido a RAA (SAHA *et al.*, 2018) e, portanto, contribuem na elevação da vida útil de obras de grande porte. No Brasil, na construção da usina hidrelétrica de Jupia, em 1963, utilizou-se argila calcinada como pozolana para adição ao concreto. Isso mostra que na década de 60 já se pensava em prevenção da reação álcali-agregado com o uso de pozolanas (GALLO *et al.*, 2007). Mas apesar de os testes em laboratório já terem mostrado a eficiência de diversas adições minerais frente a mitigação da RAA, estudos recentes tem apontado que as mesmas apenas retardam a reação, não a cessando por completo (FOURNIER *et al.*, 2016; FOURNIER *et al.*, 2018). Além disso, Juenger, Snellings e Bernal (2019) citam que o suprimento destes materiais está ameaçado ao longo prazo e que a busca por materiais alternativos para as diversas aplicações devem ser estudadas.

Ainda ao se tratar de barragens, a ocorrência da RAA pode ser acelerada devido o contato direto com a umidade presente. E, apesar das indicações de uso de materiais como cinzas volantes, trabalhar com a redução da disponibilidade de água para a reação pode ser uma alternativa para melhorar a interface do concreto com o meio e reduzir a cinética da reação álcali-agregado, elevando o tempo de vida útil da obra.

A utilização de tratamentos de superfície vem surgindo como uma opção para aumentar a durabilidade das estruturas frente as solicitações externas, e têm apresentado bons resultados, dependendo do tipo de material utilizado (MEDEIROS *et*

*al.*, 2012; SULEIMAN; SOLIMAN; NEHDI, 2014; DANG *et al.*, 2014; DESCHENES; MURRAY; HALE, 2017; FIGUEIRA *et al.*, 2019). Aplicações de silanos/siloxanos em estruturas reais, diagnosticadas com reação álcali-agregado, já tem resultados positivos do ponto de vista de redução da cinética de expansão (BÉRUBÉ *et al.*, 2002a; DESCHENES, 2017), porém a eficiência e uso de materiais inorgânicos como silicatos, é pouco estudada nesse contexto e pode estar atrelada à falta da capacidade hidrofóbica desse material. Recentemente surgiram pesquisas (PIGINO *et al.*, 2012; CAI *et al.*, 2016; HOU *et al.*, 2016; GUO *et al.*, 2018), nos quais os autores testam o uso de um tipo de silicato de etila, conhecido como TEOS, para tratamento de superfície no concreto. Esse tipo de silicato apresenta alguma propriedade hidrofóbica atrelada a capacidade de bloquear poros devido à formação de produtos como o C-S-H (GUO *et al.*, 2018). Os resultados ainda são incipientes sobre o uso desse material e não há referências sobre seu uso para mitigar a reação álcali-agregado.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo geral

Contribuir no estudo dos mecanismos de controle da expansão do concreto decorrente da reação álcali-sílica (RAS), utilizando cinza volante e tratamento de superfície como agentes mitigadores, buscando entender o desempenho mecânico e microestrutural dos concretos frente ao uso de diferentes técnicas que visam o diagnóstico da reação deletéria.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar os resultados de reatividade de diversos agregados obtidos a partir de diferentes ensaios;
- Compreender os mecanismos de controle da reação álcali-sílica devido o uso de diferentes teores de cinza volante no concreto, utilizando técnicas de diagnóstico e prognóstico da reação, como o *Stiffness Damage Test* (SDT) e *Damage Rating Index* (DRI);
- Avaliar a eficácia de dois produtos à base de silicato de etila, contendo diferentes composições de SiO<sub>2</sub>, como tratamentos de superfície do concreto submetido a reação álcali-sílica;

- Calibrar um modelo matemático analítico, desenvolvido para prever comportamento da expansão do concreto devido à reação álcali-silica, a partir dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E INOVAÇÃO

A reação álcali-agregado quando instaurada na estrutura dificilmente consegue ser cessada por completo. Portanto, evitar a ocorrência é a melhor solução a ser tomada. Porém, para que isso aconteça é necessário que se conheça o desempenho dos agregados e materiais, ao longo do tempo, a serem utilizados nas novas construções. Diversos estudos em laboratório já mostraram que adições minerais, principalmente as pozolânicas como a cinza volante, são eficientes em mitigar a ocorrência da reação deletéria (SHEHATA; THOMAS, 2000; AQUINO; LANGE; OLEK, 2001; MALVAR; LENKE, 2006; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011; MOSER *et al.*, 2010; SHAFATIAN *et al.*, 2013; SAHA *et al.*, 2018). Entretanto, outras pesquisas (FOURNIER *et al.*, 2016; FOURNIER *et al.*, 2018) vêm demonstrando que estes materiais apresentam comportamentos diferentes quando aplicados e testados em estruturas em campo, tendo como resultado apenas o retardo da reação.

Dessa forma, estudar a aplicação de métodos promissores como DRI (*Damage Rating Index*) e SDT (*Stiffness Damage Test*) para avaliação do desempenho dos concretos frente a RAA contribui para validação e uso dos mesmos no mundo todo. Esses métodos têm apresentado resultados satisfatórios quanto ao diagnóstico de estruturas acometidas com a reação álcali-agregado em campo e laboratório em outros países, e ainda são pouco difundidos no Brasil.

O uso de tratamentos de superfície vem sendo estudado nas últimas décadas e têm se tornado uma boa opção dentre os materiais existentes para ajudar a minimizar os impactos da RAA (BÉRUBÉ *et al.*, 2002a; BÉRUBÉ *et al.*, 2002b; DESCHENES, 2017). O uso de materiais inorgânicos com certas propriedades hidrofóbicas atreladas a cristalização de produtos hidratados, como é o caso do silicato de etila, têm ganhado espaço nos estudos frente ao ingresso de agentes agressivos, como cloretos e sulfatos (CHO; NOH; SONG, 2009; PIGINO *et al.*, 2012; FRANZONI; PIGINO; PISTOLESI, 2013; HOU *et al.*, 2016; GUO *et al.*, 2018; LI; WU; WU, 2022). Entretanto, não há consenso sobre os resultados obtidos em relação à reação álcali-agregado e não há estudos aprofundados neste tema quando se trata deste tipo de material.

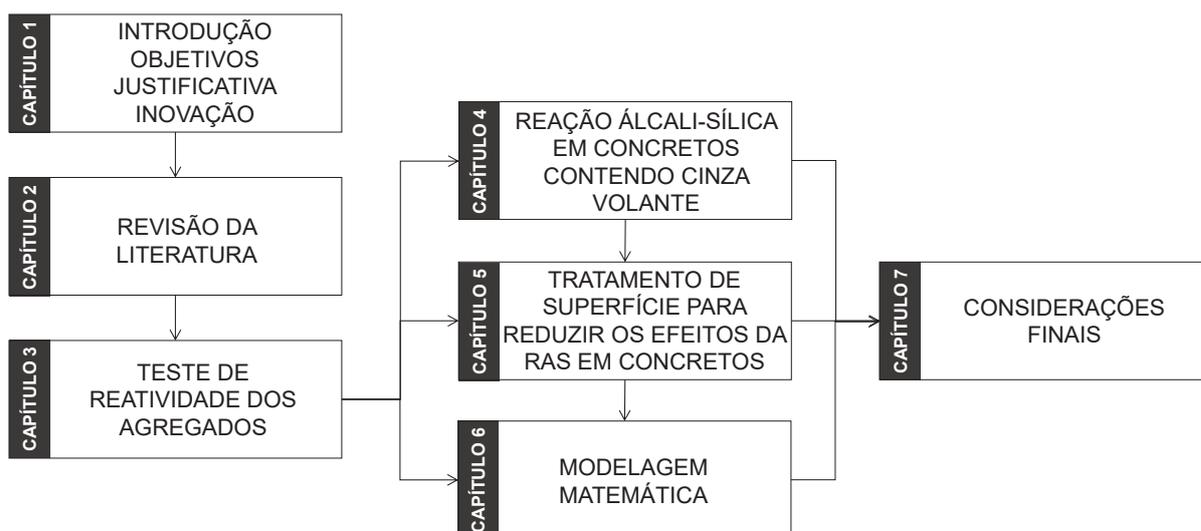
Portanto, investir em novos materiais e novas técnicas pode trazer contribuições tecnológicas para a comunidade acadêmica e também econômicas para quem trabalha diretamente com casos reais de estruturas relacionadas a reação álcali-agregado. Desta forma, a utilização de dois diferentes tipos de tratamento de superfície, a base de silicato de etila, frente a concretos submetidos a reação álcali-sílica, é o ponto de inovação desta tese.

A partir dos pontos expostos acima, foram realizadas revisões sistemáticas sobre os temas abordados. A revisão está contida na introdução de cada capítulo e, a partir dessa ferramenta, os pontos de destaque e inovação são apontados nos próprios capítulos, sendo baseados em dados da literatura. O foco desta tese se deu na reação álcali-sílica (RAS), um tipo de RAA, devido à grande ocorrência da mesma no Brasil.

### 1.3 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho aborda diferentes mecanismos de controle e uso de técnicas de diagnóstico da reação álcali-sílica que visam contribuir com a literatura já existente sobre o tema. Nesse contexto, a tese foi dividida em 7 capítulos (Figura 1.2). Os capítulos 3 a 6 são independentes e cada um deles contém introdução, programa experimental, resultados, discussão e considerações finais.

FIGURA 1.2 – Estrutura da Tese



Capítulo 2 - Revisão da Literatura;

- Este capítulo abrange conceitos e uma breve revisão sobre a reação álcali-agregado e seus fatores de influência, seguindo uma ordem de abordagem dos

temas do estudo. O tema de cada capítulo independente será discutido de forma direcionada na introdução do mesmo capítulo.

#### Capítulo 3 - Teste de reatividade dos agregados;

- Este capítulo apresenta a caracterização e coleta dos agregados utilizados além da caracterização do restante dos materiais. O capítulo aborda o teste acelerado de barras de argamassa e os testes em concreto, prescrito na NBR 15577:2018, além do teste acelerado em concreto, desenvolvido por Sanchez (2008), Sanchez, Kuperman e Helene (2011), a fim de compará-los e utilizá-los como parâmetros para obter uma classificação orientativa da reatividade dos agregados selecionados.

#### Capítulo 4 - Reação álcali-sílica em concretos contendo cinza volante

- O objetivo desse capítulo é avaliar o grau de deterioração decorrente da reação álcali-sílica, em concretos com dois diferentes teores de cinza volante, a partir da perspectiva de diferentes ferramentas de diagnóstico e prognóstico.

#### Capítulo 5 - Tratamento de superfície para reduzir os efeitos da RAS em concretos;

- Visando uma forma de mitigar e/ou reduzir a RAS, este capítulo aborda o uso de dois tipos de tratamento de superfície, à base de silicato de etila, no concreto. Os capítulos 4 e 5 são interligados, uma vez que ambos abordam duas diferentes formas de mitigação da reação deletéria e também o uso de ferramentas de diagnóstico e prognóstico para avaliar o desempenho das mesmas.

#### Capítulo 6 - Modelagem matemática;

- A modelagem matemática aqui utilizada é baseada em modelos analíticos e tem por finalidade abordar os dados obtidos em laboratório e compará-los a curva gerada a partir das considerações do modelo.

#### Capítulo 7 - Considerações finais;

- Neste último capítulo são apresentadas as conclusões globais da pesquisa, as quais buscam correlacionar os resultados e apontar os mais relevantes encontrados. Esse capítulo é crucial para entender quais as perspectivas futuras e contribuições relativas ao desempenho da RAS frente as propostas apresentadas neste estudo.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

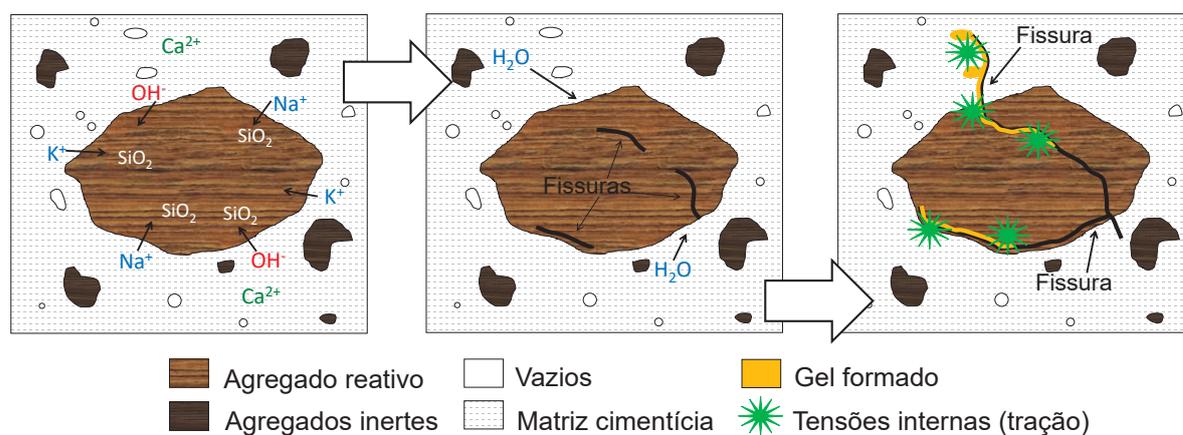
### 2.1 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado (RAA) foi reconhecida a partir de Stanton nos anos de 1940 após identificar indícios do problema em pavimentos na Califórnia. Sua publicação foi precursora para as investigações em campo e despertou o interesse dos pesquisadores ao redor do mundo sobre o tema (GILLOTT, 1975; FORSTER *et al.*, 1998; FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000). Após 80 anos de estudos, inúmeras pesquisas já foram realizadas sobre a RAA e diversas obras em todo o mundo já foram identificadas em processo de deterioração devido a essa reação.

A RAA é definida como um processo deletério que ocorre entre alguns componentes reativos de certos agregados e hidróxidos alcalinos, mais especificamente os álcalis  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e hidróxido  $\text{OH}^-$ , presentes na solução de poros da matriz do concreto. Esses hidróxidos alcalinos são responsáveis por manter a alcalinidade elevada nos poros, favorecendo a formação e manutenção, por exemplo, da camada passivadora do aço em estruturas de concreto armado (HUET *et al.*, 2005). Porém, ao mesmo tempo que propicia a passivação do aço, pode auxiliar no desencadeamento da reação álcali-agregado. De acordo com Fournier e Bérubé (2000) três condições são necessárias para iniciar e sustentar a RAA: fases reativas nos agregados, elevada concentração de hidróxidos alcalinos na solução de poros do concreto e umidade.

O resultado da RAA é um gel que se forma nas fissuras dos agregados e/ou na sua superfície e que com acesso da água tende a expandir gerando tensões internas nos elementos de concreto (Figura 2.1). Essas tensões podem causar trincas e favorecer o processo de degradação do elemento pela entrada de outros agentes do meio, como por exemplo, cloretos e sulfatos (DIAMOND, 1975; FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000).

FIGURA 2.1 – Esquema da reação álcali-sílica



FONTE: Adaptado de Du e Tan (2014) e Sanchez *et al.* (2015)

A RAA pode ser classificada basicamente de duas formas, as quais dependem do tipo e mineralogia do agregado envolvido: reação álcali-carbonato (RAC) e a reação álcali-sílica (RAS). A RAC pode ocorrer com o uso de agregados provenientes de rochas calcárias dolomíticas, sendo que seus mecanismos de degradação e desenvolvimento são pouco conhecidos. Já a RAS é a mais comum e relatada entre as duas. Ela ocorre devido a diferentes formas de sílica reativa presente nos agregados. Em linhas gerais, a RAS pode ser descrita pela Equação 2.1 (ALEXANDER, 2019).



Essa equação simplificada expressa basicamente o que ocorre na reação, sendo o processo ilustrado na Figura 2.1. O grupo silanol (Si-OH) e siloxano (Si-O-Si), presente na sílica dos agregados, são atacados pelos íons hidroxila, e substituídos por pares de  $SiO^-$ . Por sua vez os cátions em solução ( $Na^+$  e  $K^+$ ) são atraídos então pelas cargas negativas desses pares formados. O resultado dessa reação é a formação de um gel sílico-alcálico (GLASSER; KATAOKA, 1981; TAYLOR, 1997). Esse gel é basicamente composto por silicato de sódio e potássio em variadas proporções, podendo incorporar também íons de cálcio disponíveis na solução (GLASSER; KATAOKA, 1981; JOHN; POOLE; SIMS, 2012). Essa reação contínua modifica e danifica a estrutura inicial da sílica e favorece a absorção de mais álcalis e água (TAYLOR, 1997).

A quantidade e presença dos íons ( $Na^+$ ,  $K^+$  e  $Ca^{2+}$ ) determina importantes propriedades do gel. Caso o mesmo seja formado num ambiente saturado de  $Ca^{2+}$  e este for absorvido pelo gel, C-S-H pode ser o produto final. Diferente do gel formado pelos íons  $Na^+$ ,  $K^+$ , que é expansível na presença de água (BAZANT; STEFFENS,

2000).

São diversas as fases reativas que podem ser encontradas nos agregados. Alexander (2019) traz uma tabela adaptada de Oberholster (2009) no qual apresenta minerais, rochas e algumas substâncias que tem potencial reação com os álcalis presentes no concreto. Além disso, a norma brasileira que especifica os ensaios para classificação de agregados quanto a reatividade, NBR 15577 (ABNT, 2018), apresenta na sua parte 3 uma relação dessas rochas e minerais passíveis à ocorrência da reação. Os principais minerais apontados são alguns tipos de sílica metaestáveis, como opala, tridimita, cristobalita; além de algumas formas de quartzo e vidros vulcânicos. Um dos fatores responsáveis pela severidade da reação é o grau de reatividade dos agregados ou da sílica reativa, no caso da RAS (MARZOUK; LANGDON, 2003; BINAL, 2015).

## 2.2 INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES DE DOSAGEM E CONDIÇÕES DO AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO NO CONTROLE DA RAS

### 2.2.1 Teor de álcalis

A quantidade de álcalis disponível na solução de poros do concreto é um importante fator no desencadeamento da RAS (FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000). Grande parte da contribuição alcalina é proveniente do cimento utilizado, porém, agregados (BÉRUBÉ *et al.*, 2002; YUJIANG; MIN; MINGSHU, 2008; WANG *et al.*, 2008), materiais pozolânicos, como cinzas volantes, dependendo da composição (THOMAS, 2011; RAJABIPOUR *et al.*, 2015) e fontes externas, dependendo do ambiente a que este concreto está exposto (ambientes marítimos ou que sofrem com gelo e degelo) (RAJABIPOUR *et al.*, 2015), também podem fornecer álcalis.

O teor de álcalis no cimento é quantificado, de acordo com a NBR 15577 (ABNT, 2018), a partir do teor de óxido de sódio equivalente ( $Na_2O_{eq}$ ), expresso conforme a Equação 2.2

$$\%Na_2O_{eq} = \%Na_2O + 0.658 \times \%K_2O \quad (2.2)$$

A razão entre a massa atômica do  $Na_2O$  e  $K_2O$  resulta na constante 0.658 expressa na equação.

A norma brasileira, NBR 15577 (ABNT, 2018), aponta um limite no teor de álcalis ( $2,4kg/m^3$  de  $Na_2O_{eq}$ ) no concreto quando se trata de alguns casos de uso de agregados reativos e, normalmente, a principal limitação desse teor é feita a partir do

uso do cimento. Desde 1960, estudos (SWENSON; GILLOTT, 1964) têm sido realizados a fim de verificar o teor de álcalis no cimento com a finalidade de prevenir a ocorrência da RAS. Tosun, Felekoğlu e Baradan (2007) observaram que as expansões são sempre mais significativas em corpos de prova contendo cimentos com elevado teor de alcalino (>0,6%) para um mesmo tipo de agregado. O teor de álcalis presente nos poros têm influência na dissolução da sílica e conseqüentemente no grau da reação, ou seja, pode potencializar o desenvolvimento da RAS quando do uso de um agregado com uma reatividade específica (SHEHATA; THOMAS, 2010).

A limitação no teor de álcalis do cimento é uma das maneiras de reduzir a ocorrência da RAS. Porém, isso depende do consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto e da quantidade total de álcalis disponível na solução de poros para a reação, determinada durante a hidratação do cimento (ALEXANDER, 2019), e a faixa de variação dos valores limites de álcalis no concreto, estipulado por diversos países em suas normas, é muito vasta (Tabela 2.1) (ALEXANDER, 2019). Além disso, é necessário atentar a outros fatores quando não se descarta o uso de agregados reativos, como o grau de reatividade desses agregados, o ambiente em que a estrutura está inserida e a utilização de materiais e parâmetros de dosagem que auxiliam na inibição da reação álcali-sílica.

TABELA 2.1 – Limites de álcalis, estipulados internacionalmente, para controle da expansão devido o uso de agregados reativos

País	Limite de álcali total especificado para concreto (kg/m <sup>3</sup> )
Estados Unidos (ASTM C1567, 2013; ASTM C1293, 2018)	1,8-3,0
Canadá (CSA A23.1 e 2, 2014)	2,0-3,0
Reino Unido (BRE Digest 330.2, 2004)	3,5
RILEM-AAR 7.1 - 2016	2,5-3,5
Japão (JIS A5308, 2009)	3,0
Austrália (HB 79, 2015)	2,8
Nova Zelândia (CCANZ TR3, 2012)	2,5
África do Sul (SANS 6245, 2006)	2,0-4,0
Brasil (NBR 15577, 2018)	2,4

FONTE: Adaptado de (ALEXANDER, 2019)

Mas além do teor de álcalis, destacam-se outros fatores da composição química, como o teor de CaO. Leemann *et al.* (2011) mostram que a dissolução da sílica depende da quantidade de cálcio presente na forma de portlandita, pois quanto mais portlandita, maior a dissolução da mesma. Figueira *et al.* (2019) concluem haver discussões acerca

do papel do íon  $\text{Ca}^{2+}$  no desenvolvimento da RAS, entretanto há consenso de que ele é essencial para a progressão e inchamento do gel formado pela reação deletéria.

### 2.2.2 Uso de adições minerais

O uso de adições minerais no concreto a fim de contribuir na redução da RAS é um tema já bastante estudado pela comunidade científica. É comprovado que o uso de adições silicosas ou sílico-aluminosas com reatividade pozolânica, como a sílica ativa e alguns tipos de cinzas, podem reduzir os efeitos deletérios da reação álcali-sílica (AQUINO; LANGE; OLEK, 2001; THOMAS, 2011; BODDY; HOOTON; THOMAS, 2003; ABBAS; KAZMI; MUNIR, 2017; BADRUL; HOSSAIN, 2018).

A reação pozolânica que ocorre entre algumas adições minerais e a portlandita, presente na hidratação do cimento, proporciona mecanismos que auxiliam positivamente na mitigação da RAS. A redução da reserva alcalina, pelo consumo do hidróxido de cálcio, contribui para a diminuição da alcalinidade da solução dos poros de concreto (AQUINO; LANGE; OLEK, 2001; THOMAS, 2011; MEDEIROS *et al.*, 2017; HOPPE FILHO *et al.*, 2017b), que é um dos fatores preponderantes para o início da reação. Quando a adição mineral consome o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente, ela forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O C-S-H formado a partir de reações pozolânicas apresenta menor relação C/S do que a C-S-H convencionalmente formado a partir da hidratação do cimento. Essa menor relação contribui no aumento da sua capacidade de ligação alcalina ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e conseqüentemente na redução da alcalinidade da solução de poros presente na matriz do concreto (DUCHESNE; BÉRUBÉ, 1995; THOMAS, 2011; ABBAS; KAZMI; MUNIR, 2017).

Outro fator importante no uso de adições minerais é o efeito físico causado pelo tamanho das partículas dos materiais adicionados. Esse efeito melhora o empacotamento, pois partículas menores que o cimento, preenchem os espaços vazios, refinando poros e formando uma matriz mais densa e menos permeável, interferindo também na interconectividade dos poros, propiciando uma redução na mobilidade dos íons; além de que essas partículas agem como pontos de nucleação que auxiliam na hidratação do cimento (BERODIER; SCRIVENER, 2014; BADRUL; HOSSAIN, 2018).

A redução do tamanho de partículas das adições pozolânicas pode auxiliar na maior reatividade das mesmas, no consumo de portlandita e conseqüentemente na eficiência da adição; porém sua estrutura (cristalina ou amorfa), composição química e quantidade adicionada também são fatores relevantes (SHEHATA; THOMAS, 2000; RÊGO *et al.*, 2015; HOPPE FILHO *et al.*, 2017a). Quando se trata do uso da cinza

volante, a composição química e a quantidade adicionada ao concreto são aspectos de grande importância para o bom desempenho do material (KURODA; WATANABE; TERASHI, 2000; SHEHATA; THOMAS, 2000; THOMAS, 2011; MALVAR; LENKE, 2006; SAHA *et al.*, 2018).

Adições minerais se tornam pouco eficientes quando adicionadas em quantidades inadequadas dependendo das condições que envolvem a RAS; como reatividade do agregado, ambiente de exposição da estrutura, teor de álcalis do cimento e composição química da própria adição (THOMAS, 2011).

A RAS é semelhante à reação pozolânica no seu desenvolvimento químico (TAYLOR, 1997; THOMAS, 2011). O gel da RAS tem composição silico-alcálico, composto basicamente por  $\text{SiO}_2$ , Na, K e Ca. Da mesma forma o C-S-H formado pela reação pozolânica também é. A relação C/S do C-S-H formado pela reação pozolânica é menor do que no C-S-H formado pelo cimento hidratado sem o uso de adições. E o que ocorre é que com uma baixa relação C/S, a carga positiva é reduzida tornando-se negativa, o que aumenta a capacidade do C-S-H formado sorver os álcalis disponíveis no meio (SHEHATA; THOMAS; BLESZYNSKI, 1999; RÉGO *et al.*, 2015; ABBAS; KAZMI; MUNIR, 2017). A diferença entre a RAS e a reação pozolânica está na escala de tempo em que ambas ocorrem e também no tamanho das partículas do material silicoso (TAYLOR, 1997; THOMAS, 2011). Como as pozolanas são materiais finos e distribuídos pela pasta de cimento, a reação pozolânica ocorre distribuída na pasta e, portanto, os produtos desta reação também. Já no caso da RAS, a presença da sílica reativa no agregado é concentrada em pontos específicos, os quais levam o acúmulo do gel formado nestes locais (THOMAS, 2011).

### 2.2.3 Relação água/cimento, umidade e condições externas de exposição

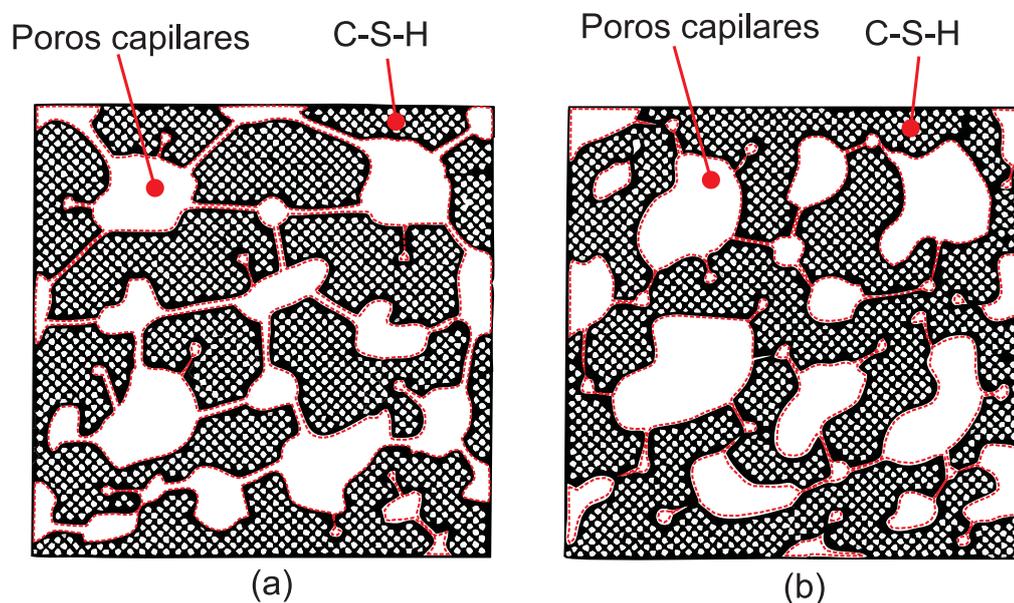
A RAS ocorre na presença dos três fatores concomitantes: álcalis, uso de agregados reativos e umidade suficiente. Essa umidade pode ter incidência externa, devido ao local onde a estrutura está inserida, ou ainda interna. Penttala (2009) afirma que para ocorrer a reação é necessário que a umidade interna do concreto exceda 80-85%, resultados semelhantes foram obtidos em outras pesquisas (BÉRUBÉ; FOURNIER, 1993), porém esse crivo também depende do grau de reatividade do agregado. Bouzabata *et al.* (2012) mostram que a RAS pode iniciar apenas devido à água presente nos poros do concreto, se esta for suficiente. E, após seu início, qualquer elevação da umidade, ciclos de umedecimento e secagem, por exemplo, pode acarretar numa aceleração da expansão.

Quando ocorre a hidratação do cimento, três tipos de poros podem ser formados na pasta, os chamados espaços interlamelares (presentes no C-S-H), os vazios capilares e os vazios contendo ar aprisionado (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os vazios capilares são aqueles que não foram preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento e dependem do grau de hidratação e da relação água/cimento (a/c) da mistura. Existem classes de poros dentro dos vazios capilares, os microporos (<10nm), mesoporos (10 a 50nm) e os macroporos (>50nm). Os macroporos são os que têm maior influência nas propriedades de permeabilidade e resistência mecânica. Os vazios contendo ar, maiores e esféricos, também têm influência na resistência e permeabilidade do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A variação da quantidade de água presente nesses poros é um dos fatores que pode provocar as alterações nestas propriedades do concreto. Concretos com uma rede maior de macroporos conectados, por exemplo, pode facilitar a entrada de agentes agressivos no concreto, pela maior permeabilidade atrelada (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A relação a/c é fator preponderante na dosagem de um concreto, influenciando várias propriedades importantes, como a resistência mecânica e a durabilidade do elemento. Essas duas propriedades, por outro lado, são influenciadas diretamente pela porosidade e permeabilidade produzidas. Quanto maior a relação a/c, maior o espaço preenchido por poros entre as partículas e como consequência a permeabilidade do concreto se torna mais elevada (HOVER, 2011), tornando o ingresso de agentes agressivos do meio mais intensificada. No caso da RAS, o ingresso de umidade é essencial para o desencadeamento da reação.

Relações a/c baixas resultam em concretos com menor permeabilidade e consequentemente menores expansões nos elementos (FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000). Além disso, a liberação de álcalis por parte dos agregados pode ser limitada reduzindo o acesso de água (WANG *et al.*, 2008). Porém, além da relação a/c, o grau de hidratação do cimento, o uso de agregados porosos, diferentes materiais de dosagem e a interrupção no processo de cura são fatores que podem afetar a permeabilidade de um concreto (NEVILLE; BROOKS, 2010). Materiais contendo porosidades similares podem apresentar diferença na permeabilidade (Figura 2.2). Uma porosidade adequada num concreto submetido a RAS contribui positivamente para reduzir as expansões causadas, pois os poros conseguem acomodar o gel da reação e as tensões geradas (JENSEN *et al.*, 1984; JAROONVECHATAM *et al.*, 2017). Mas é necessário se atentar a permeabilidade, pois o ingresso de água faz com que o gel inche e expanda, podendo exceder o espaço preliminarmente disponível nos poros.

FIGURA 2.2 – Representação esquemática de materiais com similar porosidade: (a) alta permeabilidade - poros capilares interconectados, (b) baixa permeabilidade e poros capilares parcialmente conectados



FONTE: Adaptado de Neville e Brooks (2010)

Estruturas reais estão submetidas a diferentes condições de exposição, principalmente relacionadas a umidade e temperatura do ambiente, o que pode alterar o estado de umidade do concreto (ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, 1999) e propiciar o desencadeamento da reação álcali-agregado quando do uso de agregados reativos e até acelerar a cinética da reação (DESCHENES *et al.*, 2018). Mesmo que a estrutura tenha apresentado expansões quase estáveis, condições de mudança na umidade com acréscimo posterior de água pode levar a novas expansões (MULTON; TOUTLEMONDE, 2010). Por isso o controle da relação  $a/c$ , dos materiais de dosagem e uso de mecanismos que contribuem na mitigação da RAS são tão importante para evitar a formação de quadros fissuratórios evolutivos nas estruturas de concreto em que agregados reativos necessitem de ser empregados.

#### 2.2.4 Tratamentos de superfície

Existem basicamente quatro categorias de classificação dos tratamentos de superfície para uso em concreto. Essas categorias são divididas de acordo com a finalidade que se pretende atingir: proteção da superfície, reparo de fissuras, reparo da superfície e elevação da resistência superficial do concreto (BISSONNETTE; COURARD; GARBACZ, 2015). Será tratado aqui apenas da primeira categoria.

A corrosão do aço em concreto armado é, na maioria das vezes, a preocupação mais relevante quando se pensa na proteção da superfície de concreto (BASHEER; LONG, 1997; BENTUR; DIAMOND; BERKE, 1997). Proteger a estrutura de agentes que podem desencadear a corrosão, como a água, cloretos e carbonatação, e prolongar a durabilidade do material, são normalmente os principais objetivos quando se opta por aplicar um determinado tratamento de superfície.

De acordo com Medeiros (2008) a proteção da superfície desempenha um papel diferente na durabilidade do elemento de concreto, dependendo do período em que ela é aplicada. Numa estrutura nova, a aplicação do tratamento de superfície restringe o acesso de agentes agressivos e assim age no período de iniciação do processo. Já em estruturas existentes, que é o caso de obras de reparo por exemplo, a proteção atua restringindo o processo de propagação de novos agentes.

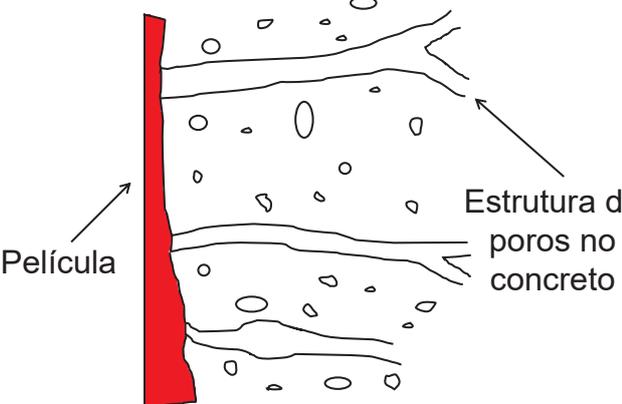
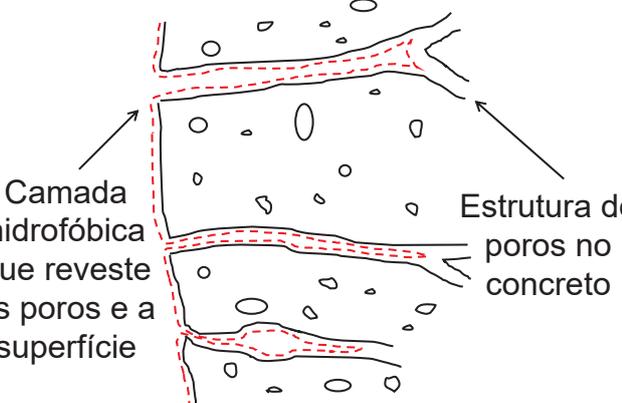
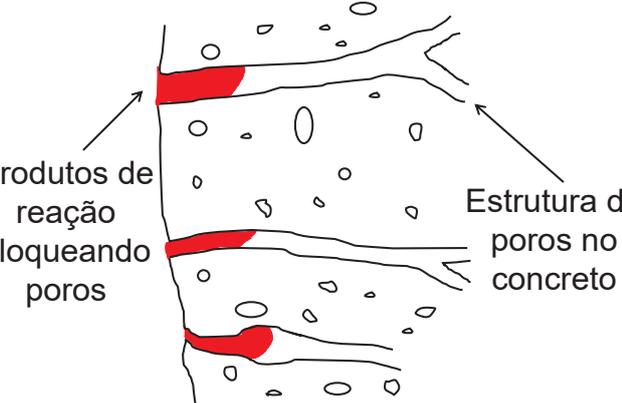
São vários os tipos de materiais que podem ser usados, porém, cada tipo age por mecanismos diferentes (BASHEER; LONG, 1997). Os principais tipos estão descritos e mostrados na Figura 2.3.

Os formadores de película, quando aplicados, produzem uma película na superfície do concreto que proporciona uma barreira física protetora resistente. Essa barreira pode servir contra a penetração de agentes agressivos e desgastes da superfície (BASHEER; LONG, 1997; BENTUR; DIAMOND; BERKE, 1997; MEDEIROS; HELENE, 2009; PAN *et al.*, 2017b; CARNEIRO *et al.*, 2021). Esse tipo de tratamento pode ser dividido em tintas e vernizes. Os vernizes geralmente têm durabilidade inferior a das tintas (MEDEIROS; HELENE, 2009).

Os hidrofugantes de superfície apresentam baixa viscosidade, diferente dos formadores de película, o que proporciona a penetração dos mesmos na superfície do concreto. Eles atuam principalmente na inibição da penetração de água no concreto e, portanto, apresentam bom desempenho contra outros agentes agressivos, como cloretos e carbonatação (MEDEIROS; HELENE, 2008; MEDEIROS; HELENE, 2009; PAN *et al.*, 2017a; PAN *et al.*, 2017b).

Os bloqueadores de poros atuam devido à formação de produtos da reação química com a superfície do concreto, bloqueando os poros capilares de modo a proporcionar um aumento na dureza e na redução da permeabilidade do concreto (MEDEIROS *et al.*, 2012; PAN *et al.*, 2017a).

FIGURA 2.3 – Esquema e descrição dos diferentes tipos de tratamentos de superfície

<p><u>Formadores de película</u></p> <p>Características:</p> <p>Formam uma película fina na superfície e a qualidade da proteção depende da composição; Penetram parcialmente.</p> <p>Exemplos:</p> <p>Selantes (tintas e vernizes)</p>	 <p>Película</p> <p>Estrutura de poros no concreto</p>
<p><u>Hidrofugantes de superfície</u></p> <p>Características:</p> <p>Fluidos de baixa viscosidade; Penetram vários milímetros; Reagem com o substrato.</p> <p>Exemplos:</p> <p>Silanos e siloxanos</p>	 <p>Camada hidrofóbica que reveste os poros e a superfície</p> <p>Estrutura de poros no concreto</p>
<p><u>Bloqueadores de poros</u></p> <p>Características:</p> <p>Fluidos de baixa viscosidade Penetram 2–3 mm Reagem com o substrato Bloqueiam os poros</p> <p>Exemplos:</p> <p>Silicatos</p>	 <p>Produtos de reação bloqueando poros</p> <p>Estrutura de poros no concreto</p>

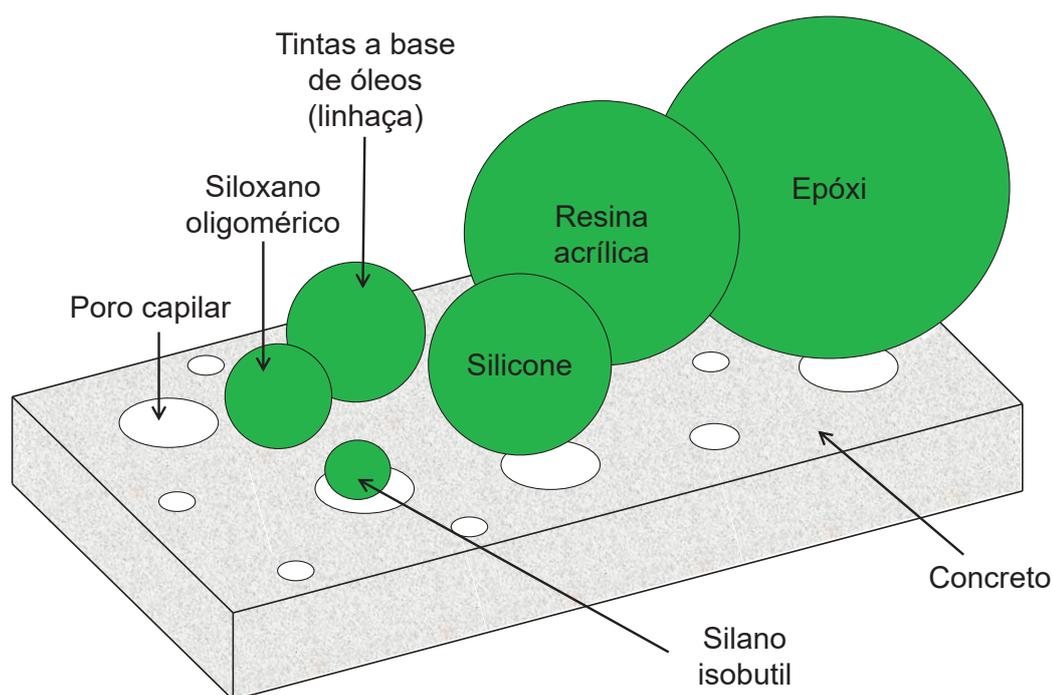
FONTE: Adaptado de Basheer e Long (1997) e Bentur, Diamond e Berke (1997)

De acordo com Basheer e Long (1997) os tratamentos de superfície podem ser avaliados quanto a alguns requisitos considerando a interação concreto-ambiente, como a resistência do tratamento quanto à penetração dos agentes do meio e variações climáticas, estabilidade química, permeabilidade ao vapor da água, resistência adequada a solicitações como abrasão, movimentações do substrato de concreto e

movimentação de fissuras. Esse último fator leva a considerar que basicamente a qualidade e a eficiência do tratamento aplicado vai depender da relação entre o concreto e o material, ou seja, a compatibilidade entre os dois (BISSONNETTE; COURARD; GARBACZ, 2015). Além disso, o fator econômico também deve ser levado em consideração, principalmente a facilidade de aplicação e manutenções posteriores (BASHEER; LONG, 1997).

O tamanho da molécula *versus* a penetração na superfície é outro aspecto importante dos tipos de tratamento. Cada tipo de material apresenta um tamanho de molécula diferente, o que lhe confere uma maior ou menor penetração do mesmo nos poros presentes no concreto. Um exemplo são as resinas acrílicas e epóxi, pelo maior tamanho da molécula, elas apenas formam uma película na superfície (Figura 2.4) (BASHEER; LONG, 1997).

FIGURA 2.4 – Comparação entre o tamanho das moléculas



FONTE: Adaptado de Basheer e Long (1997)

A maioria dos estudos relativos ao uso de tratamentos de superfície no concreto é com o objetivo de criar uma barreira para o acesso de cloretos e sulfatos (MEDEIROS *et al.*, 2012; SULEIMAN; SOLIMAN; NEHDI, 2014; DANG *et al.*, 2014). Hidrofugantes, como silanos e siloxanos, apresentam bons resultados quanto a absorção de água, penetração de cloretos e sulfatos (RAUPACH; BUETTNER, 2009; SULEIMAN; SOLIMAN; NEHDI, 2014), reduzindo significativamente a mesma. Silicato de sódio usado como

tratamento de superfície também têm mostrado uma redução no coeficiente de difusão de cloretos (MEDEIROS *et al.*, 2012).

O uso de tratamentos de superfície para contribuir na mitigação da RAS se dá devido à limitação de acesso da água. Tratamentos de superfície, como silanos e siloxanos, contribuem positivamente na redução da expansão pela RAS. A redução da umidade relativa (UR) interna nos concretos, em campo e laboratório, contendo esse tipo de tratamento foi observada por Bérubé *et al.* (2002a), Bérubé *et al.* (2002b), o que consequentemente mostrou que nesses casos não houve expansão devido à reação álcali-sílica ou que ela foi pouco significativa se comparada ao concreto não tratado. Além disso, esses tratamentos de superfície contribuíram positivamente também na durabilidade do concreto quando houve ciclos de gelo-degelo.

Deschenes (2017) utilizou diferentes tratamentos de superfície em uma barreira na rodovia, a qual já apresentava indícios de RAA. Esse artefato foi monitorado durante 3 anos subsequentes e, dentre os tratamentos utilizados, o silano apresentou resultados satisfatórios quanto a expansão da seção mensurada. Deschenes (2017) observou também que a variação climática foi fator determinante para o aumento na taxa de expansão, mostrando que neste caso os ciclos de gelo-degelo foram mais danosos que a reação álcali-sílica.

Resultados semelhantes aos encontrados por Bérubé *et al.* (2002a) e Bérubé *et al.* (2002b) foram observados por Deschenes (2017) quanto a umidade relativa interna do concreto. Tratamentos de superfície contribuíram na redução da umidade interna pela menor disponibilidade de umidade externa devido à barreira formada. No concreto uma umidade relativa interna menor que 80-85% reduziu a expansão devido a RAS (BÉRUBÉ *et al.*, 2002b). Porém, Bérubé *et al.* (2002b) citam que Pedneault (1996) em seus experimentos concluiu que a UR interna crítica para a RAS é altamente dependente da reatividade do agregado utilizado, podendo assim, haver expansão mesmo em umidades inferiores a 80%.

### 2.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA DETERIORAÇÃO CAUSADA PELA RAA

Minimizar os impactos causados pela reação álcali-agregado, sobretudo em edificações novas, é possível com a escolha correta de materiais e agregados. Os ensaios normatizados existentes auxiliam na definição do uso desses materiais. E, apesar destes ensaios ainda conterem discussões acerca dos métodos e limites de

avaliação, eles ainda são as opções mais seguras quando se trata do lançamento de uma nova construção.

Quando se trata de uma edificação que já sofre com a deterioração devido a RAA, Sanchez *et al.* (2017) comentam que não há consenso sobre a melhor estratégia a ser aplicada para que se possa garantir a recuperação da estrutura ou a minimização do problema. Entender o quanto a deterioração presente, decorrente da reação deletéria, afetou e afetará o desempenho da estrutura é outra dificuldade ainda existente.

A petrografia é uma análise que contribui na classificação preliminar do agregado quanto a um potencial reativo a partir de uma avaliação de suas características mineralógicas, estruturais e químicas. A partir dessa análise, em meados de 1990, Grattan-Bellew (GRATTAN-BELLEW, 1995) propôs uma técnica na qual a ideia era utilizar um microscópio ótico para avaliar características petrográficas de concretos afetados pela RAA e, a partir disso, quantificar a deterioração dessa análise a partir de um índice. Esse índice, chamado de DRI (*Damage Rating Index*), em português Índice de Classificação de Danos, foi aprimorado e têm sido aplicado, desde então, em diversas pesquisas em campo e laboratório (RIVARD; BALLIVY, 2005; SANCHEZ *et al.*, 2014; SANCHEZ *et al.*, 2016a; RASHIDI *et al.*, 2016; WAIDNER, 2016; GAUTAM *et al.*, 2017a; SANCHEZ *et al.*, 2017; SANCHEZ *et al.*, 2017; GAUTAM *et al.*, 2017b; MARTIN *et al.*, 2017; GAUTAM; PANESAR, 2017; SOUZA; SANCHEZ; GRAZIA, 2019; SANCHEZ *et al.*, 2020; TROTTIER *et al.*, 2021b; ZAHEDI *et al.*, 2022; AHMED *et al.*, 2022; SOUZA; ANTUNES; SANCHEZ, 2022; ZIAPOUR *et al.*, 2022).

O SDT (*Stiffness Damage Test*), em português chamado de Teste de Dano da Rigidez, também foi proposto dentro desse mesmo contexto de determinar a deterioração do concreto devido a RAA. Em uma abordagem que visasse estabelecer uma relação entre as fissuras decorrentes da RAA e a perda de desempenho mecânico do concreto ou, como Chrisp, Waldron e Wood (1993) citam, determinar o grau de dano no concreto devido à expansão decorrente da reação deletéria. Esse método foi desenvolvido por Crouch (1987) em concreto, que adaptou o método de Walsh (1965) (WALSH, 1965) usado para avaliação de diferentes rochas, e posteriormente o método foi discutido por Chrisp, Waldron e Wood (1993). Diversas pesquisas recentes vêm melhorando e estudando esta técnica, como Smaoui *et al.* (2004a), Sanchez *et al.* (2014), Sanchez *et al.* (2016a). Os resultados atingidos tem sido satisfatórios do ponto de vista de diagnóstico e prognóstico da RAS em estruturas reais (AHMED *et al.*, 2022). Sanchez *et al.* (2020) avaliaram a estrutura de um viaduto no Canadá que foi desativado e demolido em 2010/2011, a partir de um protocolo multinível, utilizando as

técnicas como DRI e SDT em corpos de prova (testemunhos) extraídos da estrutura. Os resultados foram promissores do ponto de vista do grau de deterioração dos elementos de concreto, indicando a presença da RAS, os diferentes graus de danos de acordo com os diferentes elementos da estrutura e condições ambientais as quais eles estavam expostos.

Ambas as técnicas (DRI e SDT) serão melhor descritas nos itens que seguem. O uso dessas ferramentas pode auxiliar também no diagnóstico de outras reações deletérias, como as que envolvem a formação de etringita tardia (DEF) e os processos de deterioração por gelo degelo e também de reação sulfática interna (GIANNINI *et al.*, 2018; SANCHEZ *et al.*, 2018; CUSTÓDIO; RIBEIRO, 2019; SANCHEZ; DRIMALAS; FOURNIER, 2020).

No Brasil, em 2021, a técnica de SDT foi divulgada a partir de uma instrução técnica da FURNAS, sendo esta de colaboração entre pesquisadores do Brasil e Canadá (HASPARYK; SANCHEZ, 2021). Este documento se torna um avanço nacional em termos de diagnóstico da RAA.

### 2.3.1 Índice de Classificação de Danos (*Damage Rating Index*)

A técnica de DRI consiste em avaliar, com o auxílio de um microscópio, características petrográficas decorrentes da RAS em corpos de prova de concreto extraídos de estruturas ou moldados em laboratório.

O índice de classificação de danos, conhecido como *Damage Rating Index*, traz uma abordagem semi-quantitativa para avaliar o dano, observado através de uma análise petrográfica, para fins de diagnóstico da RAS. Desenvolvido inicialmente por Grattan-Bellew (1995), foi aplicado nos casos de estruturas acometidas com a RAA, como parte de investigações de campo. O método foi posteriormente modificado por Villeneuve *et al.* (2012) (VILLENEUVE, 2011; SANCHEZ, 2014), no qual Sanchez (2014) também acrescentou melhorias. O estudo com diversos concretos apontou boas correlações entre o DRI e a expansão dos corpos de prova e também sobre o tipo de fissuras (abertas e fechadas), densidade das mesmas e como elas se desenvolvem de acordo com a expansão do concreto (SANCHEZ, 2014). Além de Sanchez (2014) outros pesquisadores já usaram o método com modificações como mostra Villeneuve (2011).

O método consiste em uma análise petrográfica de características decorrentes da RAA, a partir do uso de um microscópio com ampliação de 15 a 16x. O concreto analisado é cortado e polido, e quadrados de 1cm x 1cm são demarcados, obtendo uma

área total de aproximadamente 200 cm<sup>2</sup> para essa análise. Essas características são classificadas de acordo com a importância dentro do processo geral da deterioração causada pela RAA e ponderadas. O quadro de ponderação dessas características passou por várias revisões, como cita (VILLENEUVE, 2011). Villeneuve (2011) propôs uma classificação e ponderação (Tabela 2.2) usada também por Sanchez *et al.* (2015). Posterior a essa classificação, o número obtido pelo DRI é normalizado para uma área de 100 cm<sup>2</sup> (SANCHEZ, 2014; WAIDNER, 2016). A Figura 2.5 mostra imagens de amostras ensaiadas a partir da técnica de DRI contendo algumas das características petrográficas que podem ser encontradas.

TABELA 2.2 – Fatores de ponderação DRI

Características petrográficas	Abreviação <sup>1</sup>	Peso	Grupo <sup>2</sup>
Fissuras fechadas no agregado	CCA	0,25	I
Fissuras abertas no agregado	OCA	2	II
Fissuras abertas no agregado com produto de reação	OCAG	2	II
Agregado graúdo desagregado	CAD	3	-
Partícula de agregado desagregada/corroída	DAP	2	II
Fissuras na pasta de cimento	CCP	3	III
Fissuras na pasta de cimento com produto de reação	CCPG	3	III

<sup>1</sup>Abreviações dos nomes dados as características em inglês

<sup>2</sup>Classificação dos grupos:

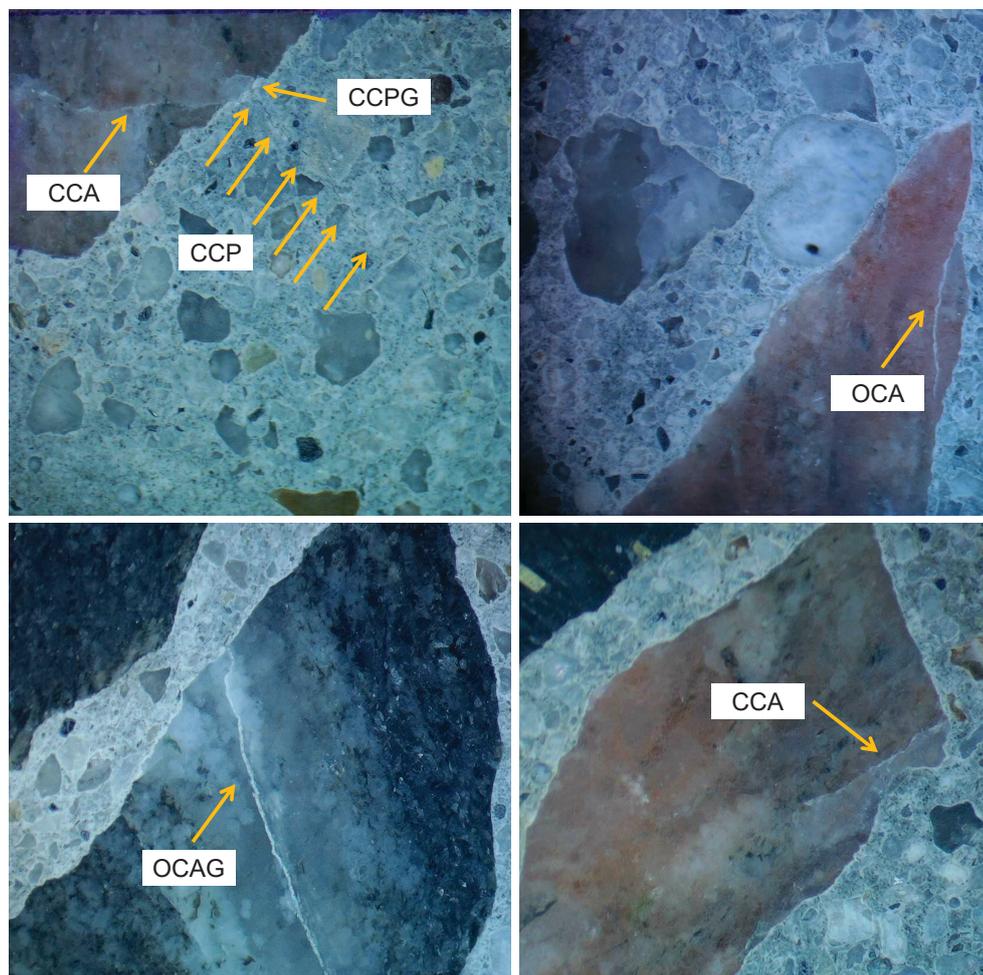
Grupo I: fissuras fechadas nas partículas de agregados graúdos ou na fração grossa das partículas de areia (1 a 5 mm) (CCA);

Grupo II: trincas abertas nas partículas de agregados graúdos ou na fração grossa das partículas de areia (1 a 5mm), com ou sem produtos de reação (OCA + OCAG);

Grupo III: trincas na pasta de cimento, com ou sem produtos de reação (CCP + CCPG).

FONTE: (SANCHEZ *et al.*, 2015) adaptado de (VILLENEUVE, 2011)

FIGURA 2.5 – Imagem representativa da técnica de DRI mostrando algumas das características petrográficas que podem ser encontradas



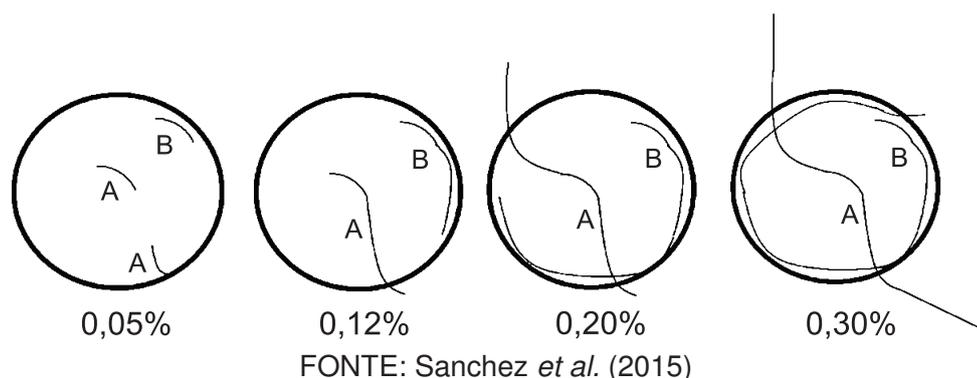
Boas correlações entre a expansão dos corpos de prova e o número obtido pela análise de DRI foram obtidas por Smaoui *et al.* (2004a), Sanchez *et al.* (2015), Sanchez *et al.* (2017). O DRI tende a aumentar com o aumento da expansão. Em relação às características de desenvolvimento da RAS, em uma gama de misturas de concreto e diferentes agregados reativos, Sanchez *et al.* (2015), Sanchez *et al.* (2017) observaram que houve aumento no aparecimento de fissuras no agregado (grupo I) em expansões menores. Esse grupo se mostrou bastante variável de acordo com o agregado utilizado na mistura. Em alguns concretos a contagem dessas fissuras não teve um aumento significativo conforme o aumento da expansão, porém em outros a tendência foi contrária. Já no decorrer da reação, conforme as trincas vão se expandindo em direção a zona de transição e à pasta de cimento, características relativas ao grupo II e na sequência do grupo III foram crescentes e bastante observadas.

A densidade das fissuras, em contagens por  $\text{cm}^2$  foi outro dado interessante retirado e observado. Este também seguiu a tendência do aumento da expansão. Tanto

a densidade de fissuras quanto o número de DRI, quando plotados em função da expansão, formaram um envelope de resultados que seguiram a mesma tendência para a maioria das combinações entre concretos e agregados estudados. A exceção ocorreu apenas em dois dos tipos de agregados, os quais apresentaram uma cinética de reação diferente, sendo que um deles desencadeia a RAC e não a RAS (SANCHEZ *et al.*, 2015). Essa tendência também foi observado por Sanchez, Drimalas e Fournier (2020) para outras reações deletérias, como as que envolvem a formação de etringita tardia (DEF) e os processos de deterioração por gelo degelo.

Baseada nas diversas observações de DRI, Sanchez *et al.* (2015) propuseram um modelo que relaciona a expansão do concreto com o desenvolvimento das fissuras e da RAS. Nos níveis mais baixos de expansão (0,05%) ocorre a formação das fissuras principalmente no interior dos agregados. Basicamente, conforme a expansão do concreto vai evoluindo, as fissuras vão se desenvolvendo no agregado até atingir a pasta (0,12%) (Figura 2.6). Nos níveis mais elevados de expansão (0,20% e 0,3%) as fissuras já se encontram na pasta e tendem a continuar se propagando, uma vez que é 'mais fácil' (menor energia despendida) para o sistema que essas fissuras continuem aumentando ao invés de gerar novas fissuras (SANCHEZ *et al.*, 2015; SANCHEZ *et al.*, 2016b). Os autores ressaltam ainda que os valores de expansão apresentados são indicativos, baseados em observações; e que a presença das fissuras tipo A e B são em decorrência do tipo de rocha e, portanto, nem sempre estão presentes simultaneamente no agregado.

FIGURA 2.6 – Modelo qualitativo do dano devido a RAA versus níveis de expansão



### 2.3.2 Teste de Dano da Rigidez (*Stiffness Damage Test*)

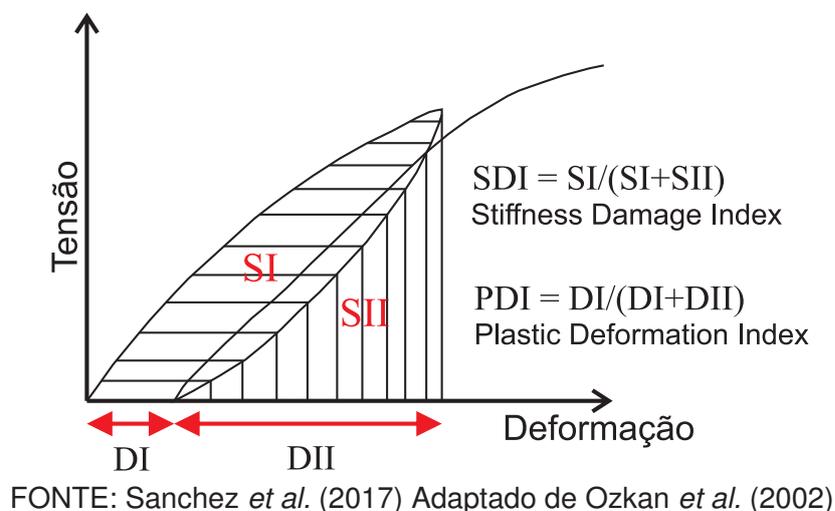
O SDT é um método que consiste em submeter um corpo de prova, que pode ser moldado em laboratório ou extraído de uma estrutura, a ciclos de aplicação de carga e descarga à compressão uniaxial.

Num panorama geral, inicialmente o método proposto por Chrisp, Waldron e Wood (1993) previa a aplicação de uma carga cíclica fixa (cinco ciclos), de 0 até 5,5 MPa, a uma taxa de 0,10 MPa/s. Os autores verificaram que o módulo de elasticidade e a área de histerese eram os melhores parâmetros para quantificar o grau de dano devido a RAS nos concretos. Concluíram também que esse ensaio não era destrutivo, podendo utilizar os corpos de prova posteriormente para outros ensaios.

Posteriormente Smaoui *et al.* (2004a) testaram outras taxas de aplicação de carga como máximas, 5, 10 e 15 MPa. A carga de 10 MPa mostrou os melhores resultados de modo geral. Os autores encontraram melhores respostas, relativas aos danos dos corpos de prova devida a RAS, na área de histerese (quantidade de energia dissipada) no primeiro ciclo e na deformação plástica registrada após os cinco ciclos. Os resultados apontaram que o tipo de agregado reativo pode ter interferência nas correlações observadas entre essas duas respostas. O que acontece nesse teste é que devido ao dano causado pela RAS, o módulo de elasticidade diminui enquanto a área de histerese aumenta devido à deformação plástica gerada, quando a carga cíclica é aplicada.

Sanchez *et al.* (2014), Sanchez *et al.* (2015), Sanchez *et al.* (2017) estudaram a aplicação das técnicas em várias misturas de concreto com agregados diferentes e também em testemunhos extraídos de estruturas acometidas com a RAS. Os resultados apontaram que o uso da carga de aplicação de 40% da resistência do concreto aos 28 dias mostrou melhor desempenho para diagnosticar o grau de dano da RAS. No caso dos testemunhos, um teste preliminar de resistência à compressão em corpos de prova retirados de locais não danificados da estrutura poderia fornecer esse dado corretamente. Os autores verificaram que ao invés de usar a área de histerese e a deformação plástica como resultados absolutos, a aplicação de dois diferentes índices como parâmetros de saída, o Índice de dano da Rigidez (SDI) e Índice de Deformação Plástica (PDI) mostraram resultados mais representativos do ponto de vista do dano no concreto causado pela reação deletéria. Esses índices baseiam-se nas diversas observações realizadas durante as investigações feitas nos corpos de prova e levam em consideração o índice de fragilidade do concreto inicialmente proposto por Okzan *et al.* (2002), no qual trazia a razão entre a energia de deformação elástica (SII) e a energia de deformação plástica (SI) (Figura 2.7) (SANCHEZ *et al.*, 2017). Verificou-se também que a partir do 5º ciclo as melhoras nos resultados eram insignificantes, adotando então esse parâmetro.

FIGURA 2.7 – Determinação do SDI e PDI com base nas respostas do SDT



Uma boa correlação entre os ensaios de DRI e SDT pôde ser observada por Sanchez *et al.* (2016a), Sanchez *et al.* (2017). Os resultados obtidos pelos autores mostraram que ambos os ensaios medem os danos causados pela RAS de forma similar e são complementares. As mesmas tendências, em relação à expansão, são vistas também para ambos os ensaios. No início da reação até um nível moderado de expansão (0,12%), há uma tendência crescente no aumento do SDT (PDI e SDI) sugerindo a formação de novas fissuras no agregado. E a partir de um segundo estágio, quando os níveis de expansão são altos, as fissuras começam a se estender para a pasta e a geração de novas fissuras é menor. Além disso, conforme a expansão avança e as fissuras aumentam, há redução nas propriedades mecânicas no concreto, como o módulo de elasticidade e resistência à tração; e os números de SDT expressam essa perda (SANCHEZ *et al.*, 2017). Inclusive essas ferramentas (SDT e DRI) têm apresentado boa correlação com a expansão em outros tipos de reações deletérias, como as que envolvem a formação de etringita tardia (DEF) e os processos de deterioração por gelo degelo, por exemplo (SANCHEZ; DRIMALAS; FOURNIER, 2020).

## 2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA - MODELOS ANALÍTICOS

A modelagem matemática surge como uma alternativa para avaliar o estado atual de uma estrutura e prever o comportamento da mesma ao longo do tempo. Uma vez que a reação álcali-sílica ocorre normalmente no longo prazo, entre 5-20 anos, a previsão de respostas estruturais bem como o desempenho de formas de mitigação da mesma propiciam o uso desse tipo de análise. Porém, o desencadeamento da

RAS acaba sendo muito mais complexo, dependendo de diversas variáveis e se desenvolvendo em nível multiescala (ESPOSITO; HENDRIKS, 2019).

Dentro do nível multiescala, a abordagem para o desenvolvimento de um modelo matemático pode ser feita com base na cinética da RAS (química) até o desencadeamento da expansão, deterioração e comportamento estrutural (PAN *et al.*, 2012; ESPOSITO; HENDRIKS, 2019). De acordo com Pan *et al.* (2012), Rajabipour *et al.* (2015), a modelagem deve ser desenvolvida visando a combinação dos efeitos em micro e macro escala, ou seja, partindo do início da reação deletéria até seu impacto final na estrutura. Porém, ainda há dificuldade em tornar o modelo tão abrangente, devido à complexidade da RAS e o número de fatores que podem influenciá-la.

Modelos matemáticos também podem ser numéricos ou analíticos (baseados em equações teóricas), sendo que os analíticos são relativamente mais simples, porém normalmente não muito precisos (RAJABIPOUR *et al.*, 2015). Já os modelos numéricos de elementos finitos podem fornecer mais detalhes sobre o desencadeamento da reação, permitindo modelagens mais complexas, porém muitas vezes necessitam de diversos parâmetros de entrada, dificultando um pouco sua aplicação na prática para diferentes estruturas.

Quando se trata do uso de modelos teóricos da RAS, esses são geralmente desenvolvidos considerando a interação entre o gel da reação álcali-sílica e a matriz de concreto, partindo de uma única partícula de agregado esférica envolta por uma camada de pasta de cimento. Esse conceito contempla uma porção infinitesimal do sistema todo, no caso do material. Essas adoções simplificam a modelagem, a partir do uso de equações, as quais predizem a expansão do elemento (BAZANT; STEFFENS, 2000; PAN *et al.*, 2012).

Um modelo para prever o comportamento da RAS ao longo do tempo, bem aceito e amplamente utilizado na comunidade científica, é o modelo de Larive (LARIVE, 1997). A partir desse modelo, vários outros foram construídos (GRAZIA *et al.*, 2021; NGUYEN *et al.*, 2022). No modelo de Larive a cinética da RAS é descrita em função de três parâmetros principais: a expansão final ou expansão última ( $\varepsilon^\infty$ ), o tempo de latência ou período inicial ( $\tau_l$ ) e as fases características ( $\tau_c$ ), sendo que cada conjunto de parâmetros são válidos para uma dada temperatura ( $\theta$ ). Mas apesar de o modelo ser bem aceito, estes três parâmetros são difíceis de determinar, uma vez que não tem um significado físico-químico muito claro, como cita Grazia *et al.* (2021). A partir do modelo de Larive, Grazia *et al.* (2021) utilizaram um banco de dados com resultados de ensaios experimentais em laboratório com objetivo de melhorar a definição destes três

parâmetros, buscando avaliar características e fatores mensuráveis que apresentam maior influência no desencadeamento da RAS. No entanto, este modelo consegue prever apenas o comportamento da expansão em corpos de prova avaliados em laboratório.

Nguyen *et al.* (2022) propôs uma abordagem semi-empírica para prever a expansão devido a RAS em concreto exposto em campo, baseada do modelo proposto por Larive (LARIVE, 1997). Neste modelo os autores utilizam dados de experimentos em laboratório e consideram alguns efeitos como a lixiviação alcalina, contribuição alcalina dos agregados e também condições ambientais, que se mostraram ter grande influência no desencadeamento da reação deletéria em campo. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, conseguindo reproduzir o comportamento de expansão em blocos de concreto expostos em diferentes locais (condições de temperatura e umidade diferentes). Entretanto, este modelo é limitado a estruturas sem restrições quanto a expansão (concreto não armado e não submetido a diferentes tensões).

Esposito e Hendriks (2019) fizeram um levantamento de modelos (analíticos e numéricos) disponíveis na literatura sobre a RAS, um total de 44. Os autores categorizaram os mesmos de acordo com a sua escala inicial, ou seja, conforme o nível em que os parâmetros iniciais são definidos. Assim é possível notar os critérios multi-escalas em que são desenvolvidos os modelos, partindo das interações químicas até a avaliação da deterioração na estrutura. A conclusão dessa abordagem mostra que existem esforços a serem despendidos ainda no que diz respeito a interação entre os fenômenos nos diversos níveis, principalmente no âmbito da análise estrutural. Muitos modelos são incipientes e não conseguem transcrever os eventos para a estrutura; explicam bem a teoria da RAS, reações químicas e difusão, mas não descrevem as consequências e perdas de propriedades reais das estruturas. Dessa forma, para que o modelo represente o correto desencadeamento da reação e suas consequências ao longo do tempo nas estruturas, vários parâmetros devem ser determinados e calibrados com base em monitoramentos em campo e testes em laboratório.

### 3 TESTE DE REATIVIDADE DOS AGREGADOS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Prever o comportamento de diversos agregados quanto a RAA e a partir disso tomar decisões quanto a construção de novas edificações seria muito mais simples se houvesse um histórico de desempenho em campo. Porém, a busca de informações sobre estruturas com uma certa idade, que tenham sido diagnosticadas com RAA e que se tem conhecimento dos materiais e proporções utilizadas na dosagem do concreto, é muito difícil. Assim, os testes em laboratório surgem como uma alternativa para a tomada de decisão sobre o uso de agregados em novas edificações.

Ensaio normatizados, como os previstos na NBR 15577 (2018), ASTM C 1260 (2014), ASTM C 1293 (2018), CAN/CSA A-23.2-25A (2014), CAN/CSA-A23.2-14A (2014), UNE 146508 (2018) e normas de outros países, já conseguem prever, antes do lançamento da construção, que o agregado a ser utilizado no concreto tem potencial reativo para desencadear ao longo do tempo a reação álcali-agregado. Estes ensaios têm sido amplamente estudados em todo o mundo com o intuito de desenvolvê-los de forma confiável e segura.

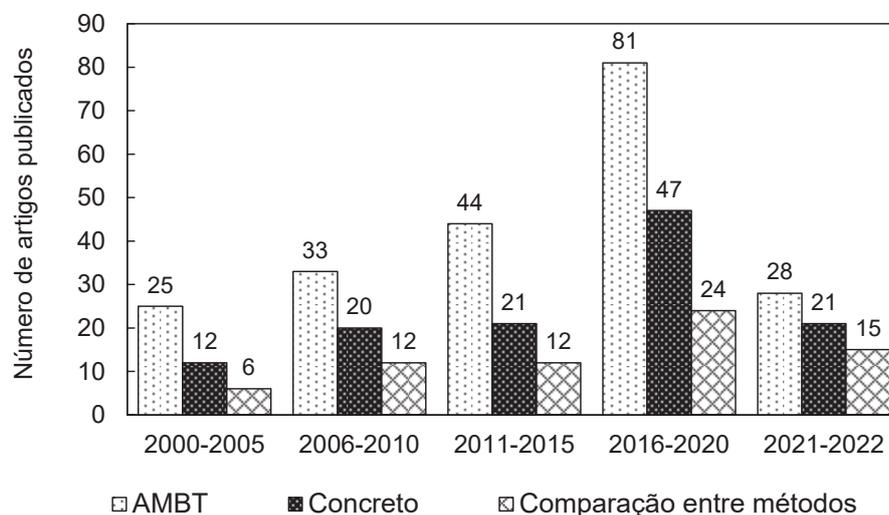
Um dos ensaios mais conhecidos e desenvolvidos em todo o mundo é o método acelerado das barras de argamassa, conhecido na literatura como AMBT (*accelerated mortar bar test*) e apontado pela norma brasileira na parte 4 (ABNT, 2018a). O AMBT consiste em avaliar a variação de comprimento de barras de argamassa a fim de verificar a ocorrência da reação álcali-sílica devido ao uso de determinado agregado em um curto espaço de tempo. Embora ele seja amplamente utilizado em todo o mundo, com variações diferentes nas normas, existem diversas críticas a respeito de seu uso devido as suas condições severas de aplicação.

De acordo com a pesquisa realizada pelos autores Golmakani e Hooton (2016), apenas 5 de 13 agregados estudados pelo método AMBT foram identificados corretamente, sendo que os demais geraram resultados falsos-positivos e falsos-negativos. Os testes foram realizados de acordo com as normas canadense e americana (CSA A23.2-25A, ASTM C1260 e ASTM C1567), nas quais o limite de expansão das barras aos 14 dias é de 0,10%. Os agregados utilizados eram originários do Canadá, Estados Unidos e Alemanha. As críticas deste ensaio é que certos tipos de agregados tem reação muito diluída ao longo do tempo tornando alguns resultados incorretos, ou

seja, falsos-negativos (aqueles agregados que se manifestam inicialmente inofensivos, mas ao longo do tempo mostram potencial reativo) e falsos-positivos (aqueles cujo resultado descarta, mas poderiam ser utilizados sem problemas aos elementos de concreto) (THOMAS *et al.*, 2006; ALAEJOS *et al.*, 2014; GOLMAKANI; HOOTON, 2016; FIGUEIRA *et al.*, 2019; FANIJO; KOLAWOLE; ALMAKRAB, 2021). O teste é severo demais para agregados com boa performance e não deveria ser usado para rejeitar agregados, apenas para aceitá-los (FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000). Além disso, o teor de álcalis utilizado para produzir uma expansão neste teste é muito maior que a exigida no método dos prismas de concreto, acabando por gerar resultados não totalmente confiáveis (THOMAS *et al.*, 2006).

Uma revisão sistemática realizada, em 3 bases de dados *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*, a partir da combinação das palavras-chave "*accelerated mortar bar test*"(AMBT), "*concrete prism test*"(CPT), "*alkali-aggregate reaction*" e "*alkali-silica reaction*", identificou o uso do ensaio acelerado de barras de argamassa como base para estudos experimentais em artigos publicados em periódicos. Um corte temporal foi feito entre os anos de 2000 e 2022 para uma amostragem, além disso artigos relacionados a outros tipos de reações internas foram descartados. A Figura 3.1 mostra uma abordagem geral em que o teste AMBT é considerado como principal método de decisão da expansão (primeira coluna do gráfico) em contrapartida ao outro ensaio em concreto (segunda coluna). A terceira coluna contempla os experimentos que utilizaram os dois testes para comparação. Nota-se nesse gráfico que a quantidade de artigos publicados realizados sobre a RAS é crescente nos últimos anos e, além disso, se observa que o teste em barras de argamassa ainda é muito empregado em estudos.

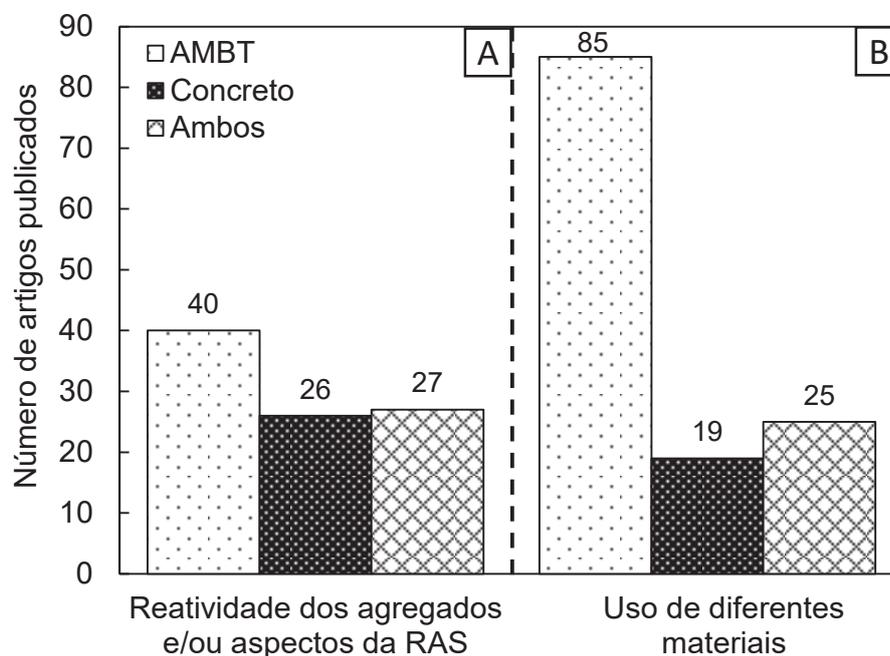
FIGURA 3.1 – Artigos publicados em periódicos entre os anos de 2000 e abril de 2022 relacionados a RAS e ao uso dos ensaios AMBT (em argamassa), CPT e ACPT (em concreto) e artigos que comparam o ensaio em argamassa com ensaios em concreto



Uma separação foi realizada nos artigos levantados pela revisão sistemática com a finalidade de entender o uso do ensaio AMBT. A Figura 3.2 mostra na primeira parte (A) os trabalhos relacionados a avaliar a reatividade de agregados ou o desenvolvimento da RAS sem qualquer outro tipo de material mitigador; já na segunda parte (B) mostra trabalhos relacionados a influência de diferentes materiais quanto a evolução da RAS, em grande parte adições minerais. Foram excluídos os artigos relacionados a testar condições dos ensaios, como, por exemplo, variação da concentração da solução ou temperatura.

Apesar dos vários apontamentos feitos pelos diversos pesquisadores, a conclusão é que o AMBT acaba sendo o método mais difundido em todo o mundo e ainda é muito empregado, principalmente quando se trata de testes em materiais com potencial mitigador da RAS. Já quando se trata da reatividade de agregados, é comum os estudos apontarem um segundo ensaio para confirmação. Neste contexto, Figueira *et al.* (2019) comentam que o método AMBT é de fácil operação e permite uma avaliação de grande parte dos agregados quanto a reatividade. Ademais, a partir desse teste e dos limites disponíveis nas normas é possível obter uma classificação preliminar dos agregados, já que o teste em prismas de concreto, conhecido como CPT (*concrete prism test*) demora pelo menos 1 ano.

FIGURA 3.2 – Artigos publicados em periódicos entre os anos de 2000 e abril de 2022 sobre o uso dos métodos AMBT e CPT para a investigação da reatividade de agregados e para o uso de materiais mitigadores



O problema em questão é que o método AMBT, em muitos casos, não é usado como uma simples classificação preliminar da RAS e sim como o ensaio principal e definitivo. Diante deste panorama, diversas pesquisas buscaram modificações nos testes já padronizados, com o objetivo de sanar os problemas existentes, trazendo uma resposta mais rápida de reatividade dos agregados (SHON; ZOLLINGER; SARKAR, 2002; THOMAS *et al.*, 2006; SANCHEZ; KUPERMAN; HELENE, 2011; ALAEJOS *et al.*, 2014). Neste contexto, Sanchez (2008), Sanchez, Kuperman e Helene (2011) desenvolveram o método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT). A ideia desse método foi justamente tentar acelerar os resultados de reatividade dos agregados em concreto (28 dias) utilizando apenas a temperatura como fator de aceleração. Diferente do método AMBT, considerado com um ambiente altamente agressivo, devido à alta temperatura e imersão em solução alcalina de 1N NaOH e; com o objetivo de reduzir os problemas decorrentes de lixiviação que existem no método CPT; o método ABCPT buscou trabalhar no equilíbrio entre o ambiente interno (corpo de prova) e o externo (solução na qual os corpos de prova ficam imersos). Assim, neste método, são moldados corpos de prova de concreto com adição de NaOH em sua composição (a fim de elevar o  $\text{Na}_2\text{O}_{eq}$  para 1,25%). Após a cura, os corpos de prova são imersos em uma solução de 0,3125N NaOH na temperatura de 80°C. Os resultados obtidos utilizando este método foram satisfatórios se comparados ao CPT

(correlação de 89%).

Dentro do exposto, o objetivo deste capítulo foi produzir diretrizes para a escolha dos agregados que foram utilizados em todo o desenvolvimento do programa experimental da pesquisa. Para tanto, os agregados utilizados foram ensaiados a partir de 4 testes, e seus resultados foram comparados. Utilizou-se o teste acelerado de barras de argamassa (AMBT), o método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT), o método acelerado de prismas de concreto (ACPT) e o método de prismas de concreto (CPT). Tanto o AMBT, como o ACPT e o CPT, são métodos normatizados pela NBR 15577(2018). Com base nos resultados encontrados, foram então selecionados os agregados para o desenvolvimento do restante da tese. Cabe ressaltar que no programa experimental dos capítulos subsequentes foi utilizado o CPT como método para aceleração da RAS nos corpos de prova.

## 3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 3.2.1 Materiais

Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizado CPV-ARI. A NBR 15577 parte 4 (ABNT, 2018a) aponta a utilização de cimento padrão para o ensaio, porém não há disponibilidade do mesmo. Dessa forma, as características químicas e físicas do cimento utilizado bem como os requisitos exigidos pela norma estão descritos na Tabela 3.1. O CPV apresentou características próximas ao requisitado pela norma, sendo escolhido por conter apenas 10% de material carbonático e nenhuma outra adição. O cimento foi peneirado na peneira 850  $\mu\text{m}$  para utilização, como prescreve a NBR 15577-4 (ABNT, 2018a).

TABELA 3.1 – Características físicas, químicas e requisitos exigidos pela NBR15577:2018 para o cimento

		CPV-ARI <sup>1</sup>	Requisitos exigidos	Norma relacionada <sup>2</sup>
Ensaaios químicos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,3	-	
	SiO <sub>2</sub> (%)	18,18	-	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,91	-	
	CaO (%)	61,52	-	
	MgO (%)	2,35	≤ 6,5	NBR 16697:2018
	SO <sub>3</sub> (%)	3,08	≤ 4,5	NBR 16697:2018
	P.F. (%)	6,06	≤ 6,5	NBR 16697:2018
	Cal livre (%)	0,91	-	
	R.I. (%)	1,21	≤ 3,5	NBR 16697:2018
	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> (%)	0,72	0,90±0,10	NBR NM 17:2012
	Expansão a quente (mm)	0,17	≤ 5	NBR 16697:2018
	Início de pega (min)	203	≥ 60	NBR 16697:2018
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4600	4900±200	NBR 16372:2015
	Finura (75 μm) (%)	0,02	≤ 6,0	NBR 16697:2018
Resistência mecânica (MPa)	1 dia	22,5	≥ 14,0	NBR 16697:2018
	3 dias	38,9	≥ 24,0	NBR 16697:2018
	7 dias	45,0	≥ 34,0	NBR 16697:2018

<sup>1</sup>Dados fornecidos pelo fabricante.

<sup>2</sup>Normas apontadas pela NBR 15577:2018 para conferência dos requisitos.

Foram utilizados 4 diferentes agregados graúdos para teste de reatividade. A classificação dos mesmos e características físicas estão descritas na Figura 3.3. Para o teste dos agregados graúdos em concreto usou-se areia padrão do IPT.

FIGURA 3.3 – Agregados utilizados

**AGREGADO G1**

Gnaiss

Massa específica (g/cm<sup>3</sup>): **2,59**Massa unitária estado seco compactado (g/cm<sup>3</sup>): **1,50**Absorção: **1,0%**Teor de material pulverulento: **0,34%****AGREGADO G2**

Granito

Massa específica (g/cm<sup>3</sup>): **2,73**Massa unitária estado seco compactado (g/cm<sup>3</sup>): **1,54**Absorção: **0,14%**Teor de material pulverulento: **0,06%****AGREGADO B1**

Basalto

Massa específica (g/cm<sup>3</sup>): **2,75**Massa unitária estado seco compactado (g/cm<sup>3</sup>): **1,68**Absorção: **1,3%**Teor de material pulverulento: **1,21%****AGREGADO B2**

Basalto

Massa específica (g/cm<sup>3</sup>): **2,81**Massa unitária estado seco compactado (g/cm<sup>3</sup>): **1,67**Absorção: **0,9 %**Teor de material pulverulento: **0,31%**

## 3.2.2 Proporções das misturas e teste acelerado das barras de argamassa (AMBT)

O traço utilizado para a mistura das argamassas foi 1:2,25:0,47 (cimento: agregado miúdo: relação água/aglomerante) de acordo com a NBR 15577 parte 4 (ABNT, 2018a). Todos os agregados foram inicialmente preparados utilizando o moinho de bolas Los Angeles e posteriormente divididos nas frações granulométricas requeridas pela norma.

Após a mistura dos materiais, foram preparados 5 corpos de prova prismáticos para cada série, nas dimensões de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm. Após a moldagem, todos os corpos de prova foram submetidos a cura em câmara úmida por 24 horas. Após a desmoldagem, os corpos de prova de cada série foram submetidos as condições especificadas pela norma, 24h em água a 80±2°C e posterior imersão em solução de

hidróxido de sódio (1N NaOH) a  $80 \pm 2$  °C durante 28 dias.

As leituras de expansão nas barras foram realizadas antes da imersão na solução de NaOH (inicial) e 3 vezes na semana durante todo o período do ensaio. A expansão induzida foi medida comparando-se a medida inicial e a medida realizada ao longo do período de exposição.

### 3.2.3 Proporções das misturas para os testes em concreto e condições de ensaio

O método de dosagem e mistura segue o preconizado pelo teste em prismas de concreto (CPT) prescrito pela NBR 15577 parte 6 (ABNT, 2018b). Para a dosagem a norma específica alguns requisitos:

- consumo de cimento de  $420 \pm 10$  kg/m<sup>3</sup>
- relação água/cimento (a/c) de 0,45
- volume de agregado gráudo, no estado compactado seco, deve ser de  $(70,0 \pm 0,2)\%$  do volume total do concreto

Dessa forma o procedimento de dosagem foi realizado de acordo com o método da ABCP/ACI (método de dosagem proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland adaptado da *American Concrete Institute*) (Anexo A). Para o cálculo, adotou-se consumo de cimento de 420 kg/m<sup>3</sup> e relação a/c de 0,45. A distribuição granulométrica dos agregados utilizados seguiu as prescrições na NBR 15577-6 (ABNT, 2018b), a qual divide o total de agregados em 1/3 para cada granulometria: 12,5; 9,5 e 4,75 mm. A massa específica da areia padrão do IPT obtida foi de 2,62 g/cm<sup>3</sup>. A Tabela 3.2 mostra o consumo de materiais em kg/m<sup>3</sup> de concreto. Ressalta-se que o volume de agregados foi mantido constante em todos os concretos moldados.

TABELA 3.2 – Consumo de materiais para concreto (Kg/m<sup>3</sup>)

Tipos	cimento	areia IPT	brita	água
Agregado G1	420	706	1050	189
Agregado G2	420	734	1078	189
Agregado B1	420	647	1176	189
Agregado B2	420	680	1167	189

Foram confeccionados 3 prismas de concreto para cada agregado ensaiado, nas dimensões de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm. Foi adicionado NaOH na água de amassamento, com a finalidade de atingir o equivalente alcalino ( $\text{Na}_2\text{O}_{eq}$ ) de 1,25%, como prescrito na norma.

Para 6 litros de concreto foram necessários 2,4 Kg de cimento. Sendo o equivalente alcalino do cimento de 0,72%, tem-se um total de 17,5 gramas de álcalis. Para atingir 1,25% foi necessário adicionar 12,8 g de álcalis. Sendo o peso molecular do  $\text{Na}_2\text{O}$  de 61,98 e o peso molecular do NaOH de 39,997 e sabendo que  $\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH}$ , o fator de conversão de  $\text{Na}_2\text{O}_{eq}$  para NaOH é 1,291. Dessa forma, foi necessário adicionar 16,6 g de NaOH à água de amassamento para cada mistura.

Após a moldagem os corpos de prova permaneceram 24 horas em câmara úmida e, após, os prismas seguiram para as condições relativas a cada ensaio (ABCPT, ACPT e CPT). Estas condições são descritas abaixo.

### 3.2.3.1 Método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT)

Após a desmoldagem os prismas foram imersos em água e colocados em estufa a 80 °C por 24 horas. Passado esse período, a leitura inicial foi realizada com o auxílio do relógio comparador e na sequência os corpos de prova foram submersos em solução de NaOH e colocados em estufa a 80 °C. Os prismas permaneceram nessas condições durante 30 dias e leituras nesse período foram realizadas; uma vez por semana e sempre no mesmo dia e horário. Nesse mesmo período é realizada a pesagem e avaliação visual das amostras.

A solução de NaOH a qual os corpos de prova foram inseridos visou a não ocorrência da difusão entre o meio externo (solução) e o interno (concreto) (SANCHEZ, 2008; SANCHEZ; KUPERMAN; HELENE, 2011). Assim, o ensaio acaba sendo acelerado apenas pela elevada temperatura e não pela solução. Para tanto o equivalente alcalino interno deve ser igual ao externo (1,25%), logo a solução externa de NaOH deve ter molaridade de 0,3125N (SANCHEZ, 2008; SANCHEZ; KUPERMAN; HELENE, 2011).

A avaliação do teste acelerado em prismas de concreto foi baseado nos estudos de Sanchez (2008), Sanchez, Kuperman e Helene (2011), os quais utilizaram a comparação desse método (ABCPT) com o CPT e, portanto, os limites estabelecidos pelo mesmo. Sendo assim, a classificação dos concretos em um ano de ensaio, pelo método CPT, é a mesma realizada aos 28 dias pelo ABCPT.

### 3.2.3.2 Método acelerado de prismas de concreto (ACPT)

Após a desmoldagem, foi realizada a leitura inicial dos prismas com o auxílio do relógio comparador e a aferição da massa inicial. Na sequência, os mesmos foram

alocados em recipientes fechados. Esses recipientes foram preparados para o ensaio conforme especificações da NBR 15577-7 (ABNT, 2008c). Uma camada de água de altura de  $(30\pm 5)$ mm acima do fundo é mantida durante todo o ensaio e os corpos de prova não entram em contato com a água e nem com as laterais dos recipientes.

Para o ACPT os recipientes ficaram dispostos em ambiente com temperatura controlada de  $60\pm 2$ °C, local este que permanecem até a data das medições. A retirada dos recipientes seguiu as especificações da NBR 15577-7 (ABNT, 2018c), sendo que os mesmos foram retirados  $24\pm 1$ h antes para estabilização da temperatura com o ambiente. Os corpos de prova são lidos quanto à variação linear dimensional e sua massa é aferida utilizando uma balança. Após a avaliação, todos os corpos de prova são recolocados nos recipientes invertendo a posição em relação ao armazenamento anterior, seguindo novamente para as condições de ensaio. Os prismas permaneceram nessas condições durante 20 semanas.

### 3.2.3.3 Método de prismas de concreto (CPT)

As condições do ensaio do CPT são as mesmas do ACPT exceto a temperatura do ambiente controlado em que os recipientes são inseridos, que neste caso é de  $38\pm 2$ °C. Os corpos de prova foram mantidos neste local até a data das medições. Para as leituras, os mesmos eram retirados  $18\pm 2$ h antes para estabilização da temperatura com o ambiente. Os corpos de prova são lidos quanto à variação linear dimensional e sua massa é aferida utilizando uma balança. E, após, todos os corpos de prova são recolocados nos recipientes invertendo a posição em relação ao armazenamento anterior, seguindo novamente para as condições de ensaio. Os prismas permaneceram nessas condições durante 1 ano.

## 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do teste acelerado em barras de argamassa e em prismas de concreto podem ser vistos nas Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.

FIGURA 3.4 – Média das expansões das argamassas ao longo do tempo - ensaio AMBT de acordo com a NBR 15577-4 (2018)

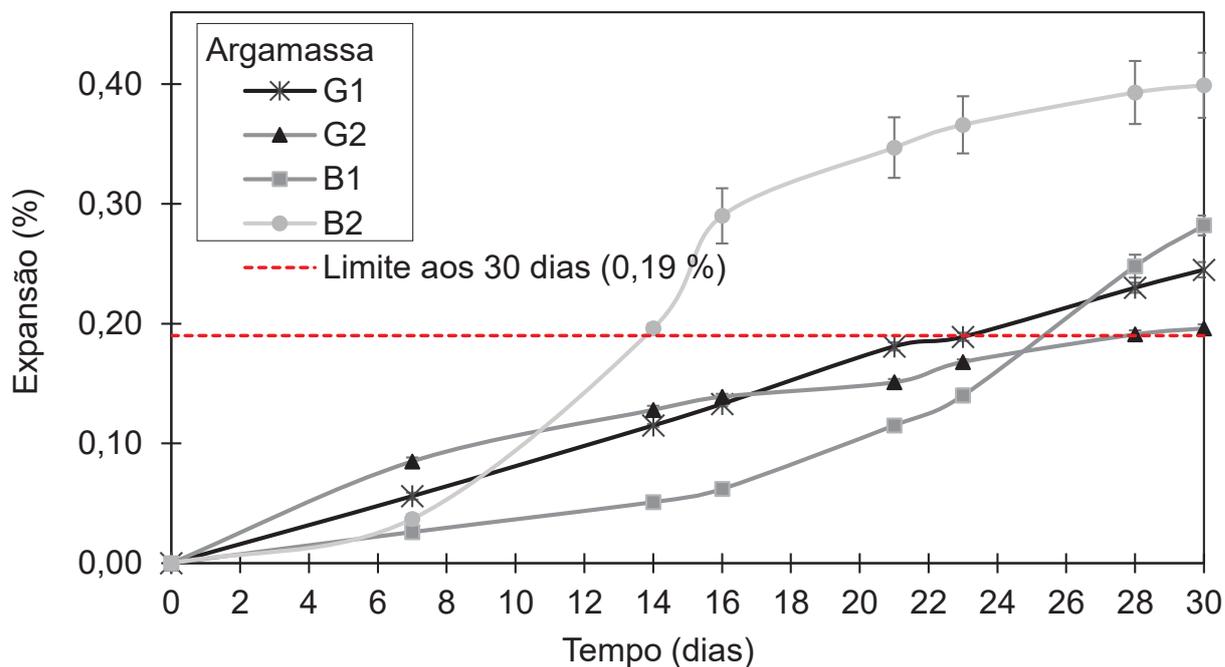


FIGURA 3.5 – Média das expansões dos concretos ao longo do tempo - ensaio ABCPT (T=80 °C)

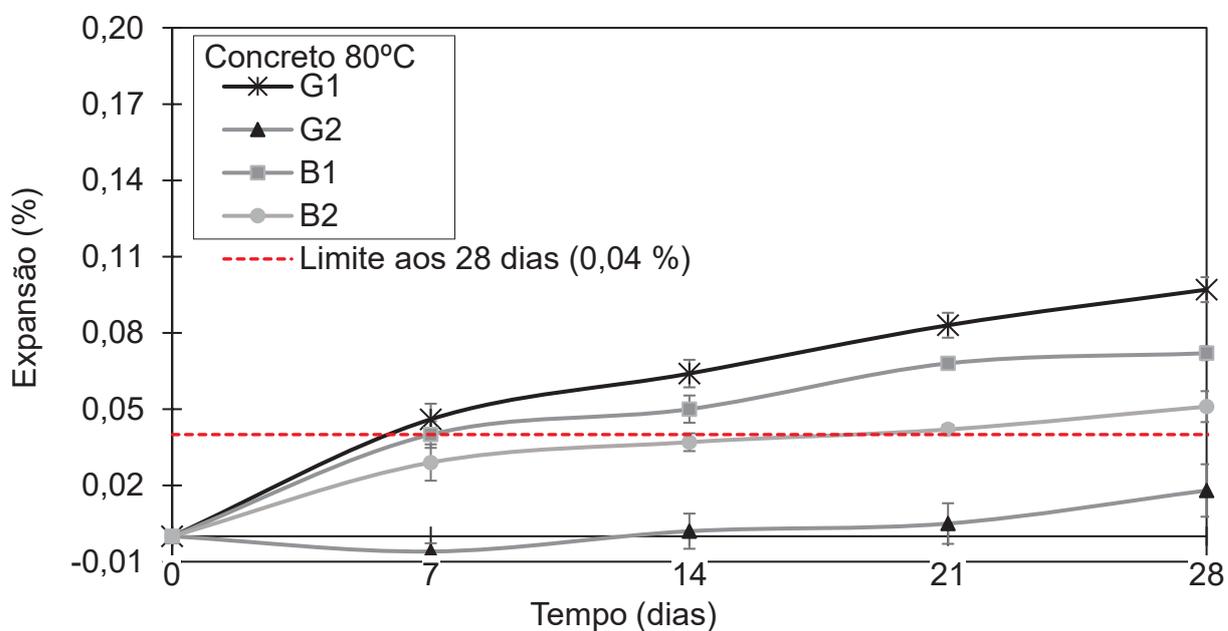


FIGURA 3.6 – Média das expansões dos concretos ao longo do tempo - ensaio ACPT (T=60°C) de acordo com a NBR 15577-7 (2018)

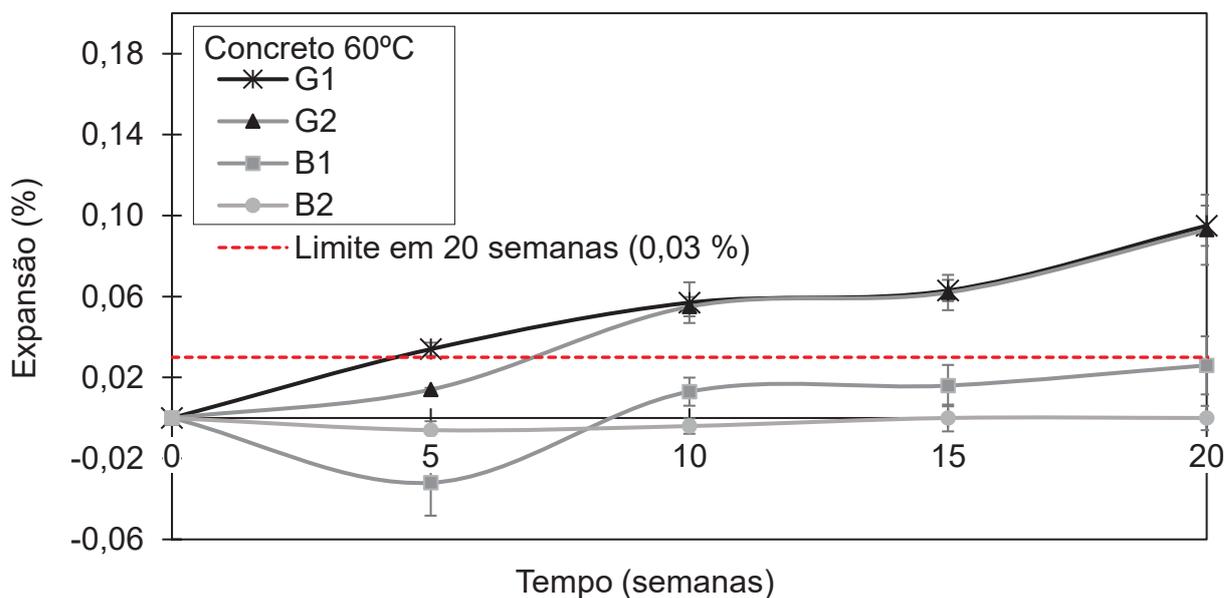
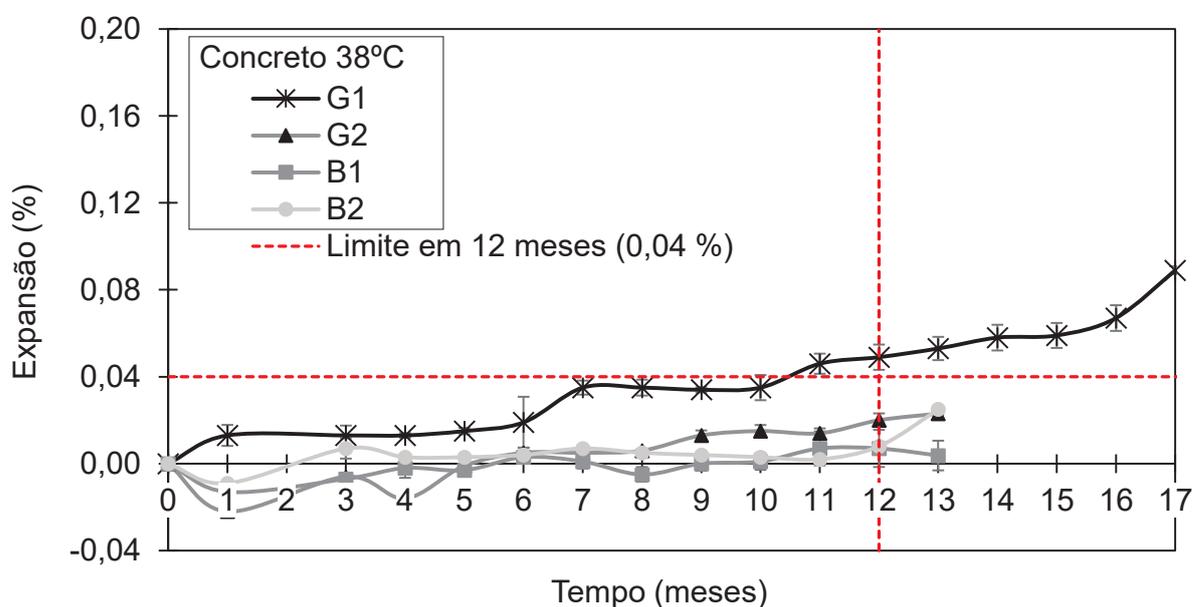


FIGURA 3.7 – Média das expansões dos concretos ao longo do tempo - ensaio CPT (T=38°C) de acordo com a NBR 15577-6 (2018)



A NBR 15577-1 (ABNT, 2018) considera o agregado potencialmente inócuo quando a expansão das barras de argamassa não ultrapassa 0,19% aos 30 dias. No concreto, a mesma aponta o limite de 0,04% ao final de 365 dias para o ensaio CPT e o limite de 0,03% ao final de 20 semanas, no caso do ACPT. Além disso, a norma

indica três diferentes classificações quando o agregado ultrapassa os limites previstos para o AMBT e CPT conforme o grau de expansão (R1, R2 e R3).

Dos agregados testados, apenas o G1 mostrou potencial reativo em todos os ensaios. De acordo com a classificação dada pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018), este agregado pode ser classificado na faixa de potencialmente reativo grau R1. Essa faixa abrange expansões que vão de 0,19% a 0,40% para as barras de argamassa, e de 0,04% a 0,12% para o concreto. O agregado B2, no teste de barras de argamassa, apresentou sua expansão média máxima (0,40%) no limite dessa classificação.

Como pode ser observado na Figura 3.4 o agregado B2 teve sua curva de expansão acentuada no ensaio AMBT, porém quando testado em concreto ele mostrou potencial reativo inferior aos demais. O mesmo aconteceu com o agregado B1. Já o agregado G1 foi um dos que resultou em menores expansões na argamassa, contrapondo os ensaios em concreto.

O agregado G2 apresentou potencial reativo no ensaio de barras de argamassa e também no ensaio a ACPT, obtendo valores bem próximos aos do agregado G1. Entretanto, quando o mesmo foi ensaiado nas condições do CPT, aos 365 dias os resultados foram inferiores ao limite da norma. Os resultados das expansões obtidos em cada corpo de prova, para todos os ensaios, estão contidos no Anexo B.

Para a comparação entre os ensaios foi utilizado um gráfico com quatro quadrantes, onde foram comparados os valores médios de expansão nas idades finais de avaliação, ou seja, nas datas limites. De acordo com (SANCHEZ; KUPERMAN; HELENE, 2011) o primeiro e o terceiro quadrantes (1º e 3º inócuo ou reativo?) indicam haver discordância entre os resultados obtidos nos ensaios. Já o segundo e o quarto (2º potencialmente reativo e 4º inócuo, indicados com hachuras nos gráficos) indicam concordância na classificação. Estas comparações entre os ensaios AMBT, ABCPT e ACPT com o CPT podem ser observadas nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10.

FIGURA 3.8 – Comparação entre as expansões médias obtidas nos ensaios CPT e AMBT

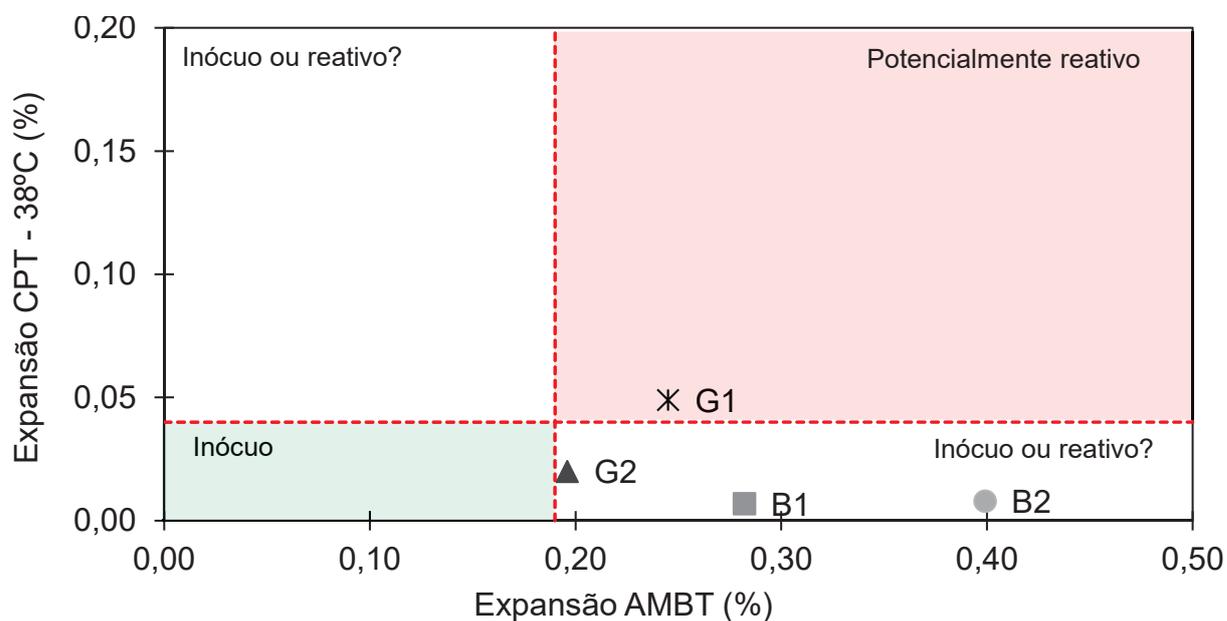


FIGURA 3.9 – Comparação entre as expansões médias obtidas nos ensaios CPT e ABCPT

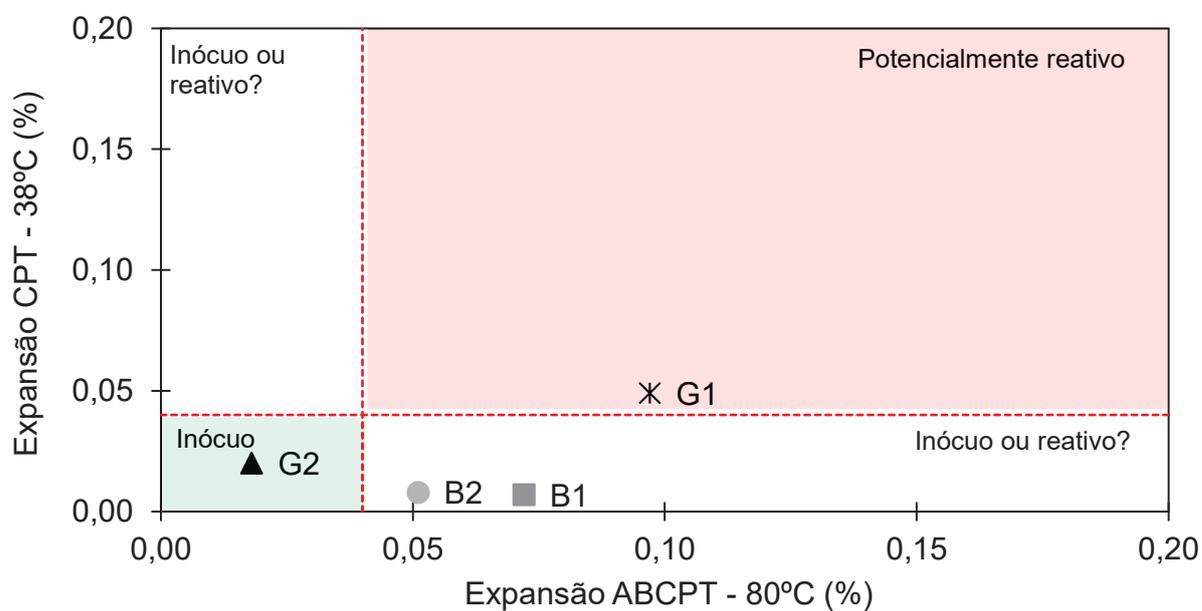
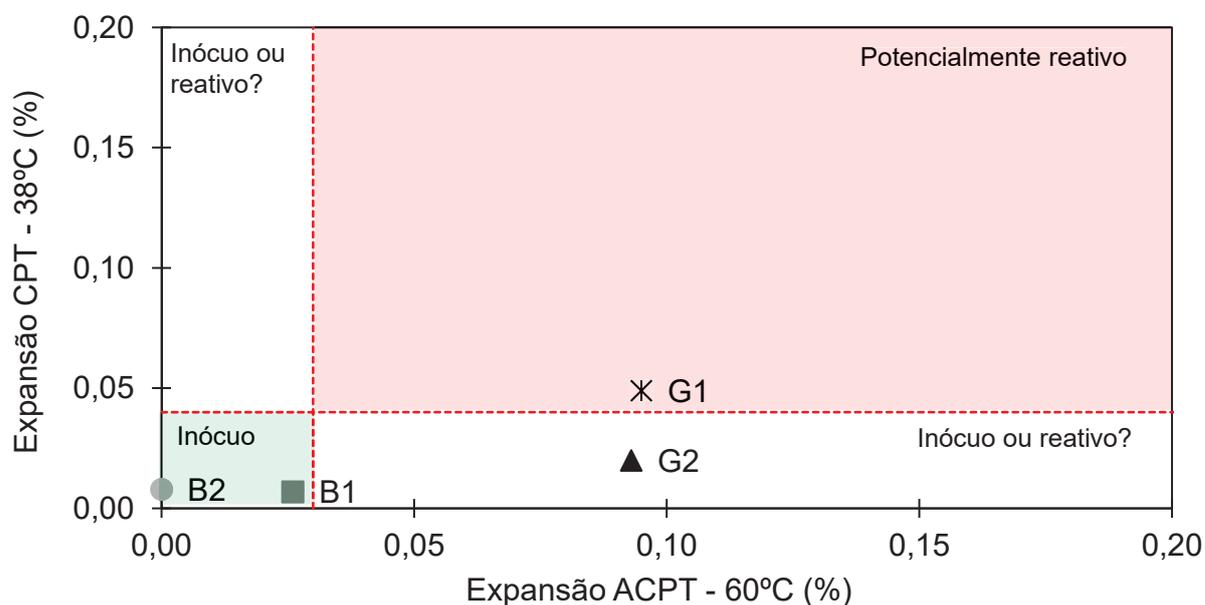


FIGURA 3.10 – Comparação entre as expansões médias obtidas nos ensaios CPT e ACPT



Interessante observar que houve discrepância entre os resultados obtidos para os agregados G2, B1 e B2 nos ensaios. Quando os mesmos foram ensaiados em concreto, para as diferentes variações do ensaio, nenhum foi consistente em apresentar potencial reativo. Além disso, é possível observar também que utilizar apenas o ensaio em barras de argamassa pode levar a uma classificação errônea sobre o agregado. Ressalta-se assim a tendência de o ensaio AMBT apontar um falso positivo, como já mencionado por outros autores (THOMAS *et al.*, 2006; SANCHEZ *et al.*, 2007; ALAEJOS *et al.*, 2014; GOLMAKANI; HOOTON, 2016), e a importância de avaliar o potencial reativo dos agregados a partir dos ensaios em concreto.

De acordo com Hasparyk (2022) basaltos testados em ensaios acelerados (como no caso do AMBT), de modo geral, apresentam potencial reativo, causando expansões elevadas nos corpos de prova. Entretanto, quando esses agregados são testados em campo, a quantidade de sílica presente nos mesmos parece não estar disponível o suficiente para causar tais expansões. Além disso, a autora relata ainda que não há qualquer registro no Brasil de casos de RAS em obras envolvendo agregados do tipo basalto.

Na Tabela 3.3 é possível observar a classificação dos agregados de acordo com os ensaios.

TABELA 3.3 – Classificação geral dos agregados conforme os ensaios realizados

	Agregado G1	Agregado G2	Agregado B1	Agregado B2
AMBT <sup>1</sup>	potencialmente reativo	potencialmente reativo	potencialmente reativo	potencialmente reativo
ABCPT <sup>2</sup>	potencialmente reativo	inócuo	potencialmente reativo	potencialmente reativo
ACPT <sup>1</sup>	potencialmente reativo	potencialmente reativo	inócuo	inócuo
CPT <sup>1</sup>	potencialmente reativo	inócuo	inócuo	inócuo

<sup>1</sup>NBR 15577 (2018)

<sup>2</sup>Sanchez (2008), Sanchez, Kuperman e Helene (2011)

As Figuras 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 mostram a variação de massa dos corpos de prova durante os ensaios de AMBT, ABCPT, ACPT e CPT, respectivamente.

FIGURA 3.11 – Variação de massa das argamassas ao longo do tempo - ensaio AMBT de acordo com a NBR 15577-4 (2018)

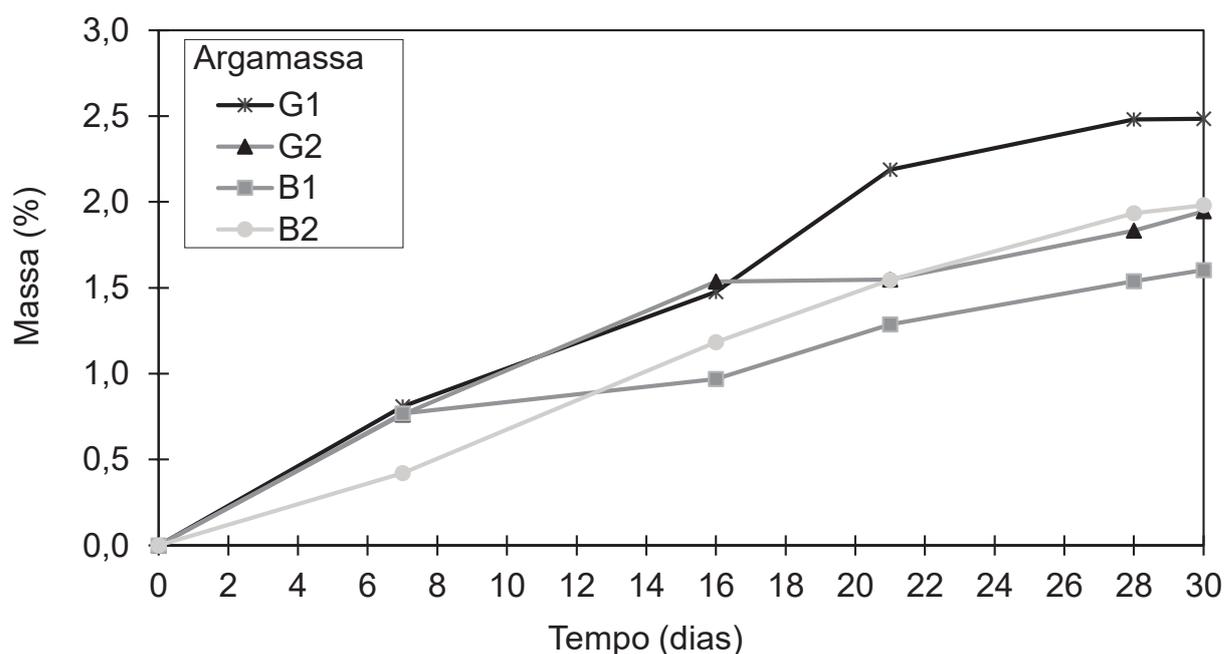


FIGURA 3.12 – Variação de massa dos concretos ao longo do tempo - ensaio ABCPT (T=80°C)

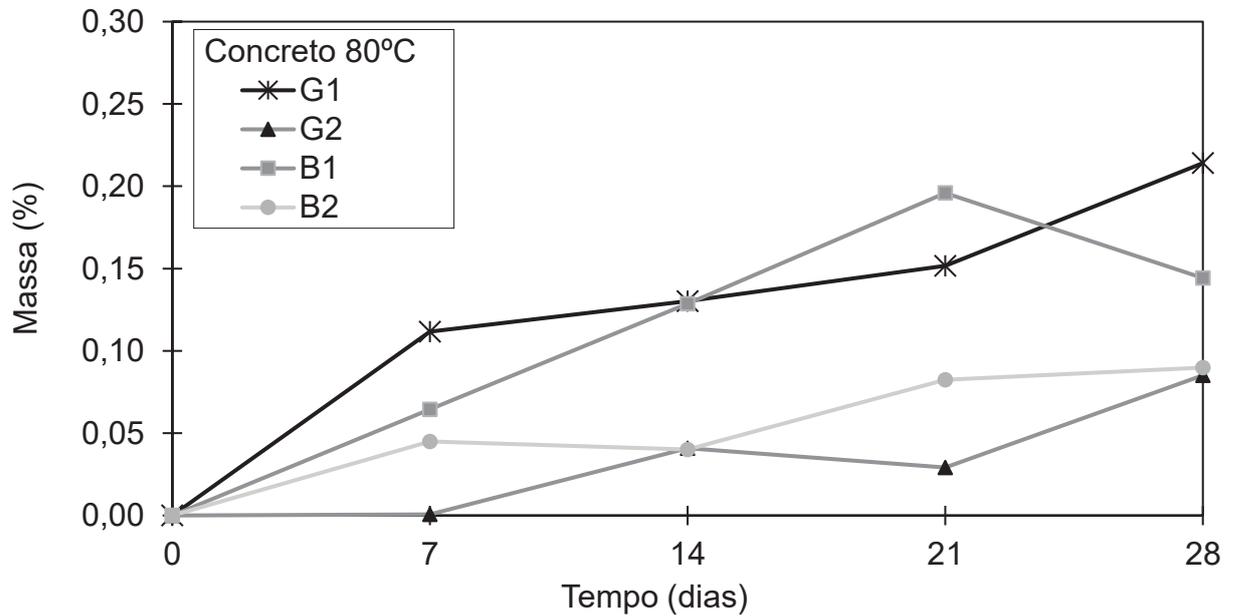


FIGURA 3.13 – Variação de massa dos concretos ao longo do tempo - ensaio CPT (T=60°C) de acordo com a NBR 15577-7 (2018)

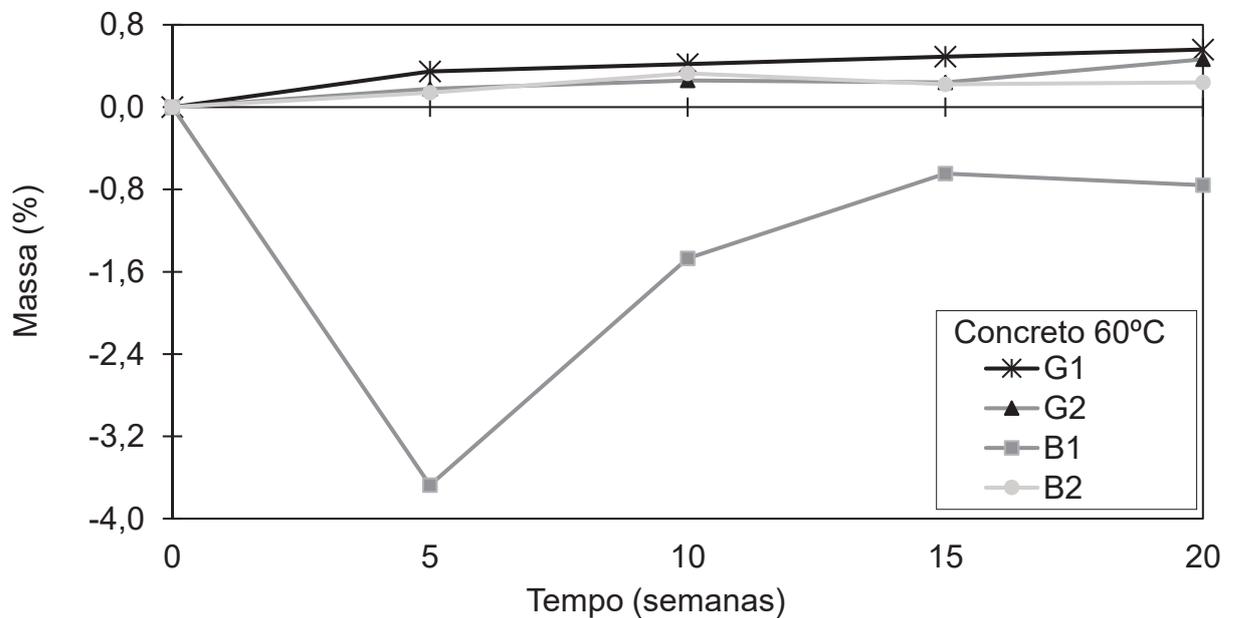
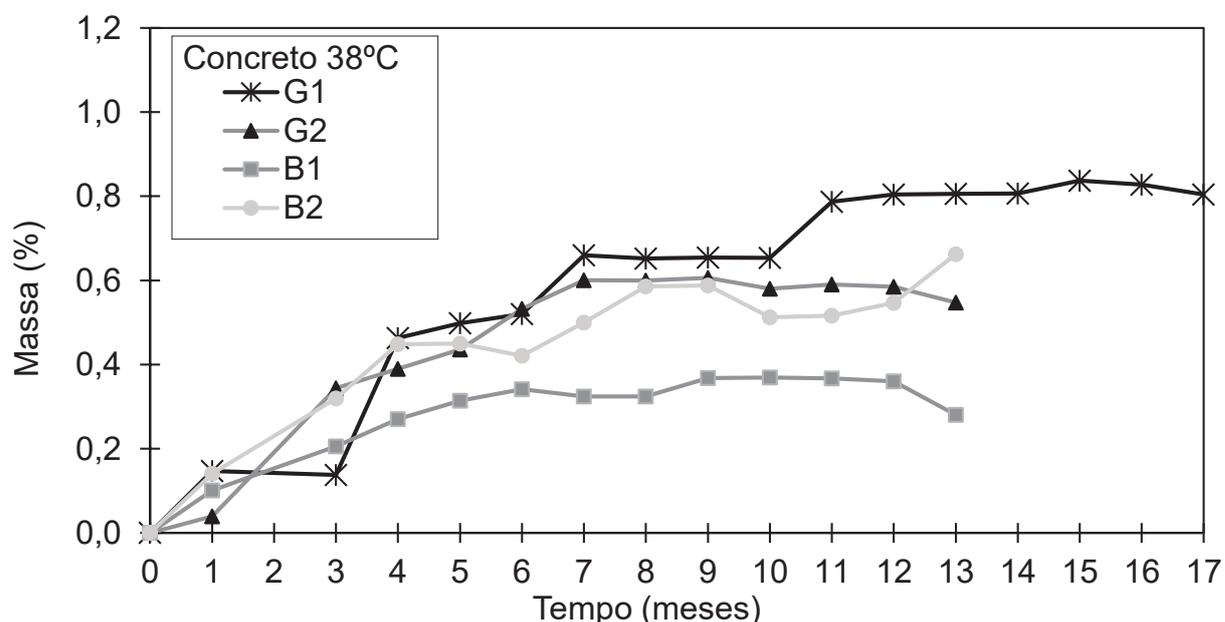


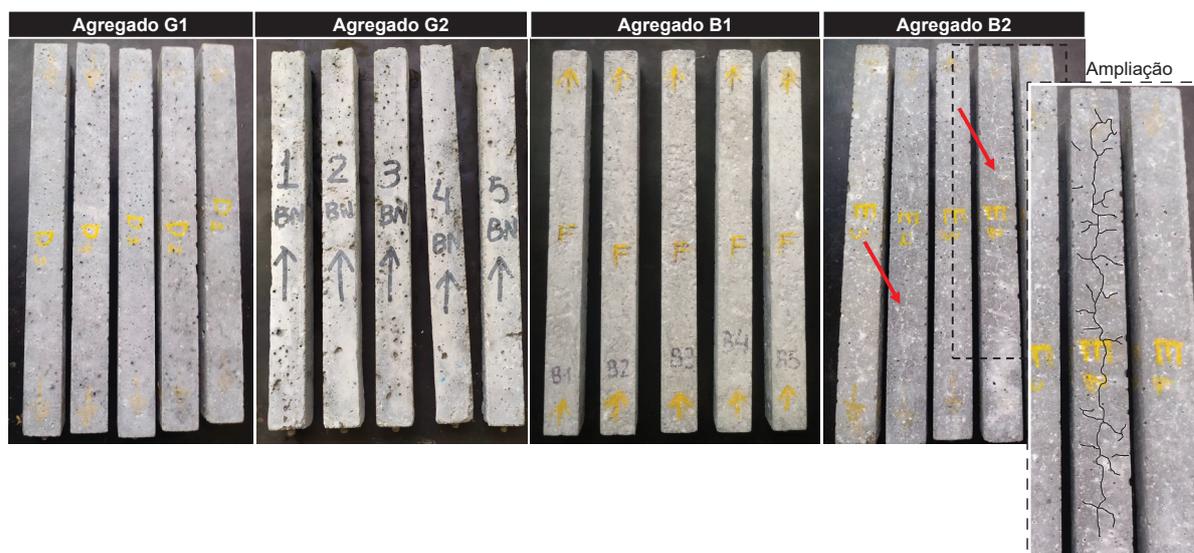
FIGURA 3.14 – Variação de massa dos concretos ao longo do tempo - ensaio CPT (T=38°C) de acordo com a NBR 15577-6 (2018)



Nota-se que para todos os ensaios, em concreto e argamassa, as amostras com agregado G1 foram as que apresentaram a maior variação de massa durante todo o período de acompanhamento. Para os concretos, a tendência de aumento de massa seguiu de acordo com as expansões médias obtidas no ensaio. Já para as argamassas, o maior ganho de massa ocorreu nos corpos de prova com agregado G1, sendo que os mesmos apresentaram expansões médias menores que os agregados B1 e B2 nesse teste. Esse comportamento no aumento de massa também foi observado por Fournier *et al.* (2004). Porém, é importante destacar que o maior ganho de massa inicial pode estar relacionado também à absorção de água pelos corpos de prova. Os dados relativos às massas das argamassas e concretos de todos os corpos de prova estão contidos no Anexo B.

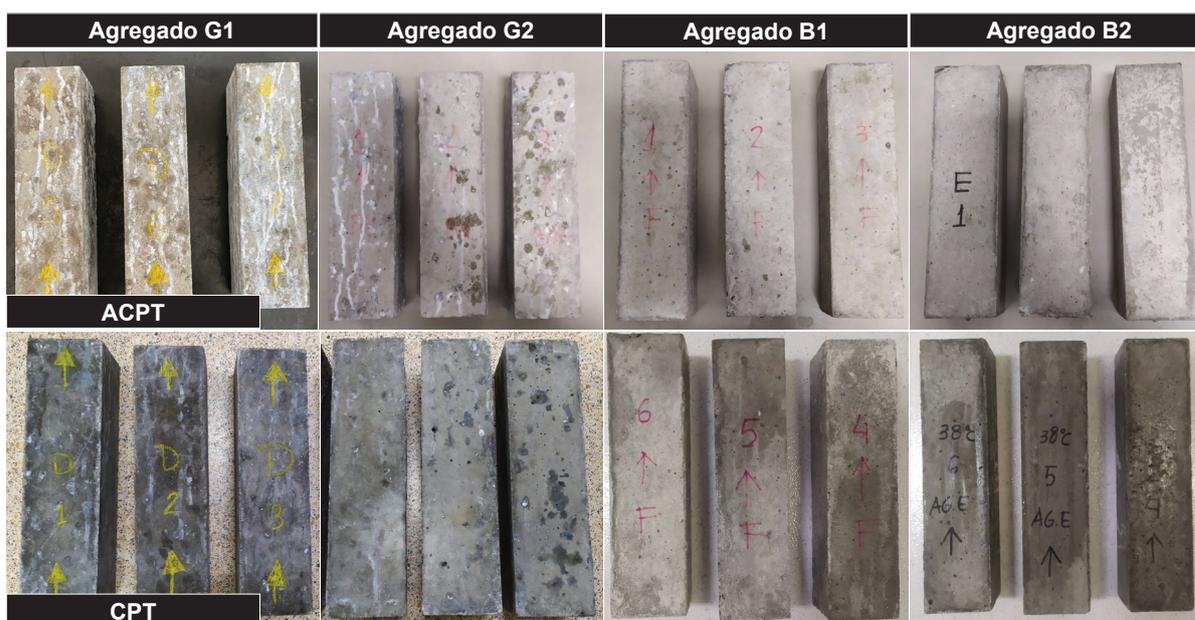
Uma inspeção visual final das argamassas e concretos também foi realizada ao final dos ensaios. A Figura 3.15 mostra a imagem das barras de argamassa e a Figura 3.16 mostra a imagem dos concretos ao final dos ensaios.

FIGURA 3.15 – Argamassas após término do ensaio AMBT



O aparecimento de manchas em forma de mapa, seguindo a tendência de uma posterior fissuração, puderam ser observadas apenas nas barras de argamassa com agregado B2, como indicado na Figura 3.15. Isso corrobora com os resultados obtidos no ensaio de expansão em que o agregado B2 foi o que apresentou maior expansão média. Nas demais barras de argamassa não foram observadas manchas ou fissuras.

FIGURA 3.16 – Concretos após término do ensaio ACPT e CPT



No concreto, em nenhum dos prismas foram observadas manchas ou fissuras decorrentes da RAS em suas superfícies. Entretanto, houve lixiviação dos álcalis

presentes nos concretos. Isso ocorreu nos corpos de prova com agregados G1 e G2 em todos os ensaios. Nos concretos com os agregados B1 e B2 essa condição não foi verificada em nenhum dos testes.

A lixiviação ocorre devido à condensação elevada de água na superfície do concreto o que faz com que os álcalis sejam removidos do concreto e se depositem/escorram na superfície (RIVARD *et al.*, 2003). Além disso, as condições de exposição (temperatura de umidade) e o tamanho do corpo de prova tendem a influenciar na lixiviação (LINDGÅRD *et al.*, 2013; COSTA; MANGIALARDI; PAOLINI, 2017). E neste caso, como os agregados apresentam uma taxa de reação mais lenta, isso pode contribuir para uma maior lixiviação dos álcalis, como apontado também por Rivard *et al.* (2003), Sanchez *et al.* (2014), Costa, Mangialardi e Paolini (2017), e assim uma quantidade importante de álcalis pode ser lixiviada para fora do concreto devido aos efeitos de difusão. Esse fator pode mascarar os resultados e interromper ou reduzir prematuramente a expansão dos corpos de prova nos ensaios.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos foi possível identificar o potencial reativo dos agregados testados. O estudo possibilitou definir o uso dos mesmos para o restante dos estudos da tese, visto que os ensaios dos demais capítulos tem acompanhamento e duração de no mínimo um ano.

Os agregados identificados como G1 (Gnaiss) e G2 (Granito) foram aqueles que mostraram melhores respostas do ponto de vista do concreto para o estudo. O agregado G1 pôde ser classificado como potencialmente reativo, grau R1 (NBR 15577-1:2018), em todos os ensaios. Já o agregado G2 apesar de apresentar discrepâncias de classificação, foi escolhido devido à correlação entre os ensaios ACPT e CPT, que apontou incerteza quanto ao seu potencial reativo.

O agregado identificado como B2 (Basalto), apesar de mostrar expansões médias elevadas no teste acelerado em barras de argamassa, apresentou menores resultados em termos de RAS no concreto. Isso também pôde ser observado com o agregado B1 (Basalto).

Testar os agregados a partir de todos os ensaios preconizados pela norma torna possível entender que existe a possibilidade de classificação errônea de agregados pelo teste AMBT, uma vez que o agregado que se apresentou mais reativo no teste em

argamassa foi o que teve a menor curva quando testado em concreto (em termos de RAS).

## 4 REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA EM CONCRETOS CONTENDO CINZA VOLANTE

### 4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E OBJETIVO DO CAPÍTULO

A cinza volante em concreto é bastante aceita e indicada como agente mitigador da reação álcali-sílica quando não se pode dispensar o uso de agregados reativos.

O desempenho eficiente da cinza volante em mitigar a RAS depende de vários fatores relativos à adição, como quantidade adicionada, composição mineralógica e finura. Além disso, depende também de questões relacionadas ao meio, como a reatividade do agregado, ambiente de exposição do concreto, teor de álcalis no cimento (THOMAS, 2011). Shehata e Thomas (2000), Deschesne e Bérubé (2001) mostram que a cinza volante classificada como F, ou seja, aquela que possui baixa quantidade álcalis e cálcio em sua composição, apresenta os melhores resultados em função da redução da expansão decorrente da reação deletéria. Além disso, se tratando da composição química da cinza volante, a quantidade adicionada dessa adição mineral acaba sendo importante fator a ser considerado também (SHEHATA; THOMAS, 2000; DESCHESSNE; BÉRUBÉ, 2001).

Diversos estudos (SHEHATA; THOMAS, 2000; AQUINO; LANGE; OLEK, 2001; MALVAR; LENKE, 2006; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011; MOSER *et al.*, 2010; SHAFATI *et al.*, 2013; SAHA *et al.*, 2018) já identificaram os potenciais mecanismos, físicos e químicos, responsáveis pela ação da cinza volante na mitigação da RAS. Entre eles estão o consumo de portlandita e redução da reserva alcalina, limitação no transporte de agentes agressivos ou água pela redução da permeabilidade do concreto, melhora nas propriedades mecânicas, modificação da composição e viscosidade do gel-RAS e diluição alcalina. Porém, ainda não se tem muitos estudos que correlacionem o desempenho e o comportamento da cinza volante frente ao mecanismo de fissuração, deterioração e redução das propriedades mecânicas causados pela RAS.

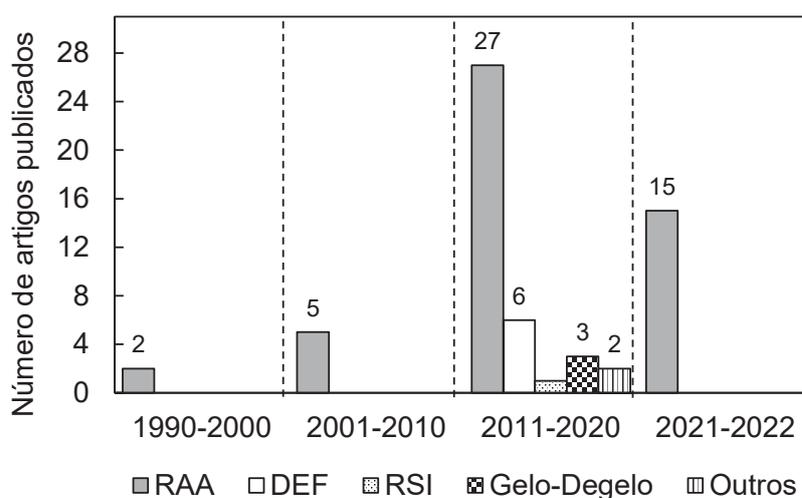
*Stiffness Damage Test* e *Damage Rating Index* são duas técnicas que têm sido estudadas, desenvolvidas e aplicadas (CHRISP; WALDRON; WOOD, 1993; SMAOUI *et al.*, 2004a; VILLENEUVE, 2011; SANCHEZ *et al.*, 2014; SANCHEZ *et al.*, 2015; SANCHEZ *et al.*, 2015; SANCHEZ *et al.*, 2016a; SANCHEZ *et al.*, 2017; SOUZA; ANTUNES; SANCHEZ, 2022) com o intuito de fornecer uma avaliação diagnóstica do grau de dano do concreto afetado pela RAS. Quando utilizadas em conjunto, ambas as técnicas visam entender como os mecanismos de fissuração da reação deletéria

atuam nas perdas de propriedades mecânicas do concreto, visando estabelecer um diagnóstico e prognóstico da deterioração.

Este capítulo tem como objetivo compreender os mecanismos de desenvolvimento da reação álcali-sílica, em concretos com diferentes teores de cinza volante e diferentes agregados reativos, utilizando técnicas de diagnóstico da reação, como o DRI e SDT. A partir dessas técnicas é possível se extrair diversas informações interessantes que trazem diretrizes para compreender como os diferentes teores atuam na mitigação ou não da RAS, visando a formação e propagação de fissuras, progressão de danos futuros e como isso afeta as propriedades mecânicas do concreto.

Utilizando a ferramenta de revisão sistemática foi realizada uma busca por artigos publicados em periódicos sobre o tema. A pesquisa foi feita em três bases de dados, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. Foram feitas diversas combinações entre as palavras-chave: "fly ash", "alkali-silica reaction", "alkali-aggregate reaction", "Damage Rating Index", "Stiffness Damage Test", "diagnosis and prognosis". A busca resultou, após verificação de duplicatas e leitura dos resumos, em 53 artigos. Os artigos foram ranqueados de acordo com a sua relevância utilizando um método de revisão sistemática, *Methodi Ordinatio* (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015). A Figura 4.1 mostra todos os artigos publicados em períodos de 1990 a agosto de 2022, os quais utilizaram as técnicas de DRI e SDT para a avaliação de diferentes reações deletérias no concreto.

FIGURA 4.1 – Artigos publicados com o tema reações deletérias no concreto e uso de ferramentas de diagnóstico e prognóstico



A Tabela 4.1 mostra todos os artigos ranqueados, referentes ao uso das técnicas em concretos afetados com RAA, apontando os ensaios utilizados em cada um. O *InOrdinatio* é um índice que ranqueia os artigos de acordo com ano de publicação,

fator de impacto do periódico e número de citações. A partir dessa classificação é possível observar os trabalhos mais relevantes na temática.

Embora seja óbvio que a influência das adições minerais na RAS é um tema amplamente estudado, há um estudo recentemente (2022) publicado (SOUZA; ANTUNES; SANCHEZ, 2022) em periódico no qual os autores visaram utilizar as técnicas de diagnóstico citadas, em concretos com agregados reativos e adições minerais, neste caso cinza de madeira. Além deste, Souza (2022) publicou sua tese de doutorado em 2022 no qual aborda diferentes tipos de adições minerais (cinza volante, escória de alto forno, metacaulim e sílica ativa) incorporadas a concretos com agregados reativos. Entretanto, apesar de crescente o número de estudos publicados utilizando as técnicas, como pode ser visto na Figura 4.1, nenhum deles foi realizado no Brasil e são poucos os que contemplam o uso de adições minerais somando a técnicas de diagnóstico da RAS. Estes fatos valorizam o desenvolvimento da pesquisa neste tema, indicando que ainda existe uma lacuna no conhecimento nesta área.

TABELA 4.1 – Ranqueamento dos artigos publicados em periódicos contendo o tema: uso de técnicas para diagnóstico e prognóstico de reações deletérias do concreto

Referência	InOrdinatio	Concreto			Ensaio		
		Lab <sup>1</sup> .	Est. <sup>2</sup>	A.M. <sup>3</sup>	SDT	DRI	E.R. <sup>4</sup>
Sanchez <i>et al.</i> (2017)	157,01	x			x	x	
Sanchez <i>et al.</i> (2015)	142,01	x				x	
Mohammadi, Ghiasvand e Nili (2020)*	120,01						
Sanchez <i>et al.</i> (2018)	117,01	x			x	x	
Zhu <i>et al.</i> (2021)	108,01	x			x	x	
Zahedi <i>et al.</i> (2022)	106,01	x			x		
Sanchez <i>et al.</i> (2020)	106,01		x		x	x	
Zahedi <i>et al.</i> (2022)	105,01	x			x	x	
Zahedi, Sanchez e Noël (2022)	105,01	x				x	
Zahedi <i>et al.</i> (2021)	104,01	x				x	
Trottier <i>et al.</i> (2021a)	104,01	x				x	
Trottier <i>et al.</i> (2021b)	102,00	x				x	
Kongshaug <i>et al.</i> (2020)	101,01	x			x		
Souza, Antunes e Sanchez (2022)	100,01	x		x	x	x	
Ahmed <i>et al.</i> (2022)	100,01		x		x	x	
Strow <i>et al.</i> (2022)	100,00	x				x	
Ziapour <i>et al.</i> (2022)	100,00	x				x	
Tayfur <i>et al.</i> (2021)	97,00	x				x	
Sinno, Piersanti e Shehata (2021)	93,00	x	x			x	x
Gautam <i>et al.</i> (2017a)	92,01	x				x	
Sanchez <i>et al.</i> (2014)	91,01	x			x	x	
Diab, Soliman e Nokken (2021b)	91,01	x			x		
Gautam e Panesar (2021)	89,01	x				x	
Souza, Sanchez e Grazia (2019)	90,01	x			x	x	
Diab, Soliman e Nokken (2020b)	89,01	x			x		
Rodrigue <i>et al.</i> (2020)	89,01	x				x	
Gautam e Panesar (2017)	88,01	x				x	
Giannini <i>et al.</i> (2018)	87,00	x			x	x	
Sanchez, Drimalas e Fournier (2020)	86,00	x				x	
Diab, Soliman e Nokken (2020a)	83,01	x			x		
Sanchez <i>et al.</i> (2016a)	79,01	x			x	x	
Sanchez <i>et al.</i> (2016b)	79,00	x				x	
Custódio e Ribeiro (2019)	78,00		x		x		x
Gautam <i>et al.</i> (2017b)	77,00	x				x	
Martin <i>et al.</i> (2017)	74,01	x	x		x	x	x
Rashidi <i>et al.</i> (2016)	73,01	x				x	
Villemure <i>et al.</i> (2019)	72,00	x			x	x	
Noël, Sanchez e Tawil (2018)*	70,00						
Sanchez <i>et al.</i> (2015)	64,01	x	x		x	x	
Sanchez <i>et al.</i> (2014)	57,01	x			x	x	
Godart e Wood (2016)*	46,00						
Sanchez <i>et al.</i> (2017)	45,00	x			x	x	
Feiteira e Ribeiro (2013)	32,01	x			x		
Rivard e Ballivy (2005)	2,01	x				x	
Smaoui <i>et al.</i> (2004a)	-5,00	x			x	x	
Bérubé <i>et al.</i> (2005)	-29,00		x		x	x	
Rivard, Fournier e Ballivy (2002)	-45,00	x				x	
Smaoui <i>et al.</i> (2004b)	-61,00	x			x	x	
Rivard, Fournier e Ballivy (2000)	-82,00	x	x			x	
Grattan-Bellew (1995)	-95,00		x			x	x

<sup>1</sup> Lab. = concreto moldado em laboratório

<sup>2</sup> Est. = concreto extraído de estrutura

<sup>3</sup> A. M. = concreto contendo adição mineral

<sup>4</sup> E. R. = expansão residual

\* Revisão, não contém dados experimentais

## 4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.2.1 Materiais

Foi utilizado o cimento CPV-ARI em virtude da ausência de adições pozolânicas em sua composição, sendo permitida a incorporação apenas de até 10% de material carbonático. As características químicas, mecânicas e físicas do cimento foram descritas no capítulo 3.

A cinza volante (CV) utilizada, proveniente da queima de carvão mineral, apresentou massa específica de 1,95 g/cm<sup>3</sup> e área superficial específica BET (*Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller*) de 1,096 m<sup>2</sup>/g. A análise química da CV foi realizada por fluorescência de raios X (FRX) e é apresentada na Tabela 4.2. Pode-se notar na composição da cinza volante uma baixa quantidade de álcalis. Observa-se também que a cinza volante utilizada contém elevada quantidade de alumina e sílica em sua composição (84,1%) e baixa quantidade de cálcio (1,60%), o que contribui no seu desempenho quanto a RAS.

TABELA 4.2 – Análise química da cinza volante

Composição química (%)										
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	P.F.
1,60	57,80	26,30	6,20	0,80	0,30	3,00	0,60	1,30	2,57	1,61

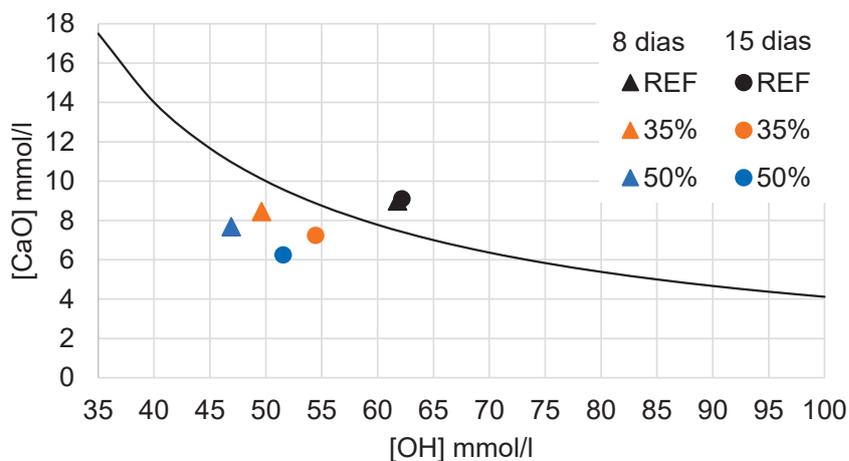
FONTE: Capraro (2016)

Foi realizado também o ensaio Fratini, conforme a NBR 5753 (2016). Este método é aplicado para medir a pozolanicidade de cimentos Portland pozolânicos, neste caso, testando as porcentagens de cinza volante utilizadas (35% e 50%). Os resultados aos 8 e 15 dias podem ser observados na Tabela 4.3 e Figura 4.2.

TABELA 4.3 – Resultados do ensaio Fratini aos 8 e 15 dias

Teor (%)	8 dias		15 dias		Resultado
	[OH] mmol/l	[CaO] mmol/l	[OH] mmol/l	[CaO] mmol/l	
0	61,78	8,99	62,17	9,1	não pozolânico
35	49,62	8,45	54,44	7,24	pozolânico
50	46,91	7,68	51,55	6,25	pozolânico

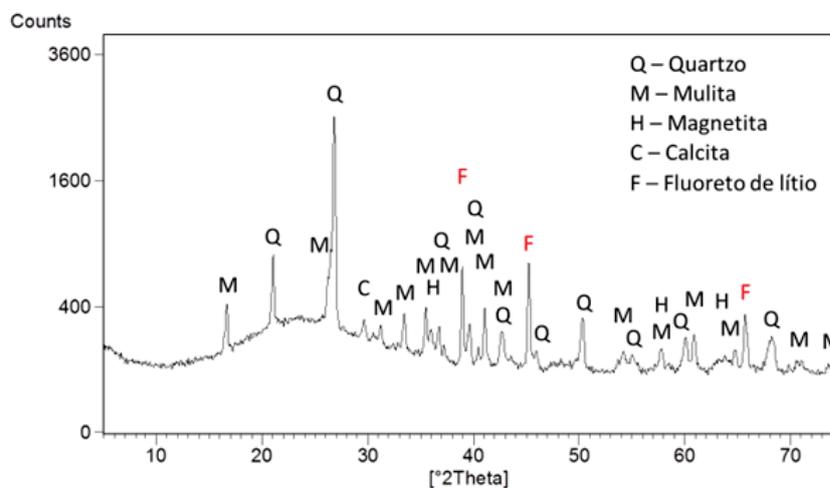
FIGURA 4.2 – Resultados do ensaio Fratini para a referência (cimento Portland CPV) e misturas de cimento contendo cinza volante (35% e 50%)



De acordo com os resultados obtidos pelo ensaio Fratini, se observa que as misturas contendo 35% e 50% de cinza volante evidenciam pozolanicidade já aos 8 dias. As concentrações de  $[\text{OH}^-]$  e  $[\text{CaO}]$  para as séries com cinza volante são menores que as observadas na série de referência, evidenciando que houve consumo dos elementos para a formação da portlandita. Shafaatian *et al.* (2013) e Saha *et al.* (2018) apontam que a cinza volante atua de diversas formas na mitigação da RAS, pela diluição alcalina, redução na permeabilidade do concreto, modificação do gel de RAS e pela atividade pozolânica.

A identificação das fases mineralógicas constituintes da CV pode ser vista na Figura 4.3. O equipamento utilizado foi o Rigaku, modelo Ultima IV. O perfil difratométrico foi adquirido entre  $5^\circ$  e  $75^\circ 2\theta$ , com passo angular de  $0,02^\circ 2\theta$  e velocidade de  $1^\circ/\text{minuto}$ . A análise utilizou tubo com ânodo de cobre, 40 kV/30 mA. No preparo da amostra de cinza volante foi utilizado o fluoreto de lítio p.a. como padrão interno, no teor de 10%, em massa, para a quantificação, por Rietveld, das fases cristalinas e do teor de amorfos.

FIGURA 4.3 – Difratoograma da cinza volante



As fases minerais identificadas na CV e quantificadas por Rietveld foram: mulita (14,5%), quartzo (11,5%), calcita (2,0%) e magnetita (1,2%). A banda difusa (halo amorfo), com ápice em  $\pm 24^\circ 2\theta$ , caracteriza a presença de estrutura amorfa (70,8%), passível de atividade pozolânica.

Para a composição do concreto foi utilizado areia natural como agregado miúdo, a qual foi caracterizada quanto a sua granulometria, massa específica, módulo de finura, absorção e expansibilidade (Tabela 4.4 e Figuras 4.4 e 4.5). A areia, classificada como areia média devido seu módulo de finura, atende a zona ótima especificada pela norma 7211(2022). Os resultados de expansão classificam a areia como inócua de acordo com o limite estabelecido pela norma 15577(2018).

TABELA 4.4 – Caracterização do agregado miúdo

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,51
Absorção (%)	5,75
Módulo de finura	2,33

FIGURA 4.4 – Curva granulométrica agregado miúdo

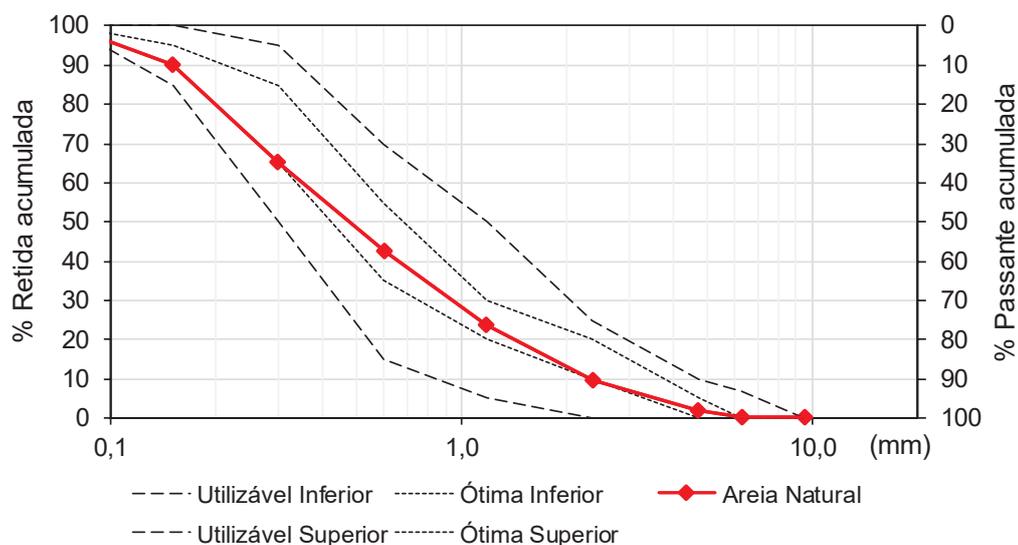
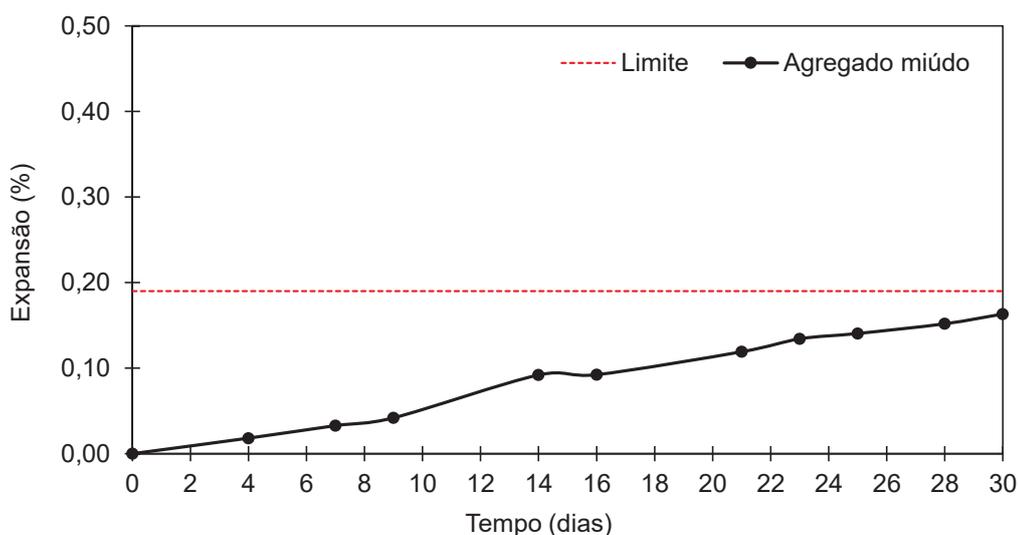


FIGURA 4.5 – Expansão do agregado miúdo pelo método AMBT - NBR 15577-4



Para compor os concretos, utilizou-se os agregados G1 e G2, ambos descritos no capítulo 3. A escolha destes agregados se deu devido aos resultados obtidos nos testes de expansão.

#### 4.2.2 Moldagem e preparação dos concretos

O traço para a moldagem dos corpos de prova foi desenvolvido de acordo com o prescrito na norma NBR 15577 parte 6 (ABNT, 2018b). Sendo utilizado o método da ABCP/ACI para cálculo. O cálculo do traço está descrito no anexo (ANEXO A). A Tabela 4.5 mostra o consumo de material de acordo com o agregado utilizado. Importante

salientar que todas as misturas mantiveram o volume de agregados iguais e a relação água/aglomerante de 0,45. O cimento foi substituído pela cinza volante nas proporções de 35% e 50%, em massa. Esses percentuais são comumente apontados na literatura (SHEHATA; THOMAS, 2000; SHAFATIAN *et al.*, 2013; SHEHATA *et al.*, 2017; SAHA *et al.*, 2018), e além disso, optou-se por um percentual mais elevado de cinza volante uma vez que a mesma não deve apresentar elevada reatividade de acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados.

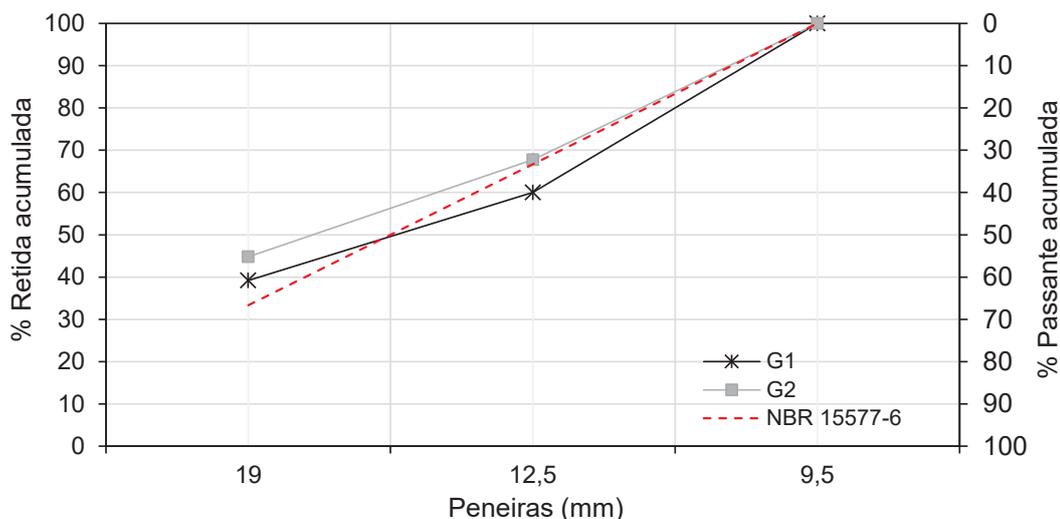
TABELA 4.5 – Consumo de materiais para dosagem dos concretos em (Kg/m<sup>3</sup>)

	Agregado G1			Agregado G2		
	REF	35C	50C	REF	35C	50C
cinza volante	0	143	202	0	143	202
cimento	420	266	202	420	266	202
água	189	184	182	189	184	182
areia	676	658	651	702	683	675
brita	1050	1022	1010	1080	1050	1038

Foi necessário elevar a quantidade de álcalis total para acelerar o processo de expansão, ou seja, elevar o ( $Na_2O_{eq}$ ) até a quantidade de 1,25% da massa de cimento. Seguiu-se o mesmo procedimento descrito no capítulo 3. O NaOH foi dissolvido na água de amassamento para cada série moldada. De acordo com a norma, para o cálculo do teor de álcalis, deve ser considerado apenas o consumo de cimento empregado, ou seja, no caso de utilização de adições minerais em substituição ao cimento, a quantidade de álcalis destas não deve ser contabilizada.

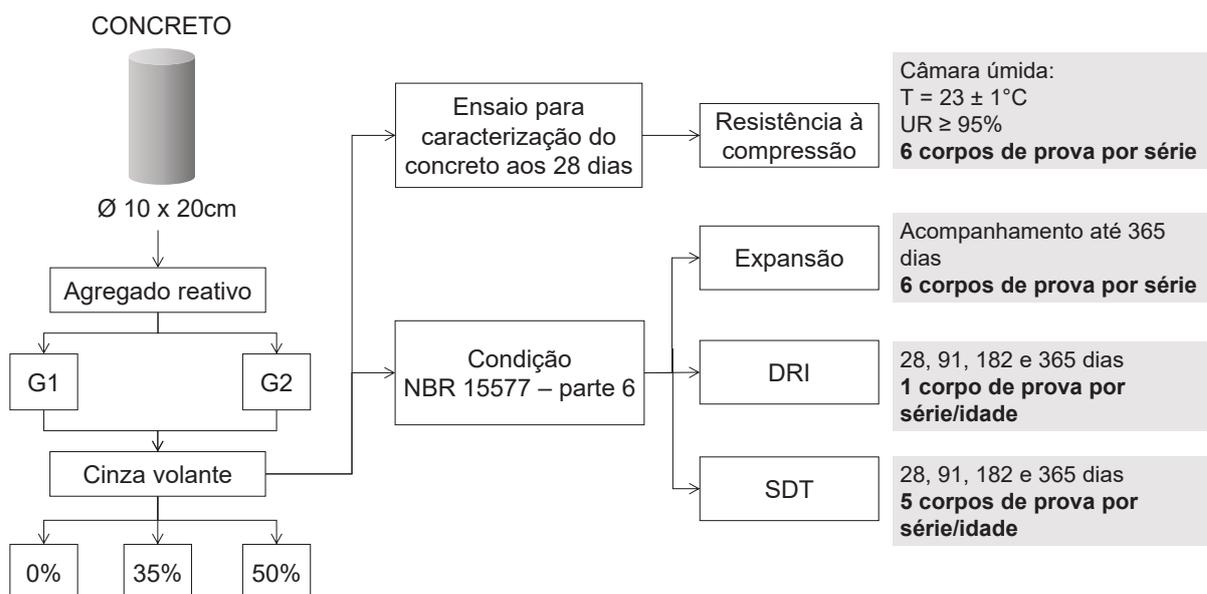
Devido a elevada quantidade de concreto moldada e problemas nos equipamentos do laboratório, optou-se por compor a curva granulométrica dos agregados utilizados. Para tanto, utilizaram-se 60% de brita 1 e 40% de brita 0, essa composição foi utilizada para atingir a curva estipulada na NBR 15577-6 (ABNT, 2018b). A Figura 4.6 mostra as curvas granulométricas de ambos os agregados utilizados em comparação a curva especificada em norma.

FIGURA 4.6 – Curva granulométrica dos agregados utilizados



Foram moldados 36 corpos de prova cilíndricos de  $\phi$  10 x 20 cm para cada combinação, a fim de avaliar o comportamento e os mecanismos da cinza volante na mitigação da RAS para ambos os agregados. Ao fim, foram moldados 108 corpos de prova por agregado, totalizando 216 corpos de prova. Em discordância à NBR 15577, que preconiza o uso de corpos de prova prismáticos (75 x 75 x 285 mm), optou-se pelo uso de corpos de prova cilíndricos para melhorar a comparação entre resultados de expansão e das técnicas de DRI e SDT, devido ao formato do corpo de prova. A Figura 4.7 mostra o esquema desenvolvido com os parâmetros de moldagem e ensaios.

FIGURA 4.7 – Esquema de moldagem e avaliação dos corpos de prova



Todos os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas da moldagem.

Posterior a desmoldagem, os mesmos seguiram para o acondicionamento de acordo com a NBR 15577 parte 6 (ABNT, 2018b), para acelerar o processo de expansão:

- A alocação dos corpos de prova em recipientes fechados, nos quais se deve conter água em uma altura de  $(30\pm 5)$ mm acima do fundo. Os corpos de prova não podem ficar em contato com a água e nem com as laterais dos recipientes.
- Os recipientes devem ficar dispostos em ambiente com temperatura controlada de  $38\pm 2$ °C, local este que permanecem até a data dos ensaios.

Nos corpos de prova para o teste de expansão, foram inseridos os pinos para efetuar as medidas. Após a desmoldagem, os pinos foram inseridos nos corpos de prova, conforme mostra a Figura 4.8. Foram feitos dois furos, um superior e outro inferior, no centro do corpo de prova, com auxílio de uma furadeira. O pino foi colado utilizando epóxi. Os pinos são os mesmos utilizados no ensaios de expansão de prismas de concreto.

FIGURA 4.8 – Corpos de prova contendo os pinos de expansão



#### 4.2.3 Métodos de avaliação do concreto

##### 4.2.3.1 Análise de expansão

A primeira medida de variação dimensional se deu após 24h da inserção dos pinos. Após, a expansão foi medida aos 28 dias e uma vez por mês, até atingir a idade de 365 dias. O equipamento utilizado para as medições foi um relógio comparador com micrômetro digital (Figura 4.9). Ressalta-se que este equipamento foi desenvolvido para o uso nesta pesquisa.

FIGURA 4.9 – Relógio comparador para medir expansão de corpos de prova cilíndricos



Antes de cada leitura e demais ensaios ( $18 \pm 2$ h antes), os recipientes contendo os corpos de prova eram removidos do ambiente com temperatura controlada para estabilização da temperatura com o ambiente. Após a leitura, todos os corpos de prova de expansão eram recolocados nos recipientes, invertendo a posição em relação ao armazenamento anterior, seguindo novamente para as condições de ensaio. Nesse mesmo período foi realizada a pesagem e avaliação visual das amostras.

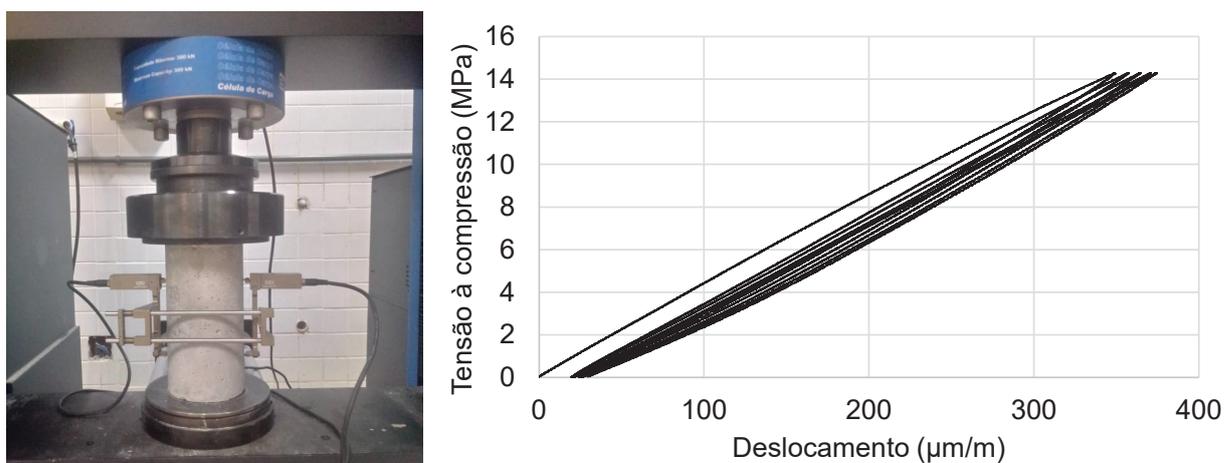
Foram calculadas as expansões médias, desvio padrão e erro padrão para todas as séries. A análise dos resultados foi realizada a partir da aplicação do teste T de *Student* bicaudal para pequenas amostras, com intervalo de confiança de 95%. Essa análise foi realizada com o intuito de verificar se a diferença na variação das expansões obtidas foi significativa. E, dependendo do caso, rejeitar os valores que ficaram fora do intervalo calculado.

#### 4.2.3.2 Stiffness Damage Test - SDT

Para o SDT, os corpos de prova foram submetidos a 5 ciclos de carga/descarga com uma taxa de aplicação de carga controlada (0,10 MPa/s). O equipamento utilizado foi uma prensa com capacidade de 100 kN da marca INSTRON. A carga máxima utilizada foi 40% da resistência à compressão obtida aos 28 dias; seguindo os estudos realizados por Sanchez *et al.* (2014), Sanchez *et al.* (2015), Sanchez *et al.* (2017). Para obtenção dos dados e geração das curvas foram utilizados extensômetros para medir o deslocamento do corpo de prova mediante a aplicação da carga, conforme Figura 4.10. Com os dados obtidos se pôde gerar a curva de deslocamento *versus*

tensão à compressão. Após esta etapa, foram calculados os índices SDI e PDI de acordo com a Figura 2.6 mostrada no capítulo 2. Para o cálculo destes índices se faz necessário separar as 5 curvas de carga e descarga. Para tanto, utilizou-se um código em linguagem de programação C para auxiliar no processo de identificação das curvas, o qual gera como produto final uma planilha em excel com a separação das 10 curvas (5 curvas de carga e 5 de descarga). A partir desta planilha, pôde-se obter o índice PDI de cada curva e pôde-se calcular as áreas abaixo de cada uma para obtenção do SDI.

FIGURA 4.10 – Ensaio de SDT - corpo de prova com extensômetro e gráfico gerado



Caso o corpo de prova não fosse ensaiado na data prevista, devido à quantidade de ensaios, os mesmos eram secos em estufa a 40 °C e posteriormente embrulhados em plástico filme e acondicionados em temperatura de até 12 °C, esse processo visa desacelerar/parar as reações. Para seguir o ensaio, os mesmos eram retirados dessa temperatura e levados para a câmara úmida a 23 °C, onde permaneciam por um período de 48h. Todo esse processo garante uma adequada saturação dos corpos de prova para o ensaio, sem prejuízos de expansão ou retração dos mesmos no período, como observou Sanchez (2014). Sendo que esse procedimento é proposto pela norma canadense CSA A23.2-14C quando da extração de corpos de prova de estrutura de concreto.

#### 4.2.3.3 Damage Rating Index - DRI

O Índice de Classificação de Danos (DRI) é um método que serve como parâmetro para fornecer uma medida semiquantitativa da extensão dos danos no concreto.

Para tanto, os corpos de prova foram cortados em duas metades longitudinalmente utilizando uma serra para concreto. O corte foi feito com cuidado para manter

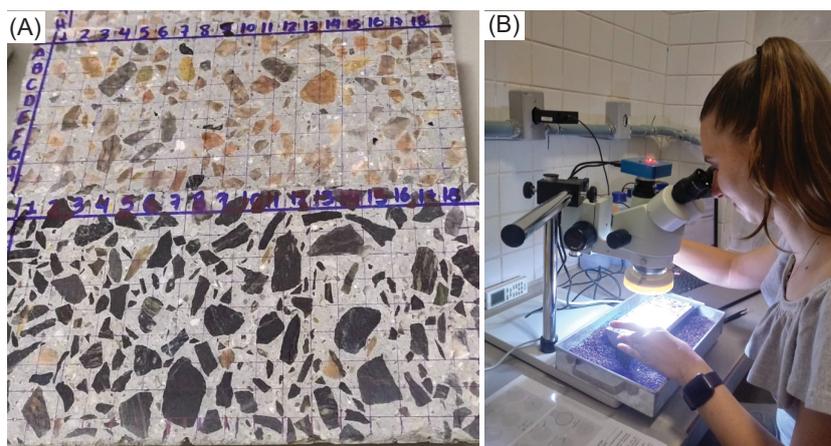
uma linha reta e evitar danos no corpo de prova devido o uso da serra. Após o corte, uma das partes do corpo de prova foi polida com o auxílio de uma politriz e diferentes discos, com gramaturas grossas e finas (100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1500 e 3000) para obtenção de um polimento suave. O polimento adequado aos ensaios é quando a superfície do corpo de prova apresenta aspecto espelhado (Figura 4.11). Com o polimento realizado, os corpos de prova foram marcados com uma grade de 1cm por 1cm, formando assim em torno de 200 quadrados. Os quadrados foram identificados em linhas com letras (A, B, C..) e em colunas com números (1, 2, 3..), conforme mostra a Figura 4.12.

FIGURA 4.11 – (A) Processo de polimento dos corpos de prova; (B) Corpo de prova após polimento



Para a análise foi utilizado um microscópio ótico, com capacidade de ampliação de 16x. O microscópio utilizado possui uma câmera fotográfica que auxilia no registro e posterior conferência da análise realizada (Figura 4.12). Em cada quadrado (1x1cm) marcado foi observada, contada e demarcada as características petrográficas presentes associadas a RAS. As características foram determinadas de acordo com Villeneuve (2011) e Sanchez *et al.* (2015), os quais apresentam uma tabela com ponderações dependendo do tipo de dano apresentado (capítulo 2). O objetivo da ponderação de cada característica encontrada é equilibrar sua importância devido a RAS. O valor final obtido é normalizado para 100 cm<sup>2</sup>, e quanto maior for o número obtido no DRI, maior a deterioração causada pela reação deletéria.

FIGURA 4.12 – (A) Marcação dos corpos de prova; (B) Microscópio utilizado



Todos os resultados obtidos a partir dos testes foram correlacionados com a expansão dos corpos de prova.

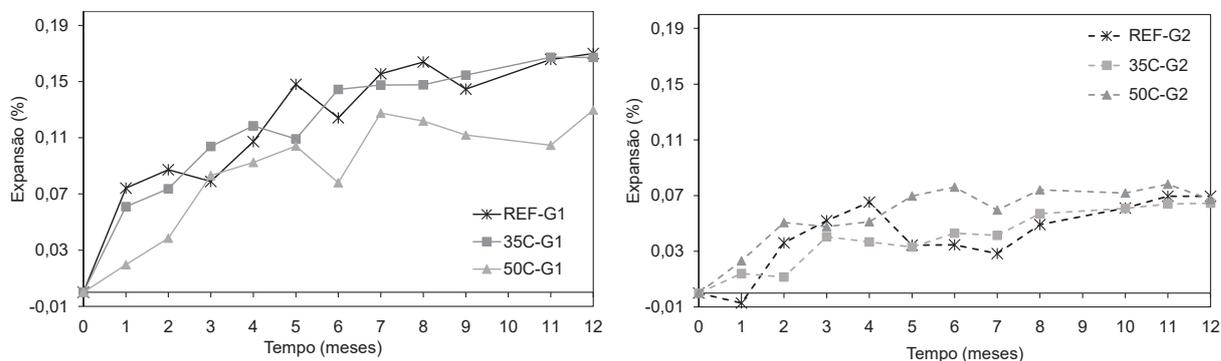
### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.3.1 Análise de expansão

A partir da colocação dos pinos nos corpos de prova e medição inicial, observou-se que algumas das amostras não encaixaram corretamente no pórtico. Dessa forma, estas foram descartadas das análises de expansão. Os dados, para o agregado G1, são compostos pela média das expansões de 5 amostras para a série de referência (REF) e aquela contendo 35% de cinza volante (35C), e 6 amostras para a série contendo 50% de cinza volante (50C). Já para o agregado G2, foram utilizadas 5 amostras para a referência (REF) e para a série com 50% de cinza volante (50C), e 6 amostras para a série com 35% de cinza volante (35C).

A Figura 4.13 mostra os resultados de expansão obtidos das misturas contendo diferentes porcentagens de cinza volante (0, 35 e 50%) para os agregados G1 e G2.

FIGURA 4.13 – Média das expansões dos corpos de prova de concreto ao longo do tempo



De acordo com a NBR 15577(2018), para análise de adições minerais, a recomendação é que o ensaio de expansão seja acompanhado por 2 anos. Entretanto, como o intuito não foi apenas a análise de expansão e sim a avaliação das técnicas de diagnóstico em conjunto com a expansão, o ensaio seguiu por apenas o período de 365 dias. Apesar disso, a recomendação é pertinente, uma vez que nos resultados de expansão obtidos é possível notar que a adição mineral só começa a fazer efeito após, pelo menos, 6 meses de acompanhamento. Isso também é justificado pela baixa reatividade da cinza volante escolhida para o estudo, perante outras adições, como sílica ativa, por exemplo.

Como pode ser observado na Figura 4.13, aos 365 dias a série de referência contendo agregado G1, atingiu uma expansão média de 0,170%, seguida da série com 35% de cinza volante (0,167%) e da série com 50% de cinza volante (0,13%). A série 50C-G1 apresentou uma redução em média de 23% na expansão em comparação a série REF-G1, aos 365 dias.

O agregado G2, como já esperado devido os resultados de expansão em prismas de concreto (capítulo 3), possui uma reatividade inferior ao agregado G1. Enquanto a série de referência do agregado G1 atingiu 0,170% aos 365 dias de acompanhamento, a série com agregado G2 atingiu apenas 0,07%. Evidenciando assim, que o agregado G1 é potencialmente mais reativo.

No que tange o uso da cinza volante, as expansões médias dos corpos de prova contendo a adição não apresentaram muita alteração em comparação à referência. Aos 12 meses de acompanhamento as expansões médias praticamente se igualam, não podendo assim observar diferença significativa quanto aos efeitos do uso da cinza volante no concreto para este agregado.

Importante salientar que houve diferenças entre as expansões observadas

em corpos de prova prismáticos (Capítulo 3) e cilíndricos, para ambos os agregados, sendo que os corpos de prova cilíndricos apresentaram maiores expansões. Poucos estudos são encontrados nesse sentido, a maior parte deles tem seu foco na correlação entre campo e laboratório. Porém, cabe citar que Diab, Soliman e Nokken (2021a) encontraram diferenças de até 40% nos resultados de expansão entre prismas e cilindros, especialmente nas primeiras idades (até 90 dias). Resultados estes que evidenciaram uma maior expansão em corpos de prova cilíndricos. Além deste, Sinno e Shehata (2019) investigaram a diferença na expansão devido à RAS em concretos de diferentes formatos, contendo dois tipos de agregados e diferentes adições minerais. Os resultados obtidos mostraram que corpos de prova cilíndricos apresentam maiores expansões que corpos de prova prismáticos, além de que os prismas tendem a lixiviar mais álcalis, mascarando assim os resultados de expansão. Em seus experimentos, Sinno e Shehata (2019) mostram que a diferença na lixiviação dos álcalis nas amostras de referência (ou seja, sem adições minerais) em prismas chegou a valores de até 41% em relação aos cilindros.

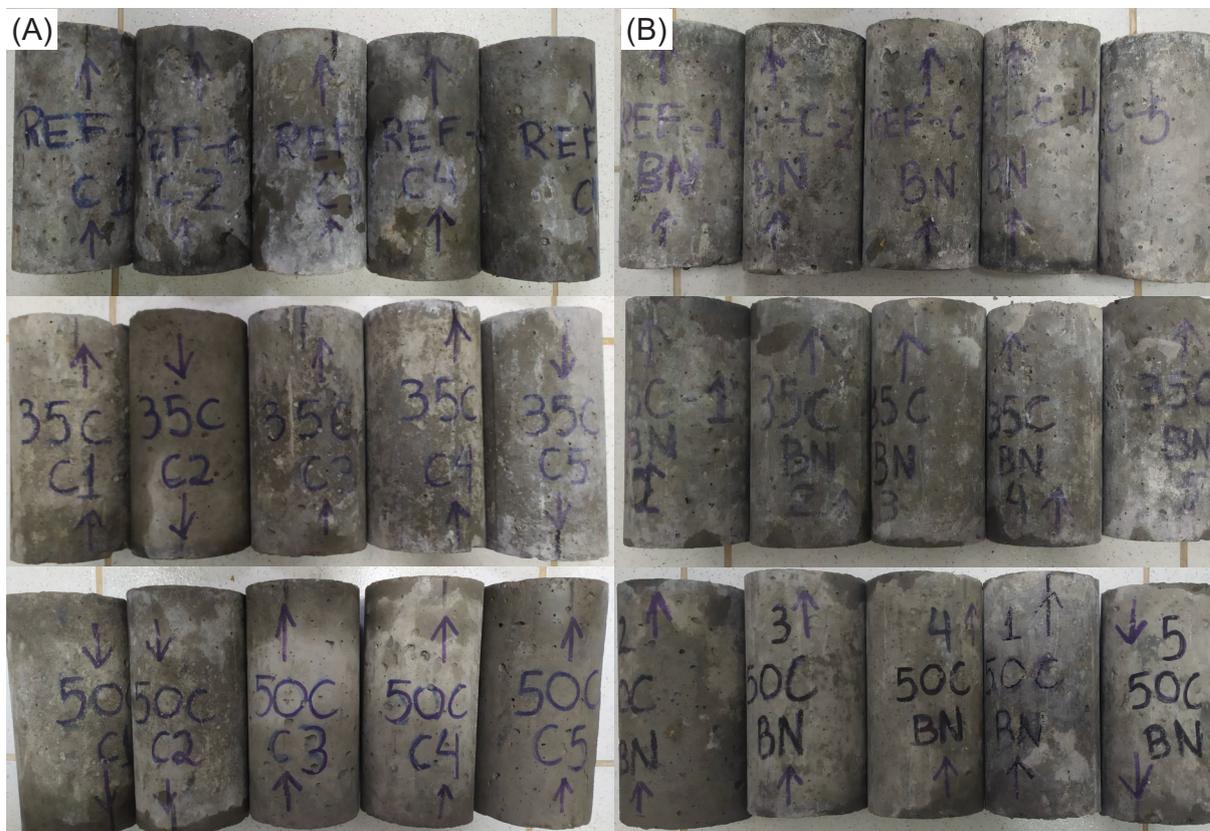
O impacto da lixiviação alcalina em concretos contendo agregados de baixa reatividade pode influenciar nos resultados de expansão obtidos. Como os agregados utilizados apresentam baixa reatividade, o impacto da lixiviação pode ter sido maior, e a diferença na expansão em ambos os corpos de prova (cilíndricos e prismáticos) tenderiam a apresentar resultados mais distantes, fato este constatado também por Sinno e Shehata (2019). Entretanto, são necessários mais estudos para avaliar essa condição, visto que a medição proposta para esta pesquisa precisa ser validada com uma quantidade maior de repetições. Além disso, a medição aqui proposta não visa estabelecer limites de expansão e sim avaliar a eficácia da cinza volante apenas. A expansão dos corpos de prova, cilíndricos e prismáticos, será melhor abordada no capítulo 6, o qual trata da modelagem numérica.

Como no ensaio de prismas de concreto, também foi possível observar nos cilindros (10 x 20 cm) a lixiviação dos álcalis nos corpos de prova de referência, entretanto em menor escala (Figura 4.14), corroborando assim com os resultados obtidos por Sinno e Shehata (2019). Fato este que pode também ter contribuído para a maior expansão encontrada nos corpos de prova cilíndricos.

No que tange a análise da adição mineral, a série contendo 50% de cinza volante, para ambos os agregados, foi a que menos apresentou lixiviação, evidenciando que a adição da cinza volante proporciona uma redução dos álcalis disponíveis nos poros de concreto, como afirmam Shafaatian *et al.* (2013), Kawabata e Yamada (2015)

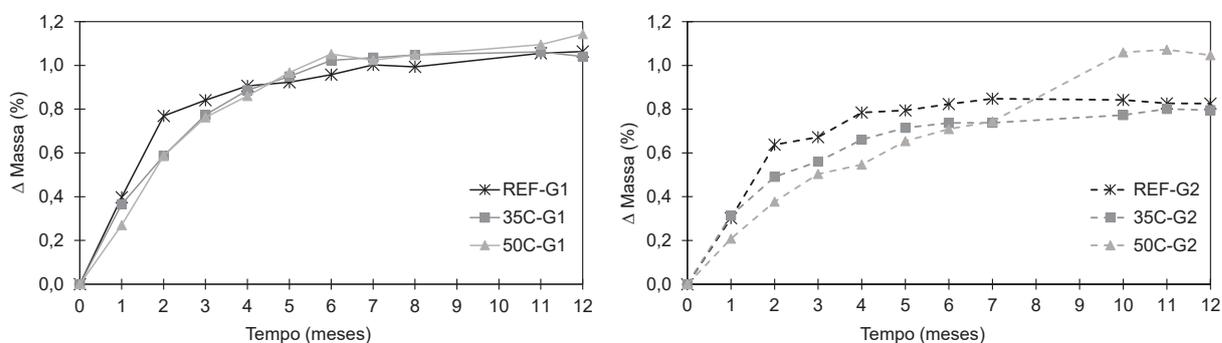
e Menéndez *et al.* (2021).

FIGURA 4.14 – A - Corpos de prova de expansão (Agregado G1); B - Corpos de prova de expansão (Agregado G2), aos 365 dias de acompanhamento



A Figura 4.15 mostra a variação de massa dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2.

FIGURA 4.15 – Variação de massa dos concretos ao longo do tempo



Para ambos os agregados (G1 e G2), as amostras contendo 50% de cinza volante foram as que apresentaram maior variação de massa ao final do ensaio. Devido à baixa área específica da cinza volante utilizada, esse resultado poderia ser esperado,

ainda mais quando há um elevado teor de cinza volante no sistema. De acordo com HOPPE FILHO (2008) a utilização de pozolana na composição do ligante substitui parte da portlandita por C-S-H, o que causa o refinamento da estrutura porosa. Há o refinamento dessa matriz durante todo o período de hidratação, proporcionando uma redução no diâmetro médio dos poros, o que contribui no desempenho do concreto frente aos mecanismos de degradação, uma vez que há a maior formação de C-S-H devido à reação pozolânica, causando também um aumento na densidade do concreto. Além disso, destaca-se que neste caso, a maior variação de massa não implica em maior expansão e deterioração dos corpos de prova.

De acordo com Shafaatian *et al.* (2013) e Saha *et al.* (2018) existem alguns mecanismos de atuação da cinza volante na mitigação da RAS: a redução dos álcalis nos poros do concreto devido à substituição de parte do cimento pela cinza volante (SHAFATIEN *et al.*, 2013; KAWABATA; YAMADA, 2015); a maior facilidade de ligação do C-S-H pozolânico com os íons alcalinos e hidroxilas presentes nos poros (MENÉNDEZ *et al.*, 2021); a melhora da resistência à tração (SHAFATIEN *et al.*, 2013); a modificação da composição química do gel da RAS; o consumo de portlandita pela reação pozolânica e o fornecimento de alumina, que proporciona a formação do C-A-S-H, que tem alta capacidade de ligação alcalina (SZELES *et al.*, 2017).

Além disso, Saha *et al.* (2018), Figueira *et al.* (2019) e Menéndez *et al.* (2021) citam que a quantidade e o tipo de adição pozolânica utilizada são fatores que tem forte influência na mitigação da RAS. Teores maiores de incorporação de cinza volante tendem a apresentar melhor desempenho frente a mitigação da RAS, como pôde ser observado por Shehata e Thomas (2002) e Menéndez *et al.* (2020) em seus estudos. Shehata e Thomas (2002) tiveram melhores resultados em misturas contendo 50% de cinza volante. Menéndez *et al.* (2020) mostram que os maiores teores incorporados na pesquisa, ou seja, 50% para pozolana natural, 40% para cinza volante, 15% para sílica ativa e 40% para escória de alto forno, foram as misturas que apresentaram melhores resultados frente ao ensaio de expansão. Fato este que corrobora com o resultado encontrado neste estudo.

Outro ponto importante é que a composição química da cinza volante utilizada se mostrou favorável a seu desempenho. De acordo com Lindgård *et al.* (2012) cinzas volantes com elevada quantidade de sílica e alumina contribuem na mitigação da RAS. A cinza volante utilizada apresenta 84,1% de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ , e baixa quantidade de cálcio (1,60%). Thomas (2011) mostra que cinzas volantes com maiores teores de cálcio e álcalis em sua composição são menos eficientes no controle da RAS.

#### 4.3.2 Análise da deterioração dos corpos de prova

A análise da deterioração dos corpos de prova devida a RAS contou com os ensaios de SDT e DRI.

A partir do ensaio de SDT é possível avaliar a extensão da fissuração devido a RAS. Os índices SDI (Índice de Dano da Rigidez) e PDI (Índice de Deformação Plástica) são parâmetros representativos do ponto de vista do dano no concreto causado pela reação deletéria (SANCHEZ, 2014; SANCHEZ *et al.*, 2015) e, portanto, utilizados para expressar os resultados deste ensaio. O SDI representa a razão entre a energia dissipada/energia total e o PDI a razão entre a deformação plástica/deformação total (SANCHEZ, 2014).

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram os resultados da relação tensão-deformação obtidos para alguns dos corpos de prova de concreto de referência dos agregados G1 e G2, respectivamente.

Ao iniciar os testes de SDT houve um problema relacionado a aquisição dos dados de leitura por parte do extensômetro, problema este que gerou ruído em algumas curvas. Por este motivo, os danos nos corpos de prova aos 28 dias tendem a parecer maiores que aos 91 dias de acompanhamento. Esse fator pode ser observado nas Figuras 4.16 e 4.17, onde a área de histerese aos 28 dias tende a parecer maior que aos 91 e 182 dias. Esse problema ocorreu em algumas séries e em idades diferentes.

FIGURA 4.16 – Representação dos resultados de tensão-deformação dos corpos de prova REF-G1 aos 28, 91, 182 e 365 dias

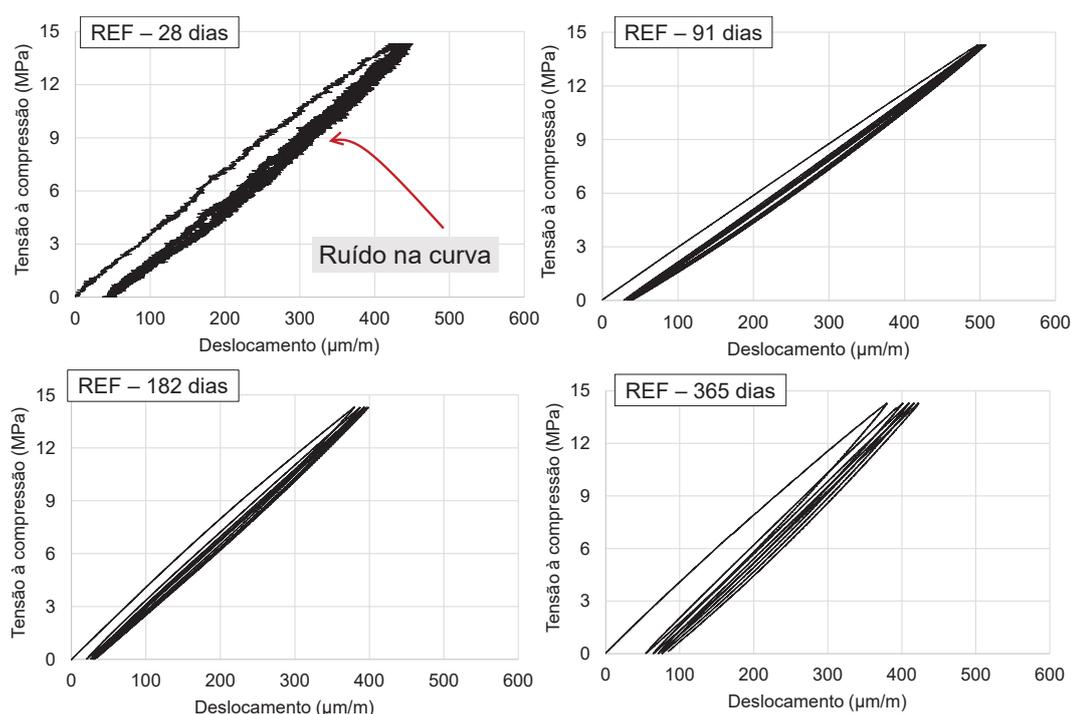
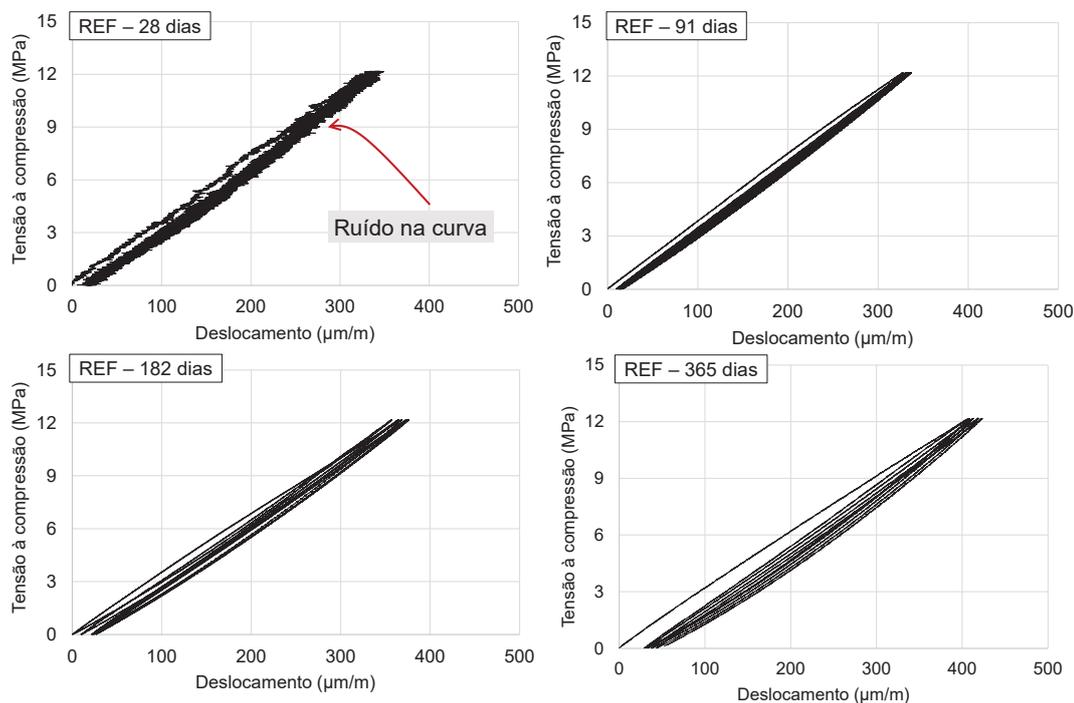
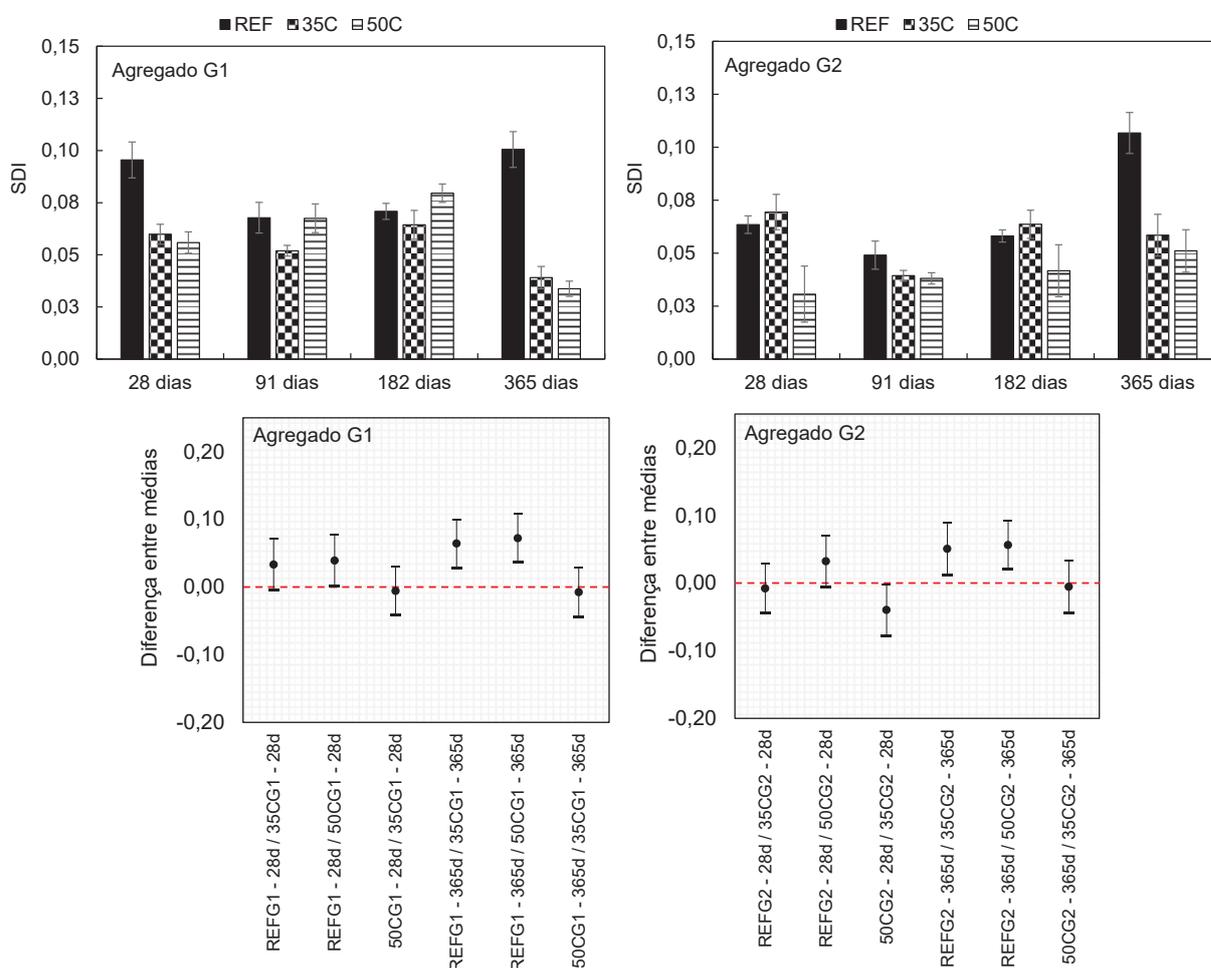


FIGURA 4.17 – Representação dos resultados de tensão-deformação dos corpos de prova REF-G2 aos 28, 91, 182 e 365 dias



A Figura 4.18 mostra os resultados do SDI para os corpos de prova contendo os agregados G1 e G2. Em cada barra do gráfico é representada a média dos resultados de 5 corpos de prova e a barra de erro padrão desta média. Para avaliação dos resultados foi realizada análise estatística ANOVA e comparação entre médias utilizando o Teste de Tukey com um intervalo de 95% de confiança. Na Figura 4.18 foram plotadas apenas as diferenças entre médias das idades iniciais (28 dias) e finais (365 dias) do ensaio.

FIGURA 4.18 – Resultados do SDI dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança



Na Figura 4.18 é possível observar o aumento do SDI ao longo do tempo, principalmente na série de referência, tanto para o agregado G1, quanto para o G2. Ao fim do acompanhamento, as séries com cinza volante foram as que apresentaram menores valores de SDI. Cabe ressaltar que as séries com adição de cinza volante, para o agregado G1, foram as que mais sofreram com o ruído na curva proveniente do ensaio. Já nas séries com cinza volante contendo agregado G2, fica clara a diferença na evolução do SDI ao longo do tempo. Tanto as amostras contendo o agregado G1 quanto o agregado G2 apresentaram diferença estatística significativa entre os valores de SDI obtidos para as referências (REF-G1 e REF-G2) e as amostras contendo cinza volante (35C e 50C) aos 365 dias de avaliação.

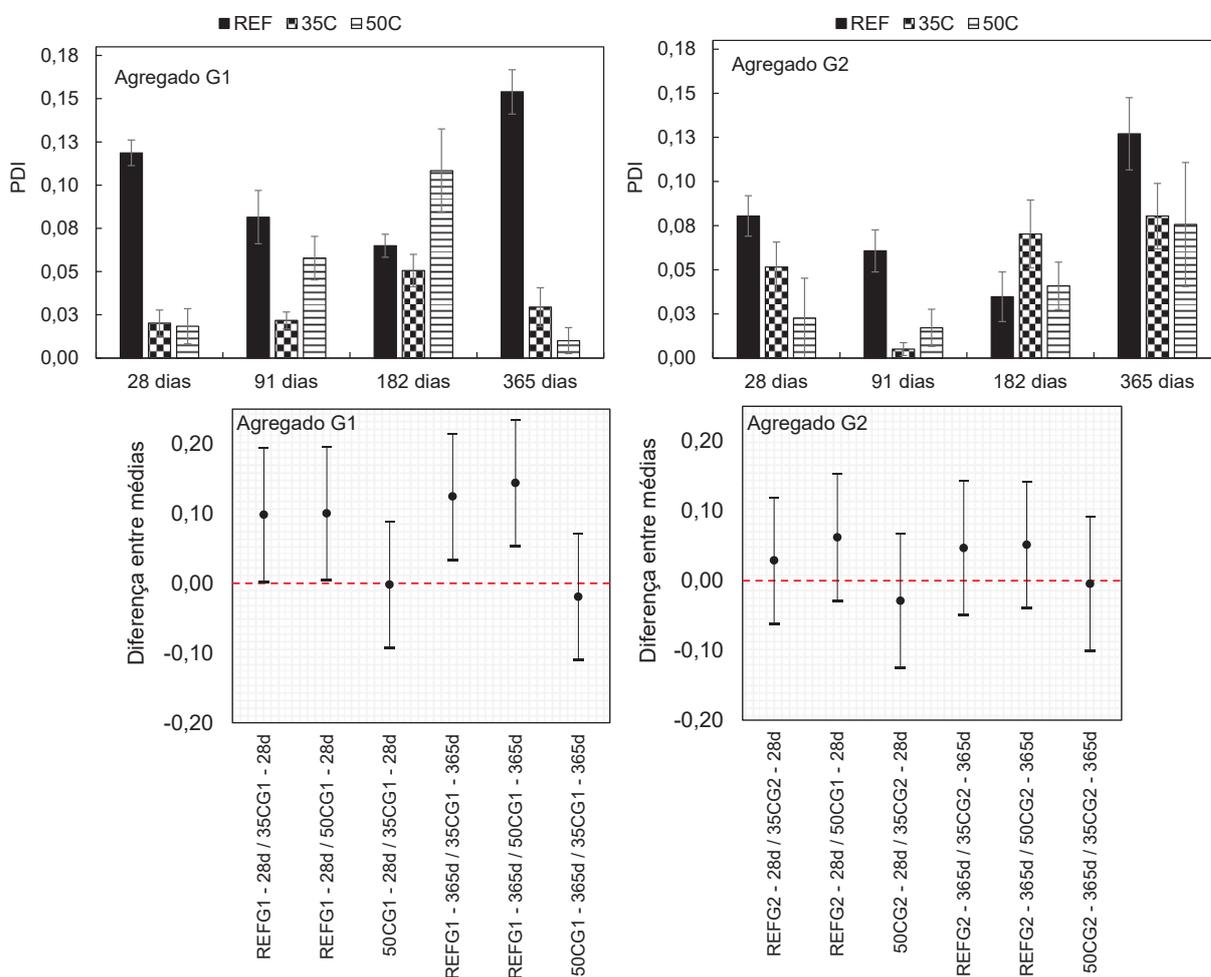
Os concretos de referência contendo os agregados G1 e G2 apresentaram SDI igual a 0,10 e 0,11, respectivamente, aos 365 dias, não apresentando diferença estatística significativa pelo teste de Tukey com um intervalo de confiança de 95%.

Valores estes também baixos para o nível de expansão encontrado (0,170% e 0,07%) nos corpos de prova cilíndricos, se comparados a concretos e agregados já estudados por Sanchez (2014), Sanchez *et al.* (2017), Sanchez *et al.* (2017). Entretanto, cabe ressaltar que os agregados utilizados neste estudo são de procedência do Brasil, com características diferentes e, portanto, são necessários mais testes neste sentido com uma gama de agregados brasileiros para verificar as correlações entre os índices do SDT e a expansão.

Além disso, Sanchez *et al.* (2016a), Sanchez *et al.* (2016b), Sanchez *et al.* (2017), Sanchez *et al.* (2017) desenvolveram um estudo bem extenso sobre o uso das ferramentas de diagnóstico e prognóstico da RAS em diversas misturas de concreto contendo diferentes agregados reativos. Em seus estudos, os autores afirmam que pela lei da energia mínima, é mais fácil para o sistema propagar as fissuras já existentes nos agregados (podendo ser aquelas provenientes dos processos de beneficiamento dos mesmos) do que gerar novas fissuras. Nesta tese foi observada uma grande quantidade de fissuras (tanto abertas como fechadas) preexistentes nos agregados, como poderá ser visto nos resultados de DRI. Portanto, é possível que estas fissuras tenham apenas se propagado ao longo do tempo.

A Figura 4.19 mostra os resultados do PDI para os corpos de prova contendo os agregados G1 e G2. Para avaliação dos resultados foi realizada análise estatística ANOVA e comparação entre médias utilizando o Teste de Tukey com um intervalo de 95% de confiança. Na Figura 4.19 foram plotadas apenas as diferenças entre médias das idades iniciais (28 dias) e finais (365 dias) do ensaio.

FIGURA 4.19 – Resultados do PDI dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança



O índice de deformação plástica também foi crescente ao longo do tempo de acompanhamento. Aos 365 dias, as séries de referência, para ambos os agregados, apresentaram valores de PDI de 0,15 para REF-G1 e 0,13 para REF-G2. Resultados estes maiores que as séries com adição de cinza volante, entretanto estatisticamente semelhantes. Cabe ressaltar que pela análise estatística com um intervalo de 95% de confiança, os resultados se mostraram semelhantes e próximos ao limite da zona. Caso o intervalo de confiança fosse de 90%, estes resultados se apresentariam como estatisticamente diferentes.

Os corpos de prova da série 50C, para ambos os agregados, foram os que obtiveram menor índice de deformação plástica ao final do acompanhamento, 0,01 para 50C-G1 e 0,08 para 50C-G2. Para o agregado G1, em todas as idades, as séries contendo cinza volante (35C e 50C) apresentaram valores de PDI diferentes estatisticamente da série de referência. Entre as séries contendo 35% e 50% de cinza

volante, não houve diferença estatística nos valores obtidos. Para o agregado G2, em todas as idades, os valores de PDI obtidos se apresentaram estatisticamente semelhantes.

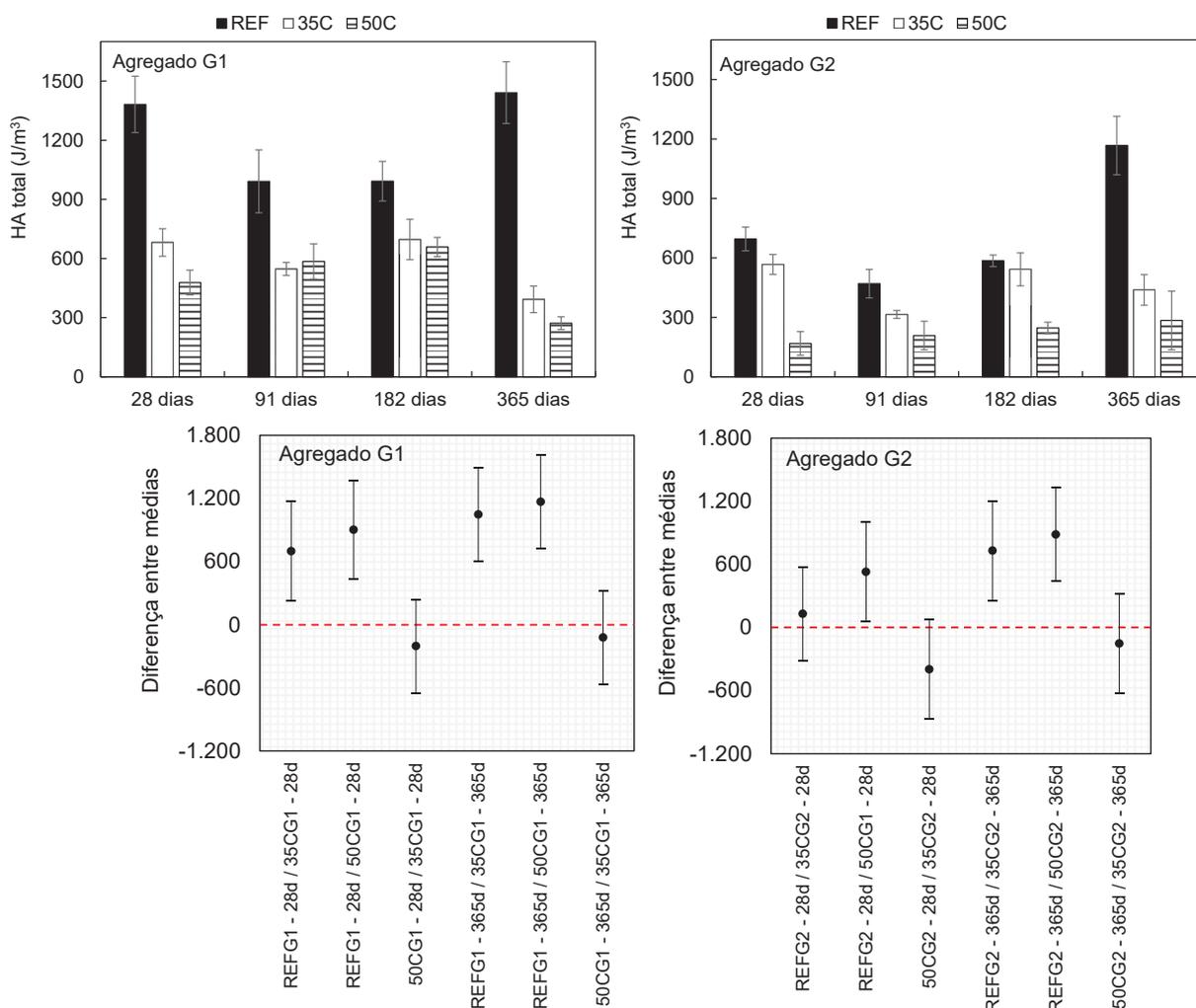
É possível notar que também há uma involução nas respostas de SDI e PDI para os concretos contendo cinza volante ao longo do tempo. Esse fator pode estar relacionado ao fato de que adições minerais, como a cinza volante, possuem um efeito de autocicatrização ao longo do tempo, pois as reações de hidratação e formação de produtos, como o C-S-H, continuam após os 28 dias (TERMKHAJORNKIT *et al.*, 2009; TITTELBOOM *et al.*, 2012).

A cicatrização autógena é um fenômeno natural e presente no concreto, que ocorre devido ao processo de hidratação ou também pela carbonatação do hidróxido de cálcio e formação do  $\text{CaCO}_3$  que se deposita nas fissuras (TITTELBOOM *et al.*, 2012; TITTELBOOM; BELIE, 2013). Mas esse processo no concreto é limitado a pequenas fissuras, e depende de partículas não hidratadas e água disponível. Dessa forma, diversos estudos Şahmaran *et al.* (2008), Termkhajornkit *et al.* (2009), Tittelboom *et al.* (2012), Zhang, Vandeperre e Cheeseman (2014), Zhang, He e Poon (2020) trazem abordagens para potencializar a autocicatrização do concreto a partir do uso de outros materiais, como cristalizantes, fibras, bactérias e o uso de adições minerais, como a cinza volante.

Outro resultado interessante de ser analisado é a área de histerese total ( $\text{J/m}^3$ ). A Figura 4.20 mostra os resultados obtidos para todas as misturas contendo os agregados G1 e G2, durante os 5 ciclos de carregamento/descarregamento. Para avaliação dos resultados foi realizada análise estatística ANOVA e comparação entre médias utilizando o Teste de Tukey com um intervalo de 95% de confiança. Na Figura 4.20 foram plotadas apenas as diferenças entre médias das idades iniciais (28 dias) e finais (365 dias) do ensaio.

A área de histerese obtida corresponde à energia utilizada para fechar as macro e microfissuras contidas nos corpos de prova (agregado e pasta). Os concretos danificados apresentam maior área de perda de energia, ou seja, maior área de histerese (CHRISP; WALDRON; WOOD, 1993; SMAOUI *et al.*, 2004a; SANCHEZ, 2014).

FIGURA 4.20 – Área de histerese - corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança



Apesar do erro causado pelo ruído nos testes iniciais, é possível observar que há uma maior perda de energia para o fechamento das fissuras com o passar do tempo. Isso corrobora com os demais parâmetros do SDT e também com os dados de expansão obtidos para ambos os agregados. As séries contendo adição de cinza volante, principalmente a série 50C, apresentaram menor área de histerese no ensaio, ou seja, é possível observar o efeito benéfico da cinza volante ao longo do tempo. E esse fator pode ser caracterizado também pela autocicatrização desse material que, de certa forma, pode ter contribuído para o fechamento de fissuras ao longo do tempo de hidratação. Além disso, a quantidade de cinza volante adicionada faz toda a diferença neste processo (TERMKHAJORNKIT *et al.*, 2009).

A área de perda de energia proporcionada aos 365 dias, para a série REF com agregado G1, foi em média 31% maior que aos 91 dias de avaliação. Já para

a série REF-G2, esta área foi de aproximadamente 60% maior aos 365 dias quando comparada aos 91 dias. Aos 365 dias os valores obtidos para a área de histerese das séries de referência (REF-G1 e REF-G2) foram estatisticamente diferentes das séries contendo cinza volante (35C e 50C), evidenciando a eficácia da cinza volante em reduzir os danos causados pela RAS. Entre porcentagens de cinza volante, tanto para o agregado G1 quanto para o G2, não houve diferença estatística significativa em nenhuma das idades. Entre as séries de referência (REF-G1 e REF-G2), aos 365 dias, não houve também diferença estatística significativa nos resultados de área de histerese obtidos.

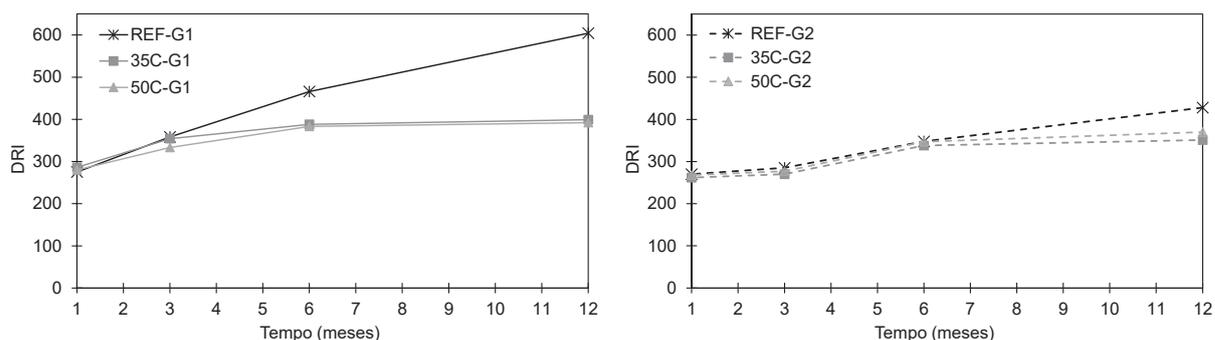
Sanchez *et al.* (2017) sugerem, a partir dos resultados encontrados, que uma quantidade razoável de fissuras são formadas em níveis baixos ou moderados de expansão (acima de 0,05% e abaixo de 0,20%) pela progressão da RAS. Conseqüentemente, uma maior quantidade de energia é gasta pelo sistema para fechar estas fissuras, aumentando os resultados obtidos para os índices de PDI e SDI. Fato este observado nos resultados obtidos nesta tese.

E, apesar de pesquisas (SANCHEZ *et al.*, 2017; SOUZA, 2022) indicarem perda nas propriedades mecânicas do concreto, principalmente no módulo de elasticidade; neste estudo não se observou perda significativa destas propriedades nas misturas testadas, tanto de referência quanto nos concretos com adição de cinza volante.

Com o objetivo de compreender melhor o dano causado pela RAS e as características microscópicas das fissuras desenvolvidas a partir da reação deletéria, o Índice de Classificação de Danos (DRI) foi utilizado.

A Figura 4.21 mostra a evolução do DRI ao longo do tempo, para ambos os agregados. De forma geral, os números de DRI aumentaram para todas as séries ao longo do tempo.

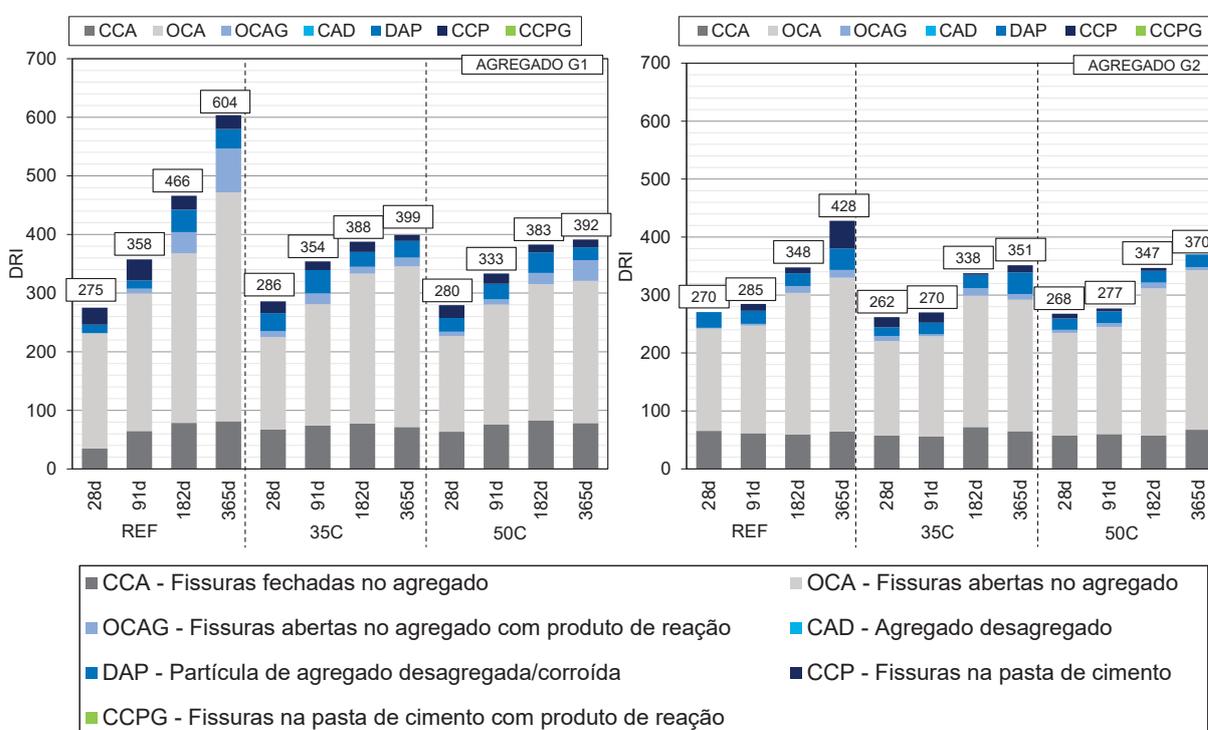
FIGURA 4.21 – Evolução do DRI ao longo do tempo para todas as séries contendo os agregados G1 e G2



É possível observar que a série de referência (REF) contendo o agregado G1 foi a que apresentou o maior número de DRI aos 365 dias, corroborando com os resultados dos ensaios de expansão e SDT obtidos. Os corpos de prova contendo agregado G2 obtiveram números de DRI menores que os corpos de prova contendo o agregado G1, como esperado. Além disso, cabe destacar que a cinza volante teve influência nos valores obtidos a partir da idade de 182 dias apenas, fato observado também nos ensaios de expansão.

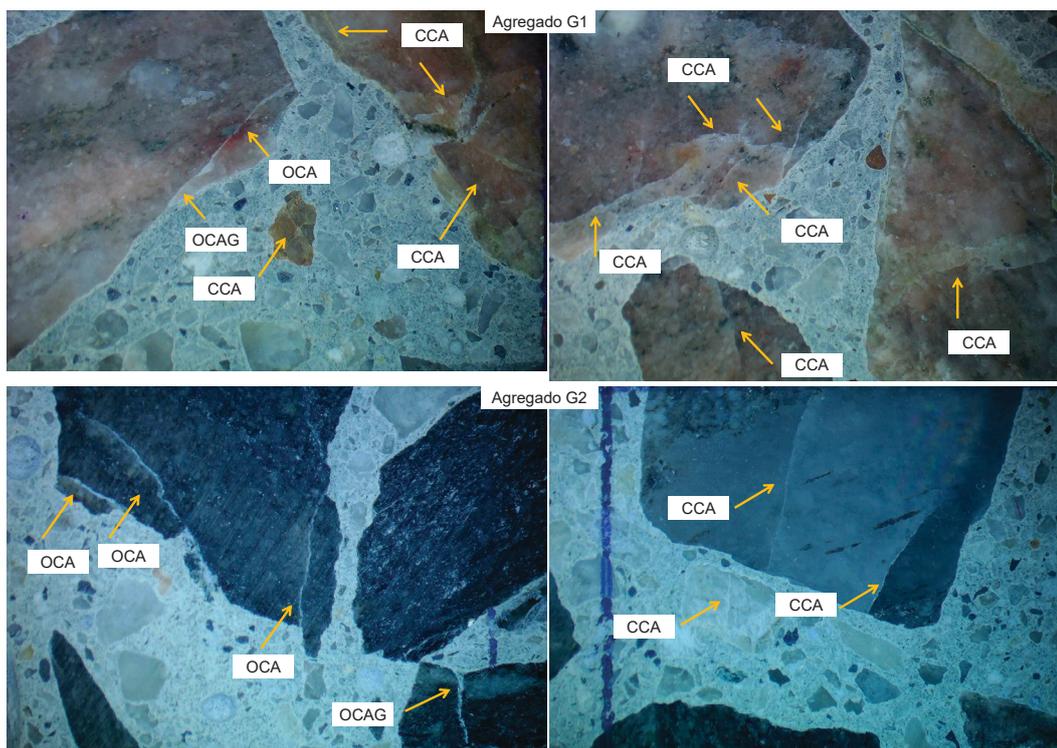
A Figura 4.22 mostra as características petrográficas para todas as séries dos concretos contendo os agregados G1 e G2, aos 28, 91, 182 e 365 dias.

FIGURA 4.22 – Características petrográficas dos concretos contendo os agregados G1 e G2, analisados ao longo do tempo



Foi possível observar pela análise de DRI que ambos os agregados utilizados já apresentavam microfissuras nas primeiras idades. Essas microfissuras possivelmente não estão associadas ao desenvolvimento da reação deletéria, mas sim a particularidades dos próprios agregados utilizados provenientes de processos de britagem e/ou intemperismo. A Figura 4.23 mostra imagens feitas pelo microscópio com aproximação de 16X das séries de referência de ambos os agregados, aos 28 dias.

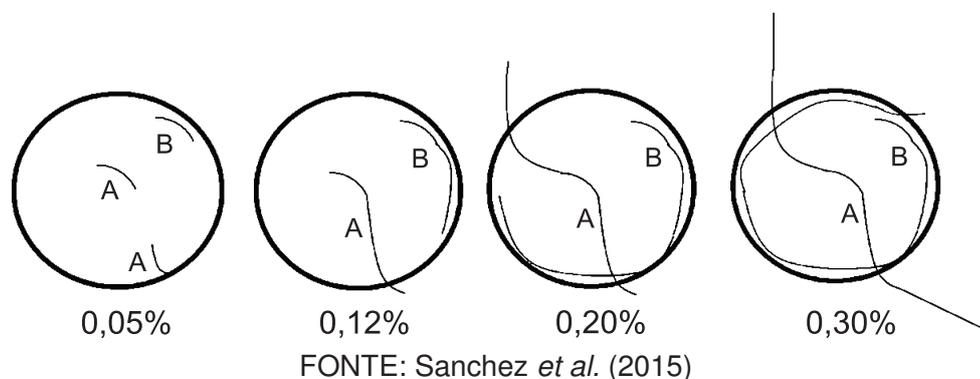
FIGURA 4.23 – Fissuras observadas nos agregados G1 e G2



Nas imagens são observadas diversas fissuras. Essas condições foram encontradas nas séries contendo adição de cinza volante já nas primeiras idades, o que evidencia também que essas fissuras podem ser preexistentes, surgidas de processos de intemperismo e/ou no próprio beneficiamento dos agregados.

Entretanto, como pode ser observado na Figura 4.22, as fissuras tendem a aumentar ao longo do tempo. De acordo com Sanchez *et al.* (2015), Sanchez *et al.* (2017) o dano causado pela RAS inicia-se dentro das partículas dos agregados reativos e com o avanço da reação deletéria essas fissuras progridem para a pasta de cimento. Os autores ainda destacam dois tipos de fissuras tipicamente encontradas nos agregados estudados, o tipo A, chamado de "*sharp*", e o tipo B, chamado de "*onion skin/echelon*" ou casca de cebola (Figura 4.24). A partir da análise de DRI realizada, pôde-se encontrar, com maior frequência, para ambos os agregados (G1 e G2), fissuras do tipo A.

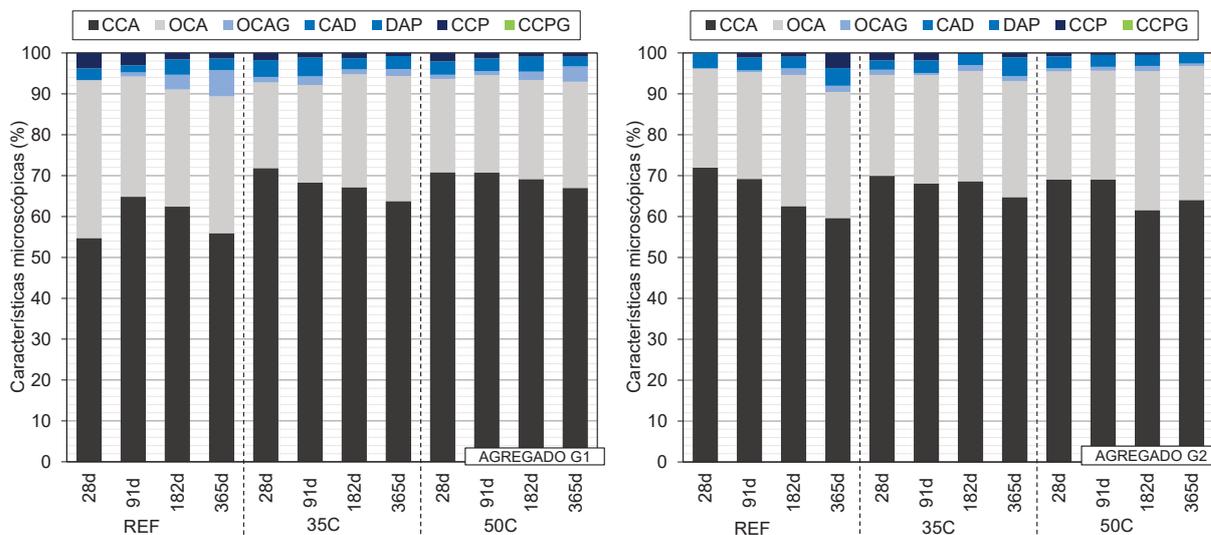
FIGURA 4.24 – Imagem representativa do modelo qualitativo do dano devido a RAA contendo os dois tipos de fissuras tipicamente presentes no agregado - tipo A "sharp" e tipo B "onion skin/echelon" - e sua evolução de acordo com o nível de expansão



Quando se analisa a expansão dos corpos de prova e a progressão das fissuras para a pasta ao longo do tempo de acompanhamento (365 dias), tem-se que para o nível de expansão atingido (ou seja, 0,17 % e 0,07%), de acordo com estudos realizados por Sanchez *et al.* (2015), Sanchez *et al.* (2016b), Sanchez *et al.* (2017), não é tão significativa. Isso pôde ser observado na análise microscópica, uma vez que, apesar da quantidade de fissuras encontradas na pasta (CCP) ser crescente ao longo do tempo, as fissuras abertas nos agregados (OCA) foram as que tiveram aumento mais significativo, como pode ser observado na Figura 4.25. A Figura 4.25 mostra as características microscópicas encontradas nas amostras, desconsiderando os fatores de ponderação do ensaio.

No geral, o desenvolvimento de danos decorrentes da RAS contendo adição de cinza volante apresenta características semelhantes ao concreto de referência, entretanto a quantidade adicionada de cinza volante reduz a deterioração do concreto ao longo do tempo. Isso também foi observado por Souza (2022), que estudou diferentes tipos de adições minerais, inclusive cinza volante, incorporadas a concretos com agregados reativos.

FIGURA 4.25 – Características microscópicas das misturas (desconsiderando os fatores de ponderação) contendo os agregados G1 e G2



Quanto maior o nível de substituição da adição, menor o número de DRI (Figura 4.23) e também a quantidade de fissuras na pasta (CCP) encontradas (Figura 4.25). Além disso, os resultados de DRI corroboram com os de SDT encontrados para as misturas com cinza volante, uma vez que foi observada uma quantidade maior de fissuras abertas nos agregados (OCA) para as séries de referência se comparadas as séries contendo a adição mineral. Ao longo do tempo isso é evidenciado, reforçando a hipótese de que a cinza volante pode ter contribuído para a autocicatrização das fissuras devido o seu processo de hidratação continuado.

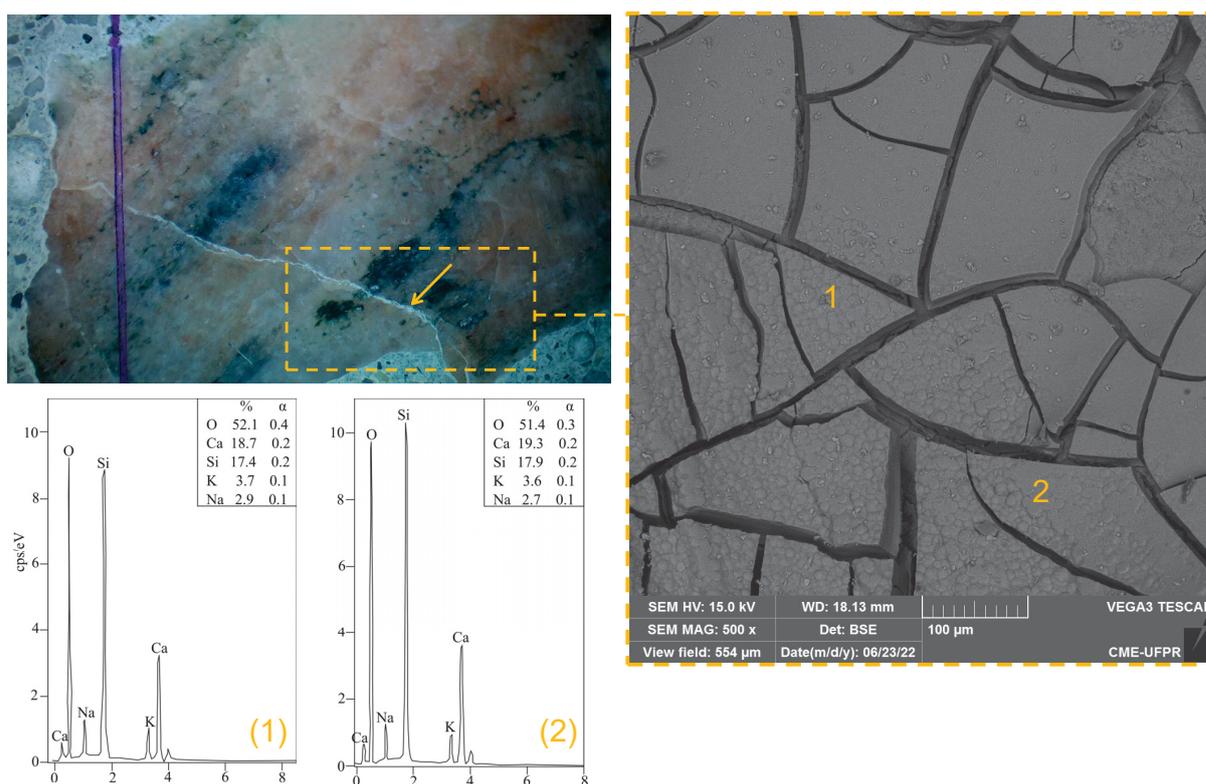
Outra característica observada foi o aparecimento de gel nas fissuras dos agregados (OCAG). Apesar de não linear, a tendência ao aparecimento de gel reduziu com a incorporação da adição mineral (no agregado - OCAG) (Figura 4.23 e Figura 4.25). Já no concreto de referência, contendo o agregado G1, foram observados diversos pontos contendo gel da RAS.

A fim de identificar o gel formado, aos 365 dias amostras dos concretos contendo os agregados reativos foram levados para o microscópio eletrônico de varredura (MEV) com detector de dispersão de energia de raios-X (EDS). As micrografias foram obtidas através do microscópio FEG SEM Tescan Mira 3 com microsonda analítica de raios-X Oxford X-Max 50 (EDS), com aumento de 100x a 30000x. A preparação das amostras para o ensaio consistiu em secagem e metalização com carbono. As amostras utilizadas foram retiradas dos concretos utilizados no ensaio de SDT, os quais foram rompidos com a utilização da prensa após a execução do ensaio. Alguns

fragmentos contendo pasta e agregado foram selecionados, a partir do microscópio óptico, para serem analisados no microscópio eletrônico de varredura.

Na Figura 4.26 é possível observar o gel da reação álcali-silica que foi encontrado em diversos agregados (G1) presentes nas amostras de concreto de referência. Foram identificados diversos pontos contendo a estrutura mostrada na micrografia, e através do EDS pôde-se confirmar a ocorrência. O gel de RAS é composto basicamente por sílica, cálcio e água, bem como os álcalis presentes (potássio e sódio), e pode ser representada, de forma geral, como  $\text{SiO}_2 \cdot (\text{Na}_2\text{O})_n \cdot (\text{K}_2\text{O})_k \cdot (\text{CaO})_c \cdot (\text{H}_2\text{O})_x$  (VAYGHAN; RAJABIPOUR; ARNDT, 2016). Esses elementos puderam ser identificados pelo EDS realizado nos pontos 1 e 2 da amostra. E, como pode ser observado na micrografia, a formação é típica do gel gretado proveniente da RAS.

FIGURA 4.26 – Gel de RAS presente nos concretos de referência contendo o agregado G1



Nas amostras de concreto com agregado G2 não foram encontradas tais formações no microscópio eletrônico de varredura nas amostras selecionadas. Entretanto, isso não caracteriza que não houve formação de gel; apenas não foi encontrado indício de tal formação nos fragmentos que foram ensaiados. Já nas amostras contendo agregado G1, a formação do gel característico da RAS foi facilmente identificado.

Embora se sabe que a cinza volante modifica a cinética da RAS nos concretos (SHEHATA; THOMAS, 2002; SHAFATIAN *et al.*, 2013; SAHA *et al.*, 2018), pôde-se verificar que o desenvolvimento das características decorrentes da reação deletéria, observadas a partir dos ensaios de diagnóstico utilizados, são semelhantes ao de concretos convencionais. Entretanto, é claro, que em menor escala, uma vez que a adição proporciona um retardo no desenvolvimento da reação álcali-sílica.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como objetivo compreender os mecanismos de desenvolvimento da reação álcali-sílica, em concretos com diferentes teores de cinza volante (35% e 50%) e diferentes agregados reativos (G1 e G2), utilizando técnicas de diagnóstico da reação.

- No geral, os mecanismos de desenvolvimento dos danos causados pela RAS são semelhantes em concretos com ou sem adição da cinza volante. Sendo apenas seu desenvolvimento mais lento.
- Quanto maior o nível de substituição (ou seja, neste caso 50%), menores os resultados de expansão obtidos. Além disso, pôde-se observar também que a adição de cinza volante proporcionou menor lixiviação dos álcalis no ensaio de CPT.
- Quanto ao ensaio de SDT, os índices PDI e SDI obtidos também foram inferiores para os concretos contendo adição de cinza volante. Entretanto, os valores não se encaixaram nas faixas usuais obtidas na literatura para o nível de expansão atingido. Fato este que justifica a realização de uma extensa campanha experimental, com agregados provenientes do Brasil, que consiga caracterizar melhor o desenvolvimento dos mecanismos de danos decorrentes da RAS utilizando as ferramentas de diagnóstico e prognóstico da reação.
- Do ponto de vista microscópico, apesar da quantidade de fissuras encontradas na pasta ser crescente ao longo do tempo, as fissuras abertas nos agregados foram as que tiveram aumento mais significativo. Entretanto, pode-se observar que grande parte das fissuras contabilizadas no ensaio, ao longo do tempo, são providas da progressão daquelas já preexistentes.
- O valor de DRI obtido ao longo do tempo do estudo foi menor para os concretos contendo a adição mineral. Além disso, a quantidade de fissuras encontradas na

pasta também foi menor se comparada aos concretos de referência.

- Quando comparados os dois agregados (G1 e G2) pôde-se observar, pelos resultados, que o agregado G1 apresentou maior potencial reativo e, portanto, maiores valores de SDI, PDI e DRI para todas as misturas. Além disso, pela análise de MEV-EDS pôde-se encontrar gel da RAS em amostras de concreto contendo agregado G1.
- Por fim, mais estudos são necessários neste sentido, uma vez que foi incorporada apenas um tipo de adição mineral neste estudo e apenas dois agregados foram testados. Faz-se necessário uma gama de agregados reativos, uso de diferentes adições minerais e porcentagens de substituição para compreender melhor os efeitos causados pela RAS e a cinética da reação quando do uso destas adições.

## 5 TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE PARA REDUZIR OS EFEITOS DA RAS EM CONCRETOS

### 5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E OBJETIVO DO CAPÍTULO

O uso de tratamentos de superfície no concreto tem como objetivo contribuir para o aumento de vida útil do elemento onde são aplicados, prolongando sua durabilidade.

São vários os tipos de tratamento que podem ser aplicados, dependendo do fim que se pretende atingir. Silanos e siloxanos têm sido bastante estudados para aplicação em concretos submetidos a ambientes com cloretos e sulfatos (RAUPACH; BUETTNER, 2009; MEDEIROS *et al.*, 2012; SULEIMAN; SOLIMAN; NEHDI, 2014). Para redução da taxa de expansão devido à reação álcali-sílica, esse tipo de tratamento também tem se apresentado como uma boa opção (BÉRUBÉ *et al.*, 2002a; BÉRUBÉ *et al.*, 2002b; DESCHENES, 2017). Já o uso de materiais como silicatos para esse fim é pouco estudada, uma vez que esse material normalmente não apresenta a capacidade hidrofóbica que os silanos e siloxanos têm demonstrado (CAI *et al.*, 2016).

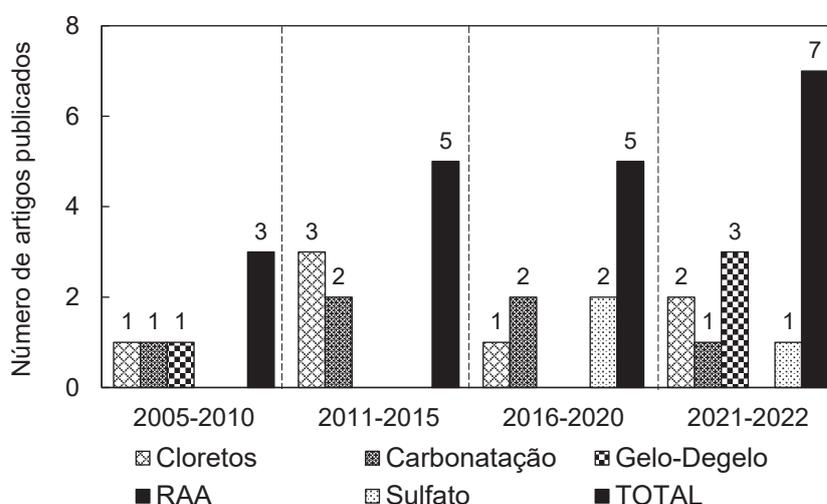
Pesquisas (PIGINO *et al.*, 2012; FRANZONI; PIGINO; PISTOLESI, 2013; HOU *et al.*, 2016; GUO *et al.*, 2018) mostram que um tipo de silicato de etila, reconhecida-mente como ortosilicato de tetraetila (TEOS), tem apresentado bons resultados como tratamento de superfície em concretos submetidos a agentes agressivos. Esse tipo de silicato, penetra facilmente na superfície devido a sua baixa viscosidade (HOU *et al.*, 2016) e, têm mostrado certa propriedade hidrofóbica atrelada a capacidade de bloquear poros e formar produtos como o C-S-H (GUO *et al.*, 2018).

A reação do TEOS ocorre em duas etapas, primeiro a hidrólise, formando silanol e etanol; depois há o processo de desidratação e condensação do silanol, formando assim uma sílica gel que preenche os poros do material (SANDROLINI; FRANZONI; PIGINO, 2012). No concreto essa sílica pode reagir com o hidróxido de cálcio, presente nos poros, formando o C-S-H, que é responsável pelas propriedades mecânicas do material (BARBERENA-FERNÁNDEZ; CARMONA-QUIROGA; BLANCO-VARELA, 2015; GUO *et al.*, 2018). Porém, os resultados ainda são incipientes sobre o uso desse material e há diversas lacunas na literatura sobre a eficácia desse tipo de tratamento, principalmente quando se trata da reação álcali-agregado.

A Figura 5.1 mostra um panorama geral dos números de artigos publicados em periódicos internacionais nas últimas três décadas utilizando este tipo de trata-

mento. A busca pelos dados mostrados na Figura 5.1 se deu através de uma revisão sistemática sobre o tema. A pesquisa foi feita em três bases de dados, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. Foram feitas diversas combinações entre as palavras-chave: "surface treatment", "surface coating", "concrete", "TEOS", "tetraethyl orthosilicate", "tetraethoxysilane", "hardened cement-based materials". Além disso, essas palavras foram ainda relacionadas aos seguintes processos de deterioração para uma segunda busca mais refinada: "alkali-silica reaction", "alkali-aggregate reaction", "freeze thaw", "chloride", "carbonation", "sulfate attack". Os artigos foram filtrados utilizando dois critérios principais: artigos experimentais; e se o tratamento de superfície foi utilizado para evitar ou diminuir algum tipo de deterioração no concreto. Existem muitos outros artigos estudando diversas propriedades dos concretos quando submetidos ao uso de tratamentos de superfície, além do uso de outros tipos de tratamento de superfície, porém estes não foram contemplados nesta busca. Foram apenas selecionados artigos publicados em periódicos.

FIGURA 5.1 – Artigos publicados em periódicos entre os anos de 1990 a abril de 2022 - Uso de TEOS como tratamento de superfície no concreto



A busca por artigos mostrou que as aplicações em concreto são em grande parte para entender o comportamento do TEOS frente a degradação relacionada ao ataque por cloretos e a carbonatação (CHO; NOH; SONG, 2009; PIGINO *et al.*, 2012; FRANZONI; PIGINO; PISTOLESI, 2013; GUO *et al.*, 2018) além de poucos trabalhos sobre gelo-degelo e ataque por sulfatos (CHO; NOH; SONG, 2009; HOU *et al.*, 2016; GUO *et al.*, 2018; LI; WU; WU, 2022). O estudo de revisão sistemática deixou evidente que, considerando as 3 bases de dados utilizadas, não existe artigo publicado focado no efeito do TEOS com o intuito de investigar a redução dos efeitos da RAS. Pode-se considerar que este é um ponto de inovação desta tese de doutorado.

Boa parte das pesquisas publicadas visam compreender os efeitos do TEOS aplicado ao concreto e sua compatibilidade com o mesmo (SANDROLINI; FRANZONI; PIGINO, 2012; HOU *et al.*, 2014; KONG *et al.*, 2015; HOU *et al.*, 2015; BADER *et al.*, 2019; BARBERENA-FERNÁNDEZ; BLANCO-VARELA; CARMONA-QUIROGA, 2019; GARCÍA-LODEIRO *et al.*, 2021; GONZÁLEZ-CONEO *et al.*, 2022). Além disso, alguns dos artigos trazem a utilização deste material atrelado a outros com a finalidade de melhorar seu desempenho (BARBERENA-FERNÁNDEZ; BLANCO-VARELA; CARMONA-QUIROGA, 2019; KAPETANAKI *et al.*, 2020; GARCÍA-LODEIRO *et al.*, 2021).

Este capítulo tem como objetivo avaliar a eficiência do tratamento de superfície no desencadeamento da RAS. A utilização de silicato de etila com duas composições diferentes de  $\text{SiO}_2$  visa entender os mecanismos de ação desse tipo de tratamento, buscando contribuir com a literatura já existente sobre o tema. A busca por esse material se deu pela sua baixa viscosidade, portanto fácil penetração, além de que autores como Franzoni, Pigino e Pistolesi (2013) mostraram que o TEOS reduz a permeabilidade do concreto sem o fechamento total dos poros ou formação de um filme, permitindo assim que a umidade saia do concreto, mas limitando sua entrada; o que pode contribuir positivamente na redução da expansão devido a RAS.

## 5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 5.2.1 Materiais

Para a realização dos ensaios deste capítulo, foram utilizados os mesmos materiais do capítulo 4, exceto a cinza volante. Como o intuito deste capítulo é avaliar tratamentos de superfície, o uso de um cimento composto por adições minerais poderia inibir ou retardar a RAS e conseqüentemente não se ter bons parâmetros de avaliação.

Para o tratamento de superfície foram utilizados dois tipos de silicatos de etila. As características de ambos estão listadas na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 – Características dos silicatos de etila

Características	Siliethyl TS28	Siliethyl TS40
Composição química	Orto silicato de tetraetila	Poli etoxi siloxano
Aspecto	Claro	Claro
Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) 20 °C	0,93 a 0,94	1,055 e 1,065
% SiO <sub>2</sub>	mín. 28	mín. 40
Viscosidade a 25 °C (cps)	aprox. 1	aprox. 5
Índice de refração a 25 °C	1,381 a 1,383	1,396 a 1,398

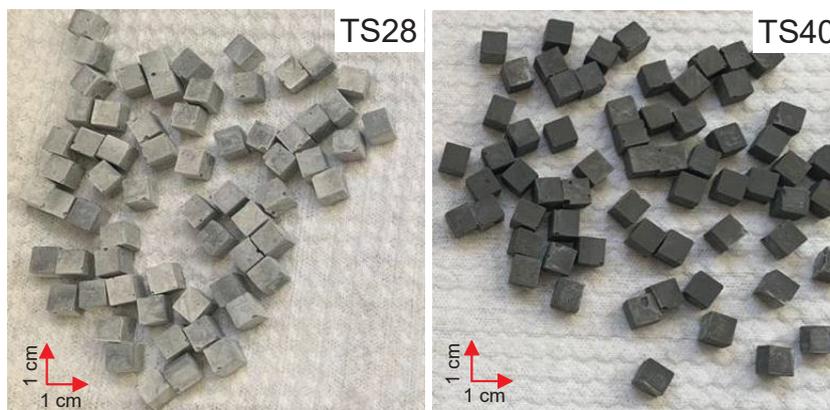
FONTE: (Hergrand, 2019)

De acordo com o fabricante, o Siliethyl TS28 é mais puro que o Siliethyl TS40, e este último é parcialmente hidrolisado e portanto contém maior concentração de sílica (Hergrand, 2019).

### 5.2.2 Moldagem das pastas e métodos de ensaio

Para avaliar o uso dos tratamentos de superfície foram moldadas pastas de 1x1x1 cm (Figura 5.2) com auxílio de uma forma de plástico destas dimensões, com relação água/cimento de 0,45. As pastas foram desmoldadas 24 horas após a moldagem e curadas em câmara úmida ( $T=23\pm 1$  °C e UR=95%) por um período de 21 dias. Após as pastas seguiram para câmara seca ( $T=23\pm 1$  °C e UR=50±4%) por um período de 7 dias para completar o processo de cura. Essa segunda etapa em câmara seca visou reduzir a umidade do corpo de prova para que ele pudesse absorver o tratamento. Esse período de cura inicial foi determinado devido a estudos anteriores (CAI *et al.*, 2016) mostrarem o melhor desempenho do TEOS, na porosidade do material aplicado, em idades mais avançadas (como aos 90 dias) do que em idades iniciais (1 dia). Um período intermediário foi fixado (28 dias). Esta idade foi determinada pois aos 28 dias o cimento atingiu praticamente toda a resistência mecânica prevista.

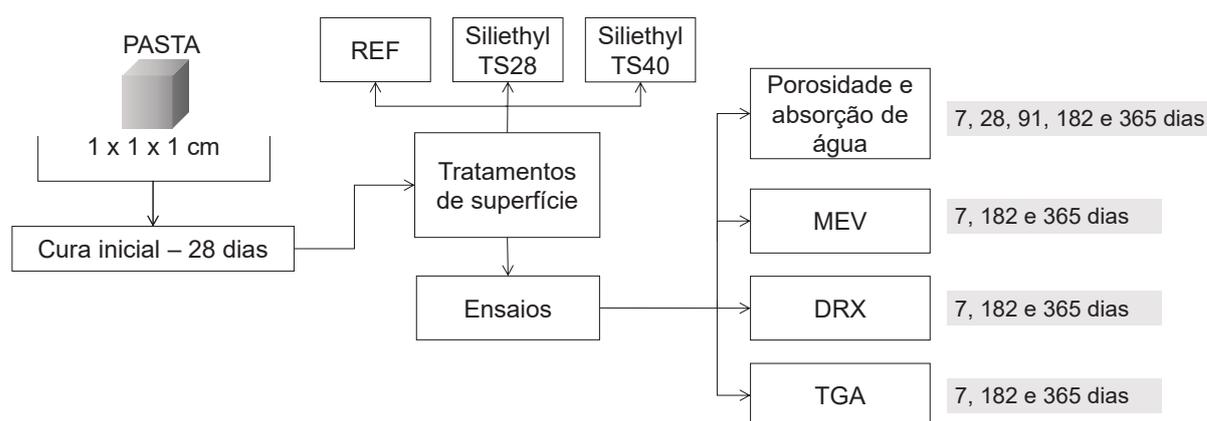
FIGURA 5.2 – Corpos de prova de pasta de cimento (1x1x1 cm) para investigar o efeito dos tratamentos com os produtos TS28 e TS40



A aplicação do tratamento nas pastas foi realizada pela imersão das mesmas nos tratamentos, onde permaneceram por um período de 24 horas. Esse procedimento visou a maior penetração dos mesmos. Em seguida, as pastas foram retiradas e ficaram em média 10 minutos descansando para retirar o excesso do produto. Após, as pastas foram colocadas em cura em câmara úmida ( $T=23\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $UR=95\%$ ) onde permaneceram até a data dos ensaios.

As pastas foram moldadas com o intuito de realizar os ensaios microestruturais para entender a formação dos compostos formados e redução da porosidade. A Figura 5.3 mostra um fluxograma contendo todos os ensaios realizados em pasta.

FIGURA 5.3 – Esquema de moldagem e avaliação das pastas



Nas idades de avaliação as pastas foram fraturadas, com auxílio de um martelo, de modo que a amostra para o ensaio fosse composta em grande parte pela sua superfície. De acordo com Pigno *et al.* (2012), Hou *et al.* (2016), a penetração do

silicato de etila é em torno de 3-5 mm da superfície. Portanto, o tamanho das amostras moldadas visou alcançar essa penetração.

Para os ensaios microestruturais, a hidratação foi paralisada com auxílio de álcool isopropílico p.a., no qual as amostras permaneceram por 24 horas. Para este procedimento, as amostras já se encontravam fraturadas. Na sequência o álcool foi removido e as amostras seguiram para a estufa ( $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) por mais 24 horas. Para os ensaios de difração de raios X (DRX) e análise termogravimétrica (TGA), as amostras foram moídas, com auxílio de cadinho e pistilo, em granulometria específica ( $<45\mu\text{m}$ ). Para o ensaio de porosidade aparente as amostras não foram moídas, foram utilizados os pedaços fraturados para compor a amostra de cada série.

O ensaio de DRX foi realizado utilizando um difratômetro de raios X, modelo D8 Advanced Eco da marca Bruker, com alvo de tubo de raios X de cobre, com comprimento de onda  $\lambda = 1,54\text{ \AA}$ , operando com a tensão de 40 kV e corrente elétrica de 25 mA. Os parâmetros das análises foram: ângulo de  $5^{\circ}$  a  $70^{\circ}$  com passo angular de  $0,02^{\circ}$  a cada 0,1s.

Para a análise de TGA foi utilizado um analisador térmico simultâneo STA 449 F3 Júpiter - Netzsch, com taxa de aquecimento de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e patamares de aquecimento de  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , em atmosfera inerte de nitrogênio.

Ademais, foi feita a determinação da porosidade aparente e da absorção de água das pastas nas idades de 7, 28, 91, 182 e 365 dias. Da mesma forma que para os demais ensaios, as pastas foram fraturadas de forma que as amostras foram compostas em grande parte pela superfície das mesmas.

Os ensaios de absorção e porosidade aparente foram realizados conforme procedimento publicado (HOPPE FILHO *et al.*, 2021). Para realização dos mesmos é necessário determinação da massa saturada superfície seca ( $M_{SSS}$ ), massa submersa ( $M_{SUB}$ ) e massa seca ( $M_{SECA}$ ). Nas idades de realização dos ensaios as amostras foram imersas em água por 24 horas para completa saturação, foi determinada a  $M_{SUB}$  das mesmas com o auxílio de balança hidrostática. Após, as amostras foram retiradas da água e secas superficialmente, com pano umedecido, e a  $M_{SSS}$  foi determinada. Para a determinação da  $M_{SECA}$ , as amostras foram imersas em álcool isopropílico p.a. durante 24 horas para a paralisação das reações de hidratação e, posteriormente, colocadas na estufa a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  por mais 24 horas, para a secagem, e após isso foi aferida a massa. A porosidade aparente foi calculada por meio da Equação 5.1 e a absorção de água por meio da Equação 5.2.

$$\text{Porosidade aparente (\%)} = \frac{M_{SSS} - M_{SECA}}{M_{SSS} - M_{SUB}} \times 100 \quad (5.1)$$

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{M_{SSS} - M_{SECA}}{M_{SECA}} \times 100 \quad (5.2)$$

### 5.2.3 Preparação e moldagem dos corpos de prova

O traço para a moldagem dos corpos de prova foi o mesmo utilizado no capítulo 4, desenvolvido de acordo com o prescrito na norma NBR 15577 parte 6 (ABNT, 2018b) e sendo utilizado o método da ABCP/ACI para cálculo (método descrito no ANEXO A). A Tabela 5.2 mostra o consumo de material de acordo com o agregado utilizado (Agregados G1 e G2).

TABELA 5.2 – Consumo de materiais para dosagem dos concretos em (Kg/m<sup>3</sup>) e relação a/c = 0,45

Materiais	Agregado G1	Agregado G2
cimento	420	420
água	189	189
agregado miúdo	676	702
agregado graúdo	1050	1080

Foi necessário elevar a quantidade de álcalis total para acelerar o processo de expansão, ou seja, elevar o ( $Na_2O_{eq}$ ) até a quantidade de 1,25% da massa de cimento. Seguiu-se o mesmo procedimento descrito no capítulo 3. O NaOH foi dissolvido na água de amassamento para cada série moldada.

Todos os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas da moldagem. Antes do tratamento os mesmos foram inseridos na câmara úmida com temperatura e umidade controladas ( $T=23\pm 1$  °C e UR=95%) por um período de 21 dias e posteriormente transferidos para a câmara seca ( $T=23\pm 1$  °C e UR=50±4%) por mais 7 dias. O processo de cura inicial totalizou 28 dias visando o melhor desempenho posterior do silicato de etila. Após esse período de cura inicial, os tratamentos foram aplicados e, na sequência, todos os corpos de prova seguiram para o acondicionamento de acordo com a NBR 15577 parte 6 (ABNT, 2018b), para acelerar o processo de expansão, procedimento descrito no capítulo 4.

A aplicação dos tratamentos de superfície foi feita com auxílio de pincel. Os tratamentos foram aplicados em 2 demãos, invertendo os sentidos (vertical/horizontal) da aplicação em cada demão e com intervalos aproximados de 20 minutos cada. Cada demão foi aplicada até a saturação da superfície. Procedimento similar foi adotado por

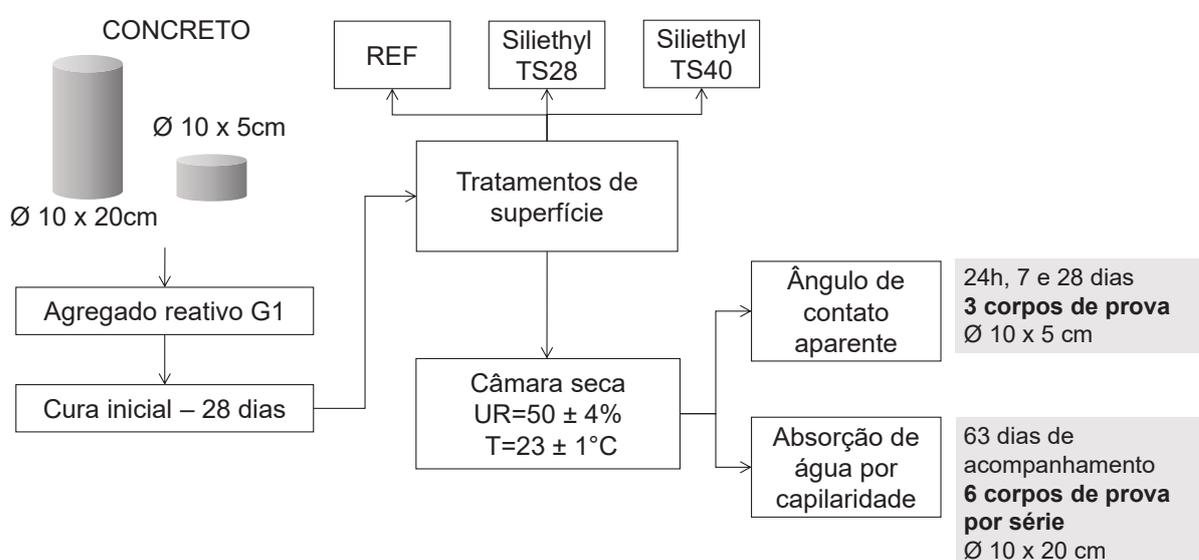
outras pesquisas (HOU *et al.*, 2014; CAI *et al.*, 2016; HOU *et al.*, 2016; GUO *et al.*, 2018). Após a aplicação, os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório para secagem, por um período de 24 horas, antes da inserção nas condições de aceleração da RAS.

#### 5.2.4 Avaliação e métodos de ensaio - tratamento de superfície

Foram moldados corpos de prova cilíndricos, de  $\phi$  10 x 20 cm e  $\phi$  10 x 5 cm, para avaliação do tratamento de superfície apenas, sem que os mesmos fossem inseridos na condição para acelerar a RAS.

Para tanto, foi utilizado apenas um agregado para os testes (Agregado G1), e os ensaios de ângulo de contato e absorção de água por capilaridade foram realizados. A Figura 5.4 mostra o esquema desenvolvido com os parâmetros de moldagem e ensaios.

FIGURA 5.4 – Esquema de moldagem e avaliação dos corpos de prova destinados ao estudo do efeito dos tratamentos de superfície no ângulo de contato e na absorção de água por capilaridade do concreto



Após a aplicação dos tratamentos, os corpos de prova seguiram para a câmara seca ( $T=23\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $UR=50\pm 4\%$ ).

Para avaliar a capacidade hidrofugante dos tratamentos, foi utilizada a técnica de ângulo de contato aparente. Para tanto, foi utilizado o método de gota séssil com o auxílio de um microscópio. Os ensaios foram realizados adicionando cinco gotas de  $5\ \mu\text{L}$  de água deionizada na superfície do concreto preparado com o tratamento de

superfície. As amostras foram retiradas às 24h, 7 dias e 28 dias da câmara para esta avaliação.

Para avaliar a absorção de água dos corpos de prova com tratamento, foi utilizado o método prescrito na NBR 9779 (2012). Esse método visa a absorção de água por capilaridade por unidade de área ao longo do tempo. Após o período de cura inicial (28 dias), os corpos de prova foram secos em estufa a 40°C até constância de massa. Em seguida, foram mantidos por 24 horas em ambiente de laboratório para garantir o resfriamento dos mesmos, e posteriormente aplicados os tratamentos na superfície. Após 24h de cura do tratamento, os corpos de prova seguiram para o ensaio de absorção por capilaridade.

Para garantir a absorção de água apenas pela superfície em contato, na lateral de cada corpo de prova foi realizada uma proteção com silicone até a altura de 4 cm a partir da face onde o sistema de proteção de superfície foi aplicado. O nível da lâmina de água foi mantido constante e igual a 5 mm durante todo o ensaio. A absorção de água foi acompanhada a partir da pesagem dos corpos de prova ao longo do tempo. A análise da variação de massa dos corpos de prova foi realizada nos tempos de 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 24h, 48h e 72h, 7 dias, 14 dias, 28 dias, 35 dias, 42 dias e 63 dias, a partir do primeiro contato com a lâmina d'água, sendo que os primeiros 3 dias foram monitorados de acordo com as especificações da NBR 9779 (2012), e posteriormente monitorados a cada 7 dias.

Os resultados obtidos relacionam a quantidade de água absorvida por unidade de área ao longo do tempo. Foram calculados também os valores de absorvidade ( $S$  em  $\text{kg}/\text{m}^2\text{t}^{1/2}$ ) para cada conjunto de amostras (Concreto de referência e concretos com aplicação dos tratamentos TS28 e TS40). A absorvidade pode ser obtida experimentalmente calculando-se a tangente da curva de volume acumulado de água absorvido ( $V_a$  em  $\text{mm}^3$ ) por unidade de área ( $A$  em  $\text{mm}^2$ ), *versus* a raiz quadrada do tempo ( $t$  em horas), e pode ser expressa de acordo com a Equação 5.3.

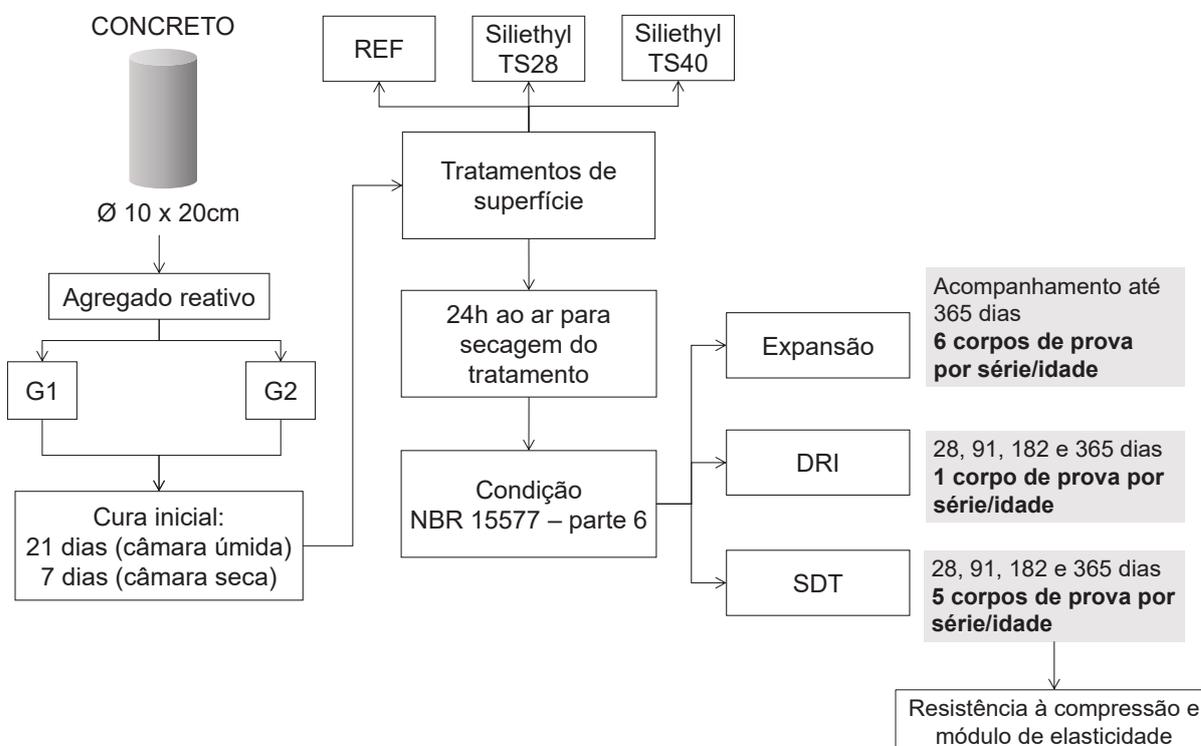
$$S = \frac{V_a}{A \times \sqrt{t}} \quad (5.3)$$

#### 5.2.5 Avaliação e métodos de ensaio - reação álcali-sílica

Foram moldados 30 corpos de prova cilíndricos de  $\phi$  10 x 20 cm para cada combinação (descrição da quantidade corpos de prova para cada ensaio e idade na Figura 5.5), a fim de avaliar o comportamento do tratamento de superfície no desencadeamento da RAS.

A Figura 5.5 mostra o esquema desenvolvido com os parâmetros de moldagem e ensaios.

FIGURA 5.5 – Esquema de moldagem e avaliação dos corpos de prova - RAS



Os corpos de prova foram acompanhados quanto a expansão. Para tanto foram inseridos os pinos conforme procedimento descrito no capítulo 4. A primeira medida de expansão se deu antes da entrada dos corpos de prova na condição de aceleração da RAS, ou seja, após a aplicação e secagem do tratamento de superfície. Após, a expansão foi medida aos 28 dias e uma vez por mês, até atingir a idade de 365 dias.

A análise da deterioração dos corpos de prova devida a RAS contou com os ensaios de SDT e DRI, já descritos no capítulo 4. Como o ensaio de SDT não é destrutivo, após o teste, os corpos de prova foram rompidos à compressão nas mesmas idades.

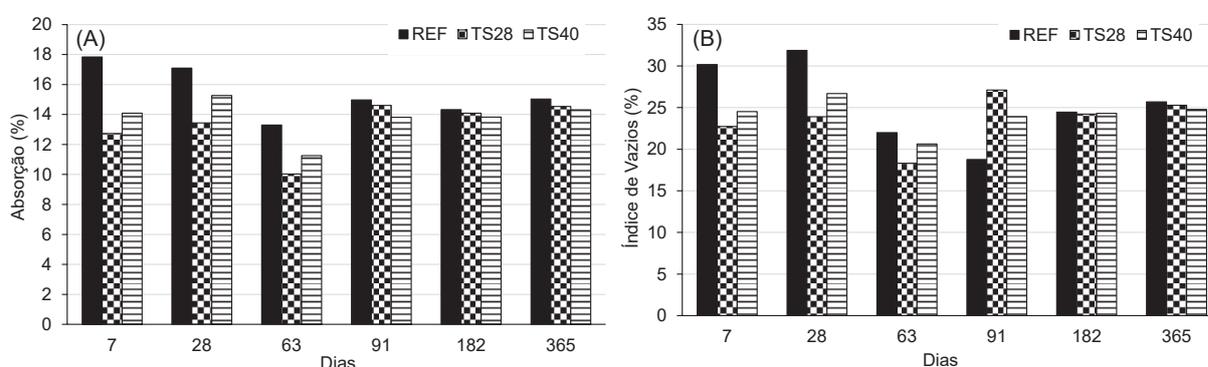
## 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.3.1 Avaliação dos tratamentos de superfície em pastas

#### 5.3.1.1 Porosidade aparente e absorção de água

A Figura 5.6 mostra os resultados do ensaio de absorção por imersão e índice de vazios em amostras das pastas de cimento nas idades de 7, 28, 63, 91, 182, 365 dias, para ambos os tratamentos (TS28 e TS40).

FIGURA 5.6 – (A) Absorção por imersão e (B) índice de vazios nas amostras com e sem tratamento de superfície



É possível observar que nas primeiras idades a série TS28 foi a que menos absorveu água, cerca de 21,3% a menos que a pasta de referência. Devido à viscosidade do TS28 ser menor que a do TS40, o mesmo pode ter penetrado mais profundamente na pasta de cimento, o que pode ter proporcionado inicialmente esses resultados. Porém, a partir dos 91 dias todas as séries quase não apresentaram diferença significativa entre si. Aos 365 dias a diferença na absorção de água foi de 3,4% para o TS28 e 5,1% para o TS40, se comparadas a referência.

A reação do TEOS ocorre em duas etapas, sendo elas hidrólise e polimerização. A primeira reação envolve a hidrólise dos grupos álcoois para formar hidroxila (Equação 5.4). Já a segunda reação é uma reação de condensação na qual a sílica sofre polimerização para formar a sílica gel (Equação 5.5). A água que é consumida na hidrólise é liberada novamente na reação de polimerização, permanecendo nos poros ou evaporando (SANDROLINI; FRANZONI; PIGINO, 2012). Sendo que o meio onde ocorre a reação tem influência do pH, ou seja, neste caso, a solução dos poros da pasta de cimento é de caráter básico, fazendo com que a reação de hidrólise seja acelerada e a polimerização aconteça mais lentamente.



Dessa forma, a partir dos resultados obtidos, se observa que as pastas com aplicação dos tratamentos, já aos 7 dias, apresentam absorção de água e índice de vazios semelhantes às pastas de referência com 365 dias. Ou seja, ambos aceleram o processo de redução da porosidade da matriz que aconteceria pela hidratação do cimento. E, neste caso, isso ocorre devido às reações de hidrólise e polimerização, formando sílica gel que preenche os poros da matriz, e até C-S-H, caso haja hidróxido de cálcio disponível para esta segunda reação.

De acordo com Chen *et al.* (2020), o TEOS mostrou uma capacidade de redução da porosidade total em pastas de cimento sulfoaluminoso, principalmente na redução dos poros entre 50 nm e 1  $\mu$ m. Essa redução se deu devido ao preenchimento destes poros com os compostos formados (C-S-H e sílica gel). Isso também pôde ser observado nesta tese, na qual os resultados de absorção e índice de vazios foram inferiores aos da pasta de referência em todas as idades, indicando que, de certa forma, houve preenchimento dos poros devido à reação dos tratamentos na matriz cimentícia. Chen *et al.* (2020) destacam ainda que o tratamento não mostrou muita influência nos poros menores que 50 nm e também naqueles maiores que 1  $\mu$ m. De fato, os macroporos (>50nm) são os que têm maior influência nas propriedades de permeabilidade e resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Dessa forma, pode-se dizer que os tratamentos podem ter atuado, em grande parte, nos macroporos das pastas de cimento.

### 5.3.1.2 Microscopia eletrônica de varredura - MEV

A Figura 5.7 mostra as micrografias obtidas de pastas com o uso do tratamento de superfície TS28, aos 7, 182 dias e 365 dias. E a Figura 5.8 mostra as micrografias obtidas das pastas com TS40, nas mesmas idades.

FIGURA 5.7 – Amostra TS28 em pastas com 7, 182 e 365 dias mostrando a ocorrência dos produtos encontrados na matriz cimentícia

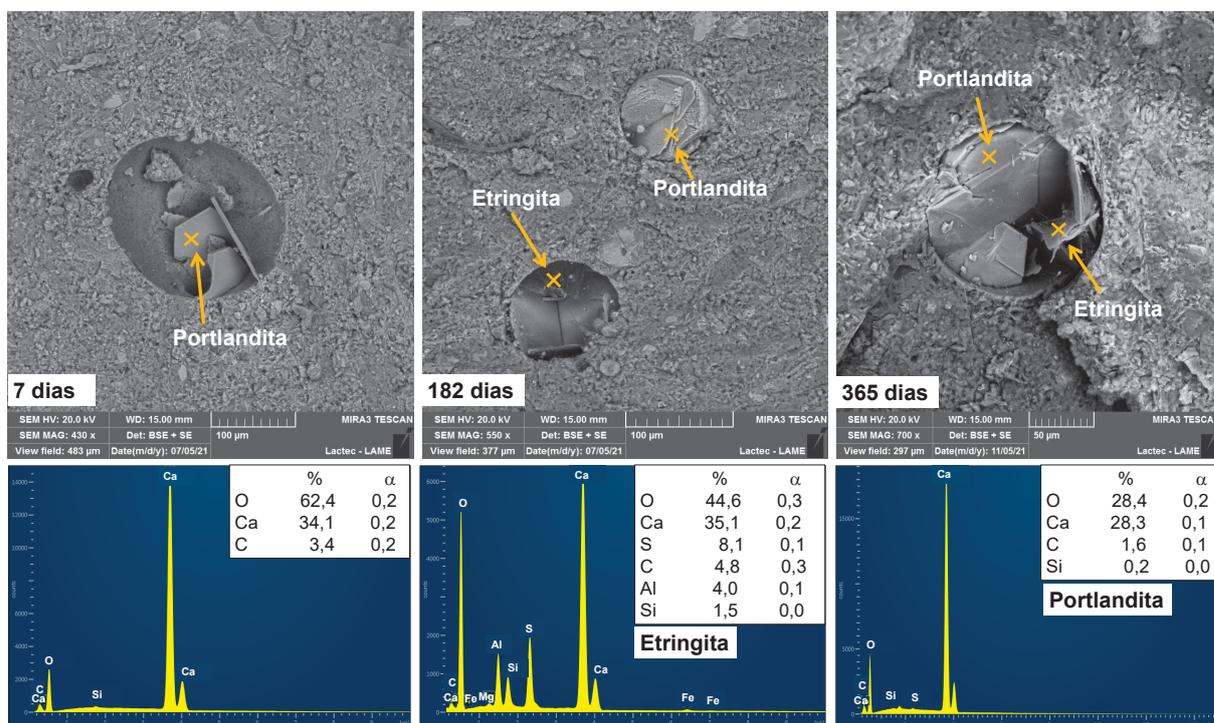
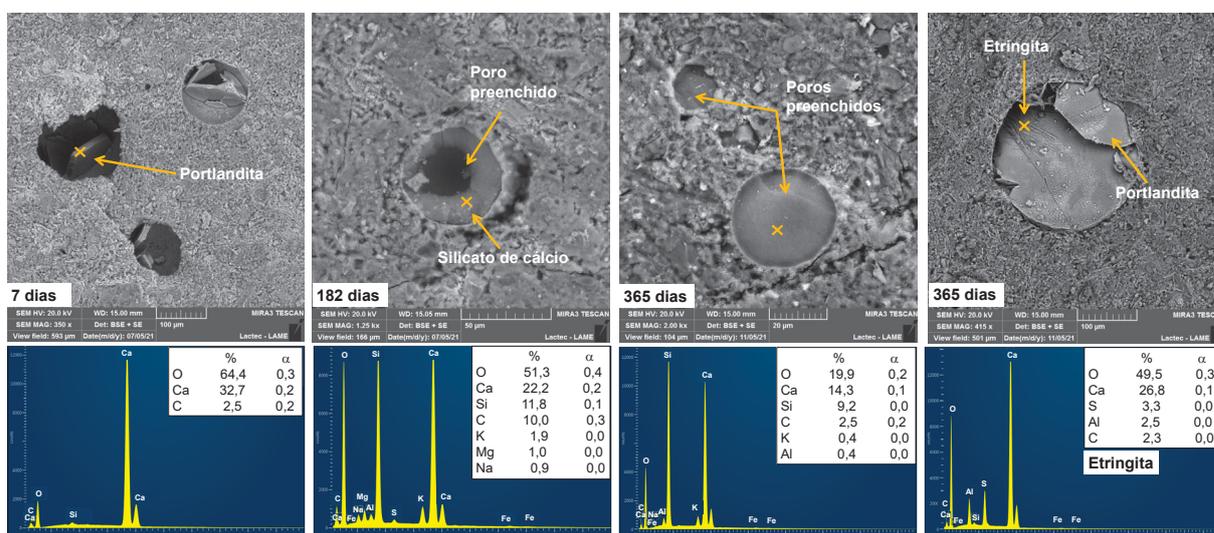


FIGURA 5.8 – Amostra TS40 em pastas com 7, 182 e 365 dias mostrando a ocorrência dos produtos encontrados na matriz cimentícia



Pela análise de microscopia eletrônica de varredura aos 7 dias foram encontrados possíveis formações de hidróxido de cálcio (portlandita), para as pastas com ambos os tratamentos. Além disso, aos 182 e 365 dias observou-se também a formação de etringita em alguns poros, tanto nas pastas com TS28 como nas pastas com TS40. A partir da análise de EDS foi possível identificar os elementos nestes compostos. A Ta-

bela 5.3 indica a proximidade dos constituintes dos produtos encontrados e percentuais teóricos da composição química dos cristais de etringita e hidróxido de cálcio.

TABELA 5.3 – Percentual dos elementos na formação dos compostos hidratados de etringita e hidróxido de cálcio

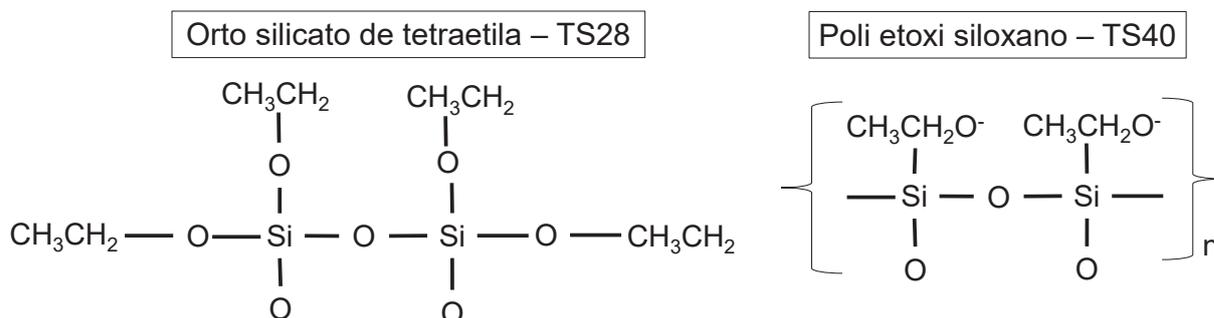
Elemento químico	Percentual teórico do elemento (etringita) (%)	Percentual teórico do elemento (hidróxido de cálcio) (%)
O	63,74	43,19
Ca	19,13	53,99
S	7,67	-
H	5,14	2,82
Al	4,30	-

Há uma variação do EDS realizado nos pontos indicados em relação aos percentuais teóricos apresentados na Tabela 5.3, entretanto isso não descaracteriza a existência do cristal encontrado. Essa variação é normal e ocorre devido ao efeito matriz, onde átomos adjacentes ao ponto podem ser atingidos pela incidência do feixe de raios X. Efeito este visualizado também nos trabalhos de Capraro (2016), Leão (2019), Campos (2020).

Encontrar etringita na matriz cimentícia aos 365 dias evidencia que os tratamentos podem ter bloqueado, de certa forma, o acesso de água, fazendo com que o processo de hidratação, neste caso a reação da etringita, ocorresse numa menor intensidade nestas pastas. Cai *et al.* (2016) relatam que em idades precoces, o TEOS pode retardar a hidratação do cimento devido à reação de hidrólise. A etringita é um dos primeiros compostos a cristalizar durante a primeira fase de hidratação do cimento, isso devido à alta relação entre o sulfato e aluminato presentes na solução dos poros da matriz cimentícia. Com o esgotamento do sulfato e redução da proporção entre sulfato/aluminato, a etringita se torna instável e gradualmente ela é convertida em monossulfoaluminato, produto final da hidratação do cimento Portland (SCRIVENER, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Nas pastas contendo TS40 também foi possível observar diversos poros preenchidos, principalmente em idades mais avançadas. Nestes poros foram encontrados produtos a base de sílica e cálcio, podendo ser C-S-H ou apenas sílica gel. Quimicamente o TS40 possui uma maior interação com os compostos do substrato por apresentar cadeia aberta (Figura 5.9) e maior que o TS28. Devido a esta característica, suas ligações também são mais difíceis de serem rompidas. Além disso, esse composto é parcialmente hidrolisado (40%) e possui maior quantidade de sílica (mín. de 40%), podendo assim facilitar a reação do produto na matriz cimentícia.

FIGURA 5.9 – Estrutura molecular dos produtos utilizados como tratamento de superfície - TS28 e TS40



### 5.3.1.3 Difração de raios X - DRX

As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam os resultados do DRX das séries, com e sem tratamento de superfície, aos 7, 182 e 365 dias. Os resultados indicam fases de etringita, C-S-H, gipsita e portlandita.

FIGURA 5.10 – Difração de raios X das pastas de referência aos 7, 182 e 365 dias

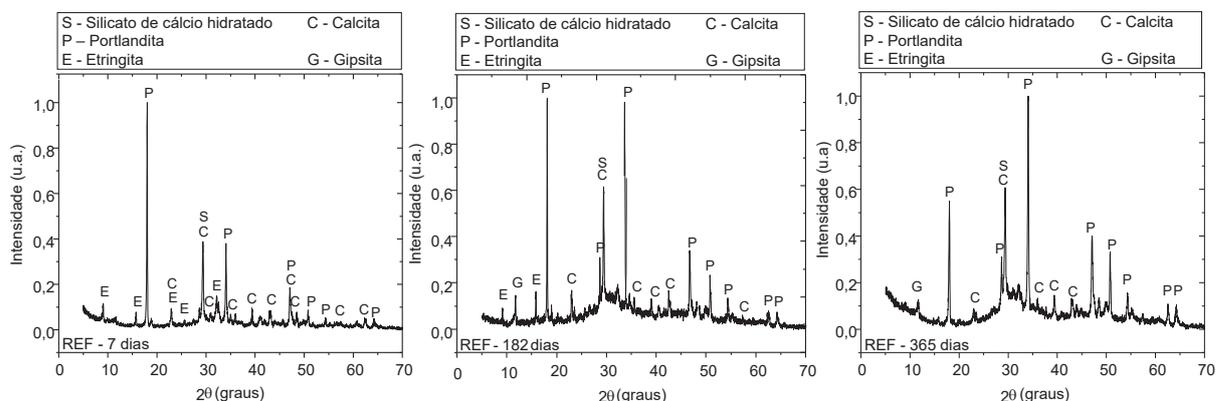


FIGURA 5.11 – Difração de raios X das pastas com tratamento (TS28) aos 7, 182 e 365 dias

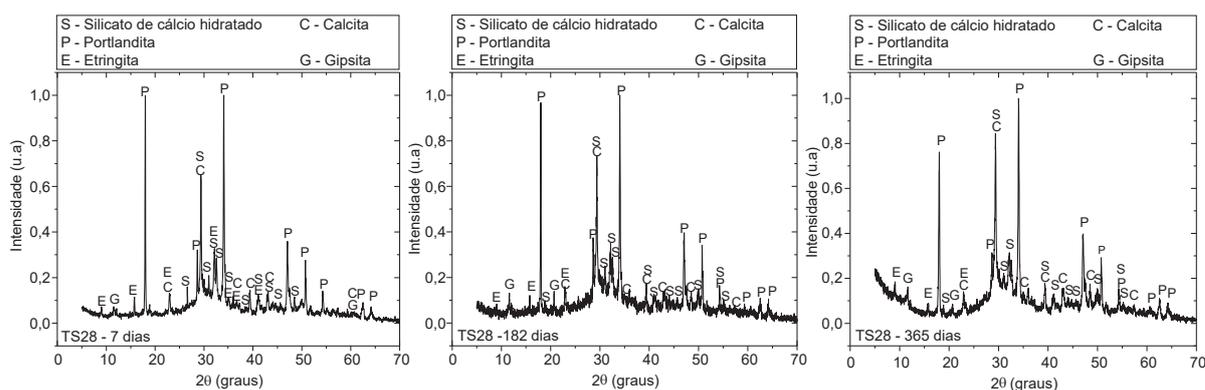
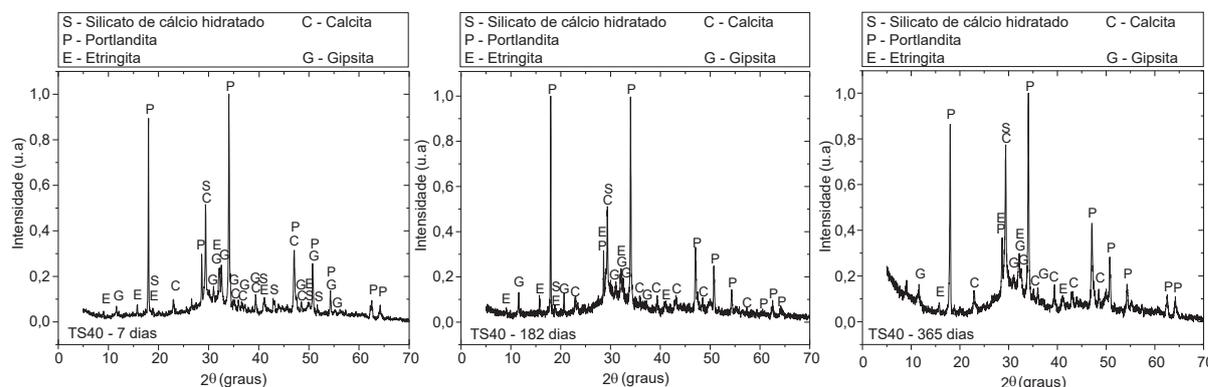


FIGURA 5.12 – Difração de raios X das pastas com tratamento (TS40) aos 7, 182 e 365 dias



Aos 365 dias para as séries com tratamento (TS28 e TS40) é possível observar que houve aumento no pico principal do C-S-H e redução no pico de portlandita, consequência da hidratação do cimento e da atuação dos tratamentos na pasta. Se comparados estes compostos hidratados com a amostra de referência (REF), pode-se observar a diferença nos dois picos principais ao longo do tempo. Os picos principais de portlandita e C-S-H foram separados para melhor visualização (Figura 5.13 e Figura 5.14). Sandrolini, Franzoni e Pigino (2012) e Barberena-Fernández, Carmona-Quiroga e Blanco-Varela (2015) observaram o consumo de portlandita e a formação do gel C-S-H em misturas com TEOS, produto semelhante ao TS28 utilizado neste estudo, em pastas e argamassas de cimento e cal.

FIGURA 5.13 – Difratoformas parciais, com ênfase na região de localização do principal pico da portlandita ( $34,2^\circ\theta$ ), das pastas de cimento de referência (REF) e com os tratamentos (TS28 e TS40), aos 7, 182 e 365 dias

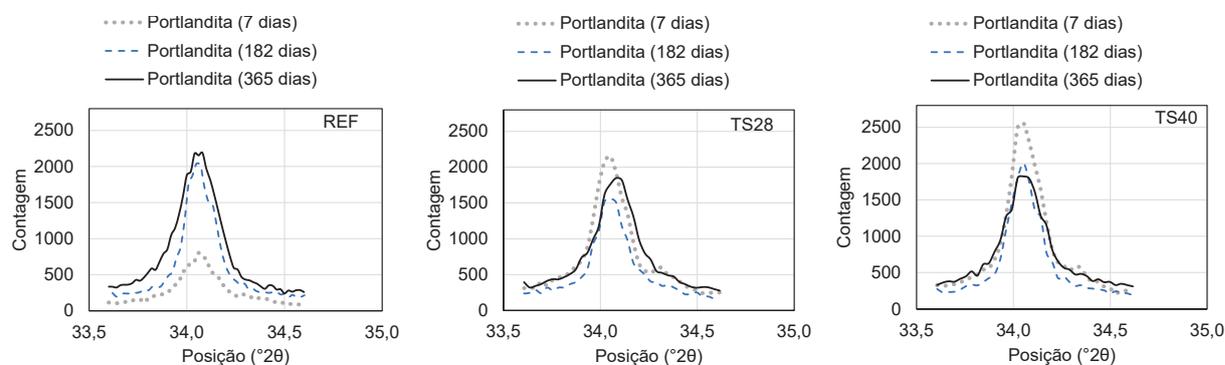
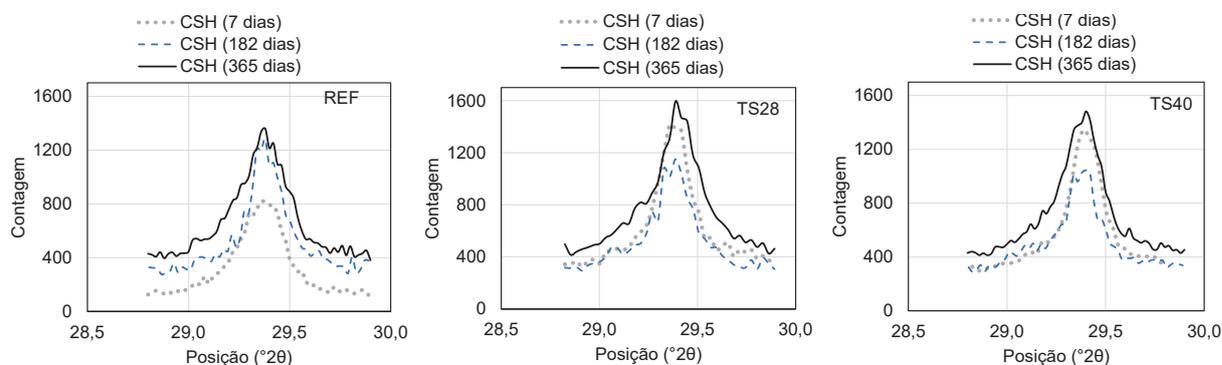


FIGURA 5.14 – Difratomogramas parciais, com ênfase na região de localização do principal pico da C-S-H ( $29,4^\circ\theta$ ), das pastas de cimento de referência (REF) e com os tratamentos (TS28 e TS40), aos 7, 182 e 365 dias



Pela análise de DRX também observou-se que nas pastas com tratamento, tanto TS28 quanto TS40, o pico de etringita se manteve até a idade de 365 dias, apresentando uma pequena redução apenas. Já, na pasta de referência, isso não ocorreu. De acordo com a composição química dos tratamentos utilizados, a formação de etringita não se justifica. Entretanto, como apontado no ensaio de microscopia eletrônica de varredura, é possível que os tratamentos possam ter bloqueado os poros, de certa forma, ao acesso de água, reduzindo assim o processo da reação/conversão da etringita nas pastas. Além disso, a reação de hidrólise ocorrida inicialmente com o TEOS captura a água disponível para formação de hidroxila. Dessa forma, neste caso ambos os processos ocorridos podem ter alterado a cinética de reação fazendo com que a etringita não tivesse sua conversão completa em monossulfoaluminato de cálcio.

Importante ressaltar que o DRX é uma técnica qualitativa, na qual não avalia a quantidade formada dos compostos.

#### 5.3.1.4 Análise termogravimétrica - TGA

A análise termogravimétrica foi realizada com o intuito de verificar o consumo dos compostos formados pelo uso dos tratamentos nas pastas de cimento. As Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 mostram as análises termogravimétricas das pastas nas idades aos 7, 182 e 365 dias para as amostras com e sem tratamento, TS28, TS40 e REF.

FIGURA 5.15 – Termogravimetria das pastas de referência aos 7, 182 e 365 dias

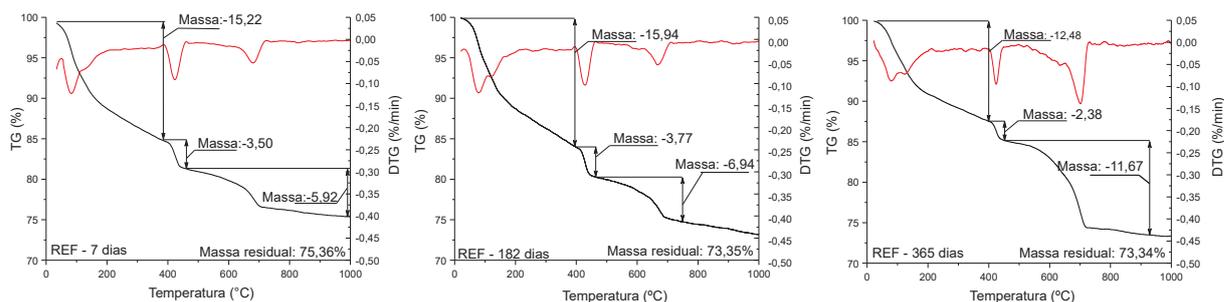


FIGURA 5.16 – Termogravimetria das pastas com TS28 aos 7, 182 e 365 dias

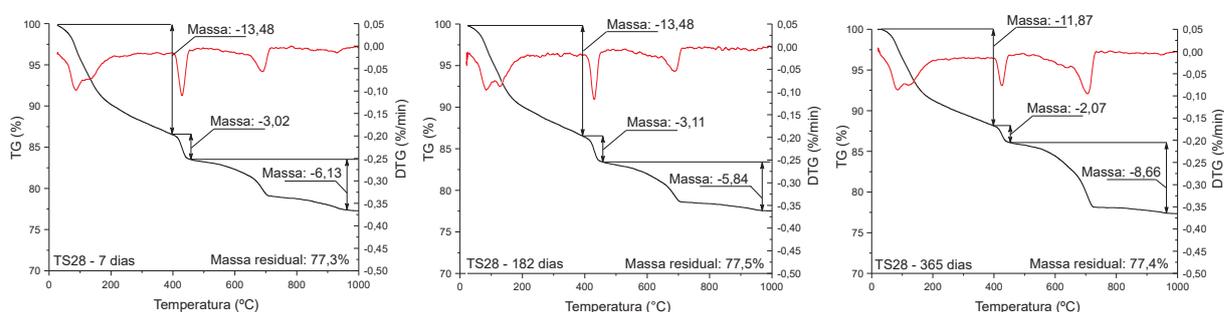
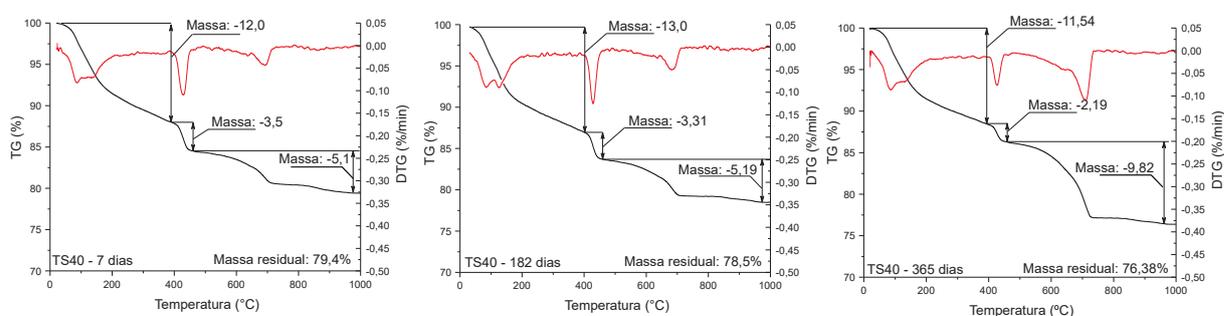


FIGURA 5.17 – Termogravimetria das pastas com TS40 aos 7, 182 e 365 dias



As principais perdas de massa encontradas nas análises termogravimétricas foram nos patamares de 23 °C a 390 °C, que consiste na decomposição de grande parte dos compostos hidratados como o C-S-H, gipsita e etringita. O segundo patamar, de 390 °C a 460 °C, é referente a decomposição da portlandita e, o terceiro e último patamar (460 °C a 1000 °C) refere-se à decomposição do carbonato de cálcio. E, de acordo com Sandrolini, Franzoni e Pigino (2012), em torno de 480 °C é onde ocorre a perda de massa devido à desidratação da sílica gel para o TEOS. Entretanto, é difícil quantificar apenas o composto, visto que nesta faixa tem-se também a decomposição da portlandita.

Dessa forma, a partir das perdas de massa nessas etapas pôde-se quantificar alguns compostos formados na hidratação do cimento (Tabela 5.4) a partir de relações estequiométricas. Os valores foram corrigidos para a base de não voláteis para que os resultados possam ser comparados entre si (Tabela 5.5).

TABELA 5.4 – Perda de massa das amostras em pasta com 7, 182 e 365 dias (TGA)

	C-S-H + aluminatos água combinada (%) 23 - 390 °C	Hidróxido de cálcio (%) 390 - 460 °C		Carbonatos (%) 460 - 1000 °C		Massa residual (%)	Fator de correção
		H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>		
7 dias							
REF	15,22	3,50	14,39	5,92	13,45	75,36	1,33
TS28	13,48	3,03	12,46	6,19	14,07	77,3	1,29
TS40	12,00	3,48	14,31	5,12	11,64	79,4	1,26
182 dias							
REF	15,94	3,77	15,50	6,94	15,77	73,35	1,36
TS28	13,52	3,08	12,66	5,90	13,41	77,5	1,29
TS40	13,01	3,29	13,53	5,20	11,82	78,5	1,27
365 dias							
REF	12,48	2,37	9,74	10,81	24,57	74,34	1,35
TS28	11,87	2,07	8,51	8,66	19,68	77,40	1,29
TS40	11,54	2,19	9,0	9,89	22,48	76,38	1,31

TABELA 5.5 – Perda de massa das amostras em pasta com 7, 182 e 365 dias, corrigidas para base de não voláteis (TGA)

	C-S-H + aluminatos água combinada (%) 23 - 390 °C	Hidróxido de cálcio (%) 390 - 460 °C		Carbonatos (%) 460 - 1000 °C		Massa residual (%)
		H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	
7 dias						
REF	20,20	4,64	19,09	7,86	17,85	100,0
TS28	17,44	3,92	16,11	8,01	18,20	100,0
TS40	15,11	4,38	18,02	6,45	14,66	100,0
182 dias						
REF	21,73	5,14	21,13	9,46	21,50	100,0
TS28	17,45	3,97	16,34	7,61	17,30	100,0
TS40	16,57	4,19	17,23	6,62	15,06	100,0
365 dias						
REF	16,79	3,19	13,11	14,54	33,05	100,0
TS28	15,34	2,67	10,99	11,19	25,43	100,0
TS40	15,11	2,87	11,79	12,95	29,43	100,0

A análise termogravimétrica corrobora com a discussão levantada na análise de microscopia eletrônica de varredura, uma vez que quando se observa os resultados

obtidos, é possível notar que nas amostras com tratamento a perda de massa, em todos os patamares, foi menor que na amostra de referência. Isso evidencia que pode ter ocorrido mudanças na cinética de hidratação do cimento, as quais podem ter sido ocasionadas pelas reações de hidrólise e posterior polimerização dos produtos.

Aos 365 dias houve carbonatação das amostras, isso pode ter ocorrido devido ao tempo e também ao procedimento de preparo para o ensaio. Entretanto, é possível destacar que houve uma maior carbonatação da amostra de referência em relação às pastas com tratamento, evidenciando que de certa forma, tanto o TS28 quanto o TS40 podem ajudar a reduzir o processo de carbonatação. Além disso, é possível notar que aos 365 dias ainda, a perda de massa referente a faixa de 460 °C - 1000 °C para a pasta contendo TS40 foi superior ao resultado obtido para a pasta contendo TS28, o que pode indicar a maior formação de sílica gel.

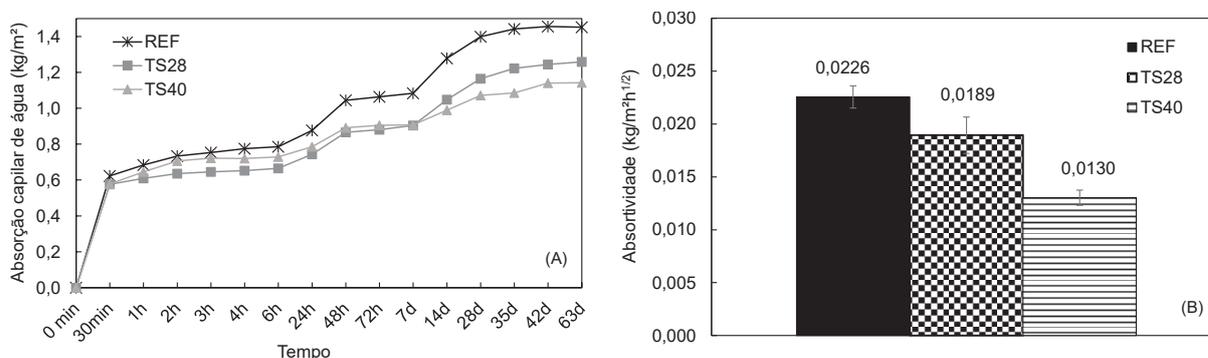
### 5.3.2 Avaliação dos tratamentos de superfície em concreto

Os ensaios de absorção de capilaridade e ângulo de contato foram realizados com o intuito de analisar a aplicação dos tratamentos de superfície de forma macro, ou seja, no concreto.

#### 5.3.2.1 Absorção por capilaridade

A Figura 5.18 mostra os resultados de absorção de água por capilaridade para os concretos de referência e também aqueles onde foram aplicados os tratamentos (TS28 e TS40), além disso mostra também os resultados de absorvidade obtidos para os tratamentos.

FIGURA 5.18 – A - Absorção de água por capilaridade ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) para concretos com e sem tratamento de superfície, B - Absorvidade ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{1/2}$ ) para os concretos com tratamento de superfície



Na análise é possível observar que o comportamento dos concretos foi o mesmo para ambas as séries, indiferente do uso ou não do tratamento. Houve um pequeno aumento na absorção de água aos 2 dias de ensaio, após esse período houve uma estabilização na absorção até 7 dias. Após esse período houve novamente um aumento na absorção de água para todas as amostras e, após 28 dias as séries voltaram a estabilizar.

A Figura 5.18 (B) indica que a amostra com o tratamento TS40 se mostrou melhor que a amostra de referência, apresentando uma maior capacidade de redução da absorvidade do concreto tratado. A taxa de redução neste caso foi de 42%. Foi realizada análise estatística ANOVA e aplicado teste de Tukey com um intervalo de confiança de 95% para avaliar a diferença entre os resultados. Foi possível verificar que houve diferença significativa entre a série de referência e a série onde foi aplicado o tratamento TS40. Já no caso do TS28, a taxa de redução da absorvidade foi de 16%. Pela análise estatística não foi verificada diferença significativa entre os resultados obtidos pelas séries de referência e aqueles onde o tratamento TS28 foi aplicado. Guo *et al.* (2018) também observaram resultados semelhantes em sua pesquisa quando da utilização de TEOS (Tetraetil ortosilicato) e silanos como tratamento de superfície em corpos de prova de concreto.

A menor absorção de água pelos concretos com tratamento pode acontecer devido à penetração dos mesmos na superfície, o tamponamento dos poros e formação de produtos na matriz cimentícia, como sílica gel e C-S-H. Além disso, o TS40 se apresenta como siloxano (poli etoxi siloxano), sendo este um elemento que possui propriedade hidrofóbica.

### 5.3.2.2 Ângulo de contato

A Figura 5.19 mostra a análise do formato da gota em relação ao substrato, com e sem tratamento, às 24 horas, 7 e 28 dias (após a aplicação do tratamento). Os concretos utilizados no ensaio foram mantidos em câmara seca ( $UR=50 \pm 4\%$  e  $T=23 \pm 1^\circ\text{C}$ ).

No decorrer do tempo de avaliação, as séries REF e TS28 indicam atração molecular entre a gota de água e o substrato por apresentar ângulo de contato menor que 90 graus. A série TS40 nas primeiras 24 horas de imersão com tratamento, apresentou um ângulo de contato superior a 90 graus, indicando baixa atração molecular entre a gota de água e o substrato, se mantendo assim também aos 7 dias. Contudo, com o passar do tempo, esse ângulo de contato reduziu e, aos 28 dias, ficou próximo à série

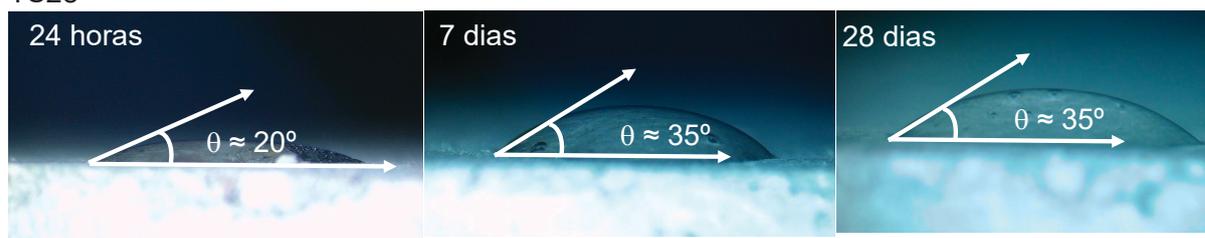
sem tratamento, indicando uma redução do seu desempenho hidrofóbico. O ângulo maior que 90 graus é característico de tratamentos com propriedades hidrofugantes, ou seja, são fluídos de baixa viscosidade, que penetram alguns milímetros na superfície e reagem com o substrato, formando uma camada hidrofóbica que reveste os poros na superfície (MEDEIROS; HELENE, 2009; PAN *et al.*, 2017a; PAN *et al.*, 2017b).

FIGURA 5.19 – Interação entre a gota de água e a superfície de concreto com e sem tratamento, medição às 24h, 7 e 28 dias - após a aplicação do tratamento

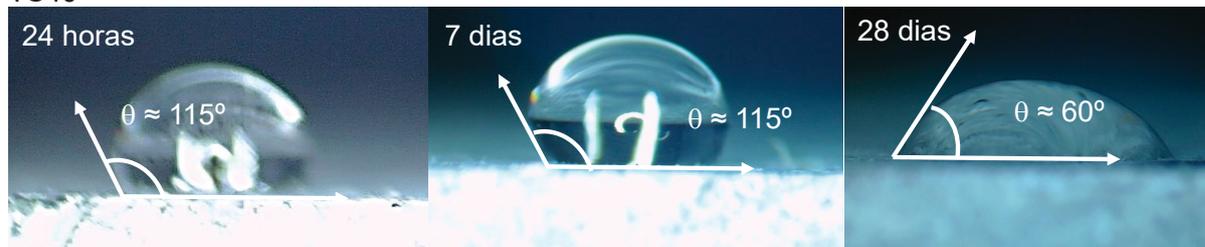
REF



TS28

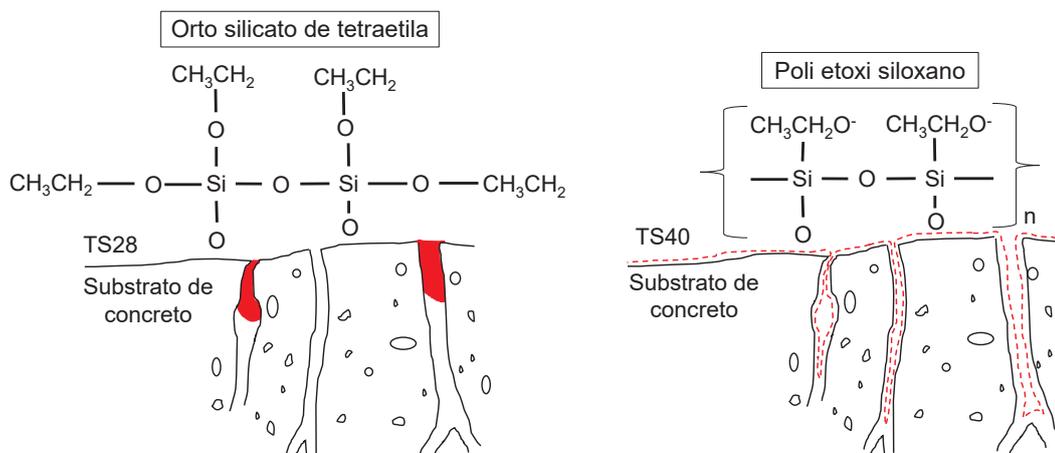


TS40



O TS40 é composto por poli etoxi siloxano. De acordo com Cai *et al.* (2016), o poli siloxano é um silano em que o Si possui pelo menos uma ligação oxi. Se o número de ligações oxi for menor que quatro, o tratamento pode apresentar uma capacidade hidrofóbica tornando a superfície do concreto repelente a água (Figura 5.20).

FIGURA 5.20 – Estrutura molecular dos tratamentos TS28 e TS40 mostrando a interação com o substrato



A viscosidade dos tratamentos também pode ser um fator de influência no resultado do ensaio, visto que, o tratamento TS28 possui viscosidade absoluta próxima a 1 centiPoise (cP) e o tratamento TS40 próxima a 5 cP, a uma temperatura ambiente de 25 °C. Com isso, o tratamento TS28 possui uma facilidade maior para penetrar na amostra, se comparado com o tratamento TS40.

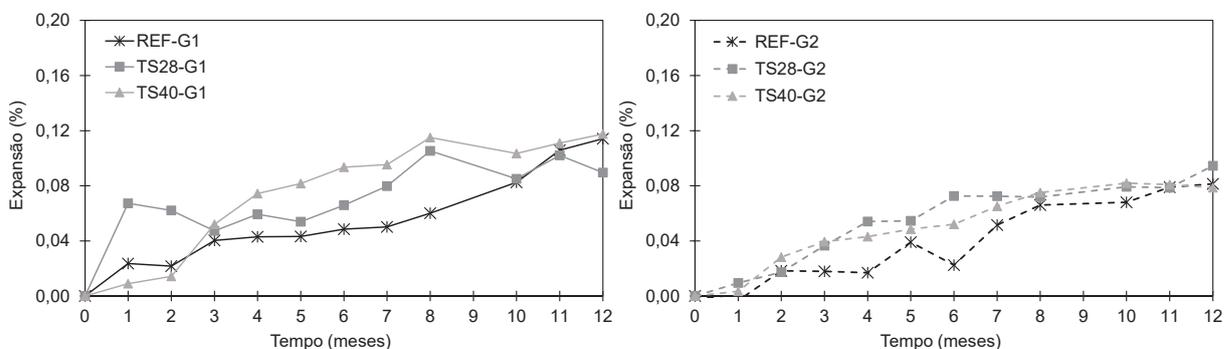
Analisando todos os ensaios, é possível observar que o TS40 apresenta um tempo maior de reação, visto que no ensaio de capilaridade o TS28 apresenta desempenho melhor inicialmente, até os 7 dias, e após esta idade o TS40 se mostra melhor. Quando observado os resultados obtidos para absorção e índice de vazios nas pastas, o mesmo acontece. E isso ocorre também na TGA, quando analisada a perda de massa das amostras. Devido as suas características hidrofóbicas é possível que o processo de reação (hidrólise e polimerização) do TS40 seja mais demorado, sendo que em um primeiro momento ele atua como um hidrofugante de superfície e, com o passar do tempo, ele atua como um silicato, reagindo com os compostos presentes da matriz cimentícia, formando sílica gel e/ou C-S-H, dependendo da disponibilidade dos elementos.

### 5.3.3 Análise da expansão decorrente da RAS

Da mesma forma que no capítulo 4, a partir da colocação dos pinos nos corpos de prova e medição inicial, observou-se que algumas das amostras não encaixaram corretamente no pórtico. Dessa forma, estas foram descartadas das análises de expansão. Os dados, para o agregado G1 e G2 são compostos pela média das expansões de 5 amostras para todas as séries.

A Figura 5.21 mostra os resultados de expansão obtidos das misturas de referência e aquelas que foram aplicados os tratamentos TS28 e TS40.

FIGURA 5.21 – Média das expansões dos corpos de prova de concreto ao longo do tempo



A série de referência, contendo agregado G1, apresentou expansão média, aos 365 dias, de 0,11%, enquanto que a série com aplicação dos tratamentos TS40 e TS28, apresentaram valores médios de 0,12% e 0,09% respectivamente. Já a série de referência, contendo agregado G2, apresentou expansão média, aos 365 dias, de 0,08%, sendo as séries com tratamento TS40, 0,08%, e TS28, 0,09%.

Como pode ser observado na Figura 5.21 todos os concretos apresentaram o mesmo comportamento, independente do agregado, sendo que os tratamentos aplicados não reduziram os valores médios das expansões obtidas.

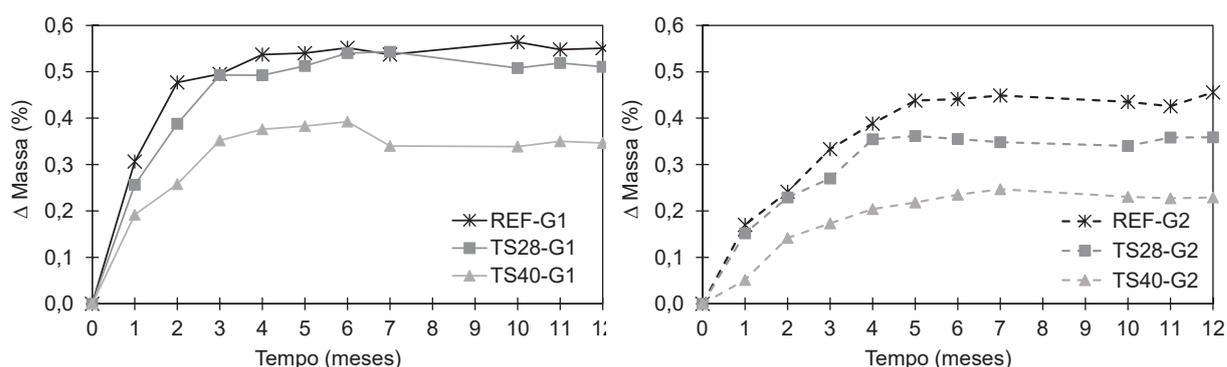
A premissa sobre o uso de tratamentos de superfície em concretos é de contribuir na redução da umidade interna pela menor disponibilidade de umidade externa devido à barreira formada. No entanto, sabe-se que a UR crítica interna para que ocorra a RAS é dependente da reatividade do agregado utilizado (BÉRUBÉ *et al.*, 2002b; DESCHENES *et al.*, 2016). Todavia, a limitação da entrada de água pode contribuir para reduzir a RAS, uma vez que a água também atua como um meio de transporte para os íons presentes nos poros, os quais são essenciais para a ocorrência da reação.

Outro fator atrelado ao desempenho dos tratamentos é a penetração dos mesmos na superfície do concreto. Estudos realizados Deschenes, Murray e Hale (2017), Souza (2022) com alguns tipos de tratamento de superfície, como, por exemplo, silanos, mostraram que quanto mais 'maduro' e danificado o concreto estava, melhor foi a penetração dos tratamentos, devido às fissuras e poros, e conseqüentemente os resultados obtidos. Isso também foi observado na pesquisa desenvolvida por Cai *et al.* (2016), na qual os autores compararam o uso do TEOS em contrapartida a outros

tipos de tratamento de superfície. Cai *et al.* (2016) também relataram que as reações do TEOS (hidrólise e polimerização) podem afetar seu desempenho e a hidratação do cimento nas idades iniciais. Todavia, não há estudos relativos ao uso deste tipo de tratamento em concretos afetados pela RAS.

A Figura 5.22 mostra a variação de massa dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e ambos os tratamentos, TS40 e TS28.

FIGURA 5.22 – Variação de massa dos concretos ao longo do tempo



Como é possível observar na Figura 5.22 nos concretos que foram aplicados o tratamento TS40 a variação de massa foi inferior as demais séries. Esse comportamento foi observado para ambos os agregados. Esse resultado corrobora com o obtido no ensaio de capilaridade que aponta a menor absorção de água pelos concretos contendo o tratamento de superfície TS40.

Como há pouca bibliografia existente sobre o uso do TEOS como tratamento de superfície em concretos inseridos em ambientes agressivos, e incipientes estudos da interação deste composto com a matriz cimentícia, buscou-se analisar os resultados de expansão em conjunto com os testes de deterioração realizados, com o intuito de entender como estes tipos de tratamento de superfície se comportam em relação aos danos causados pela RAS, principalmente porque não houve diferença nos valores médios de expansão obtidos.

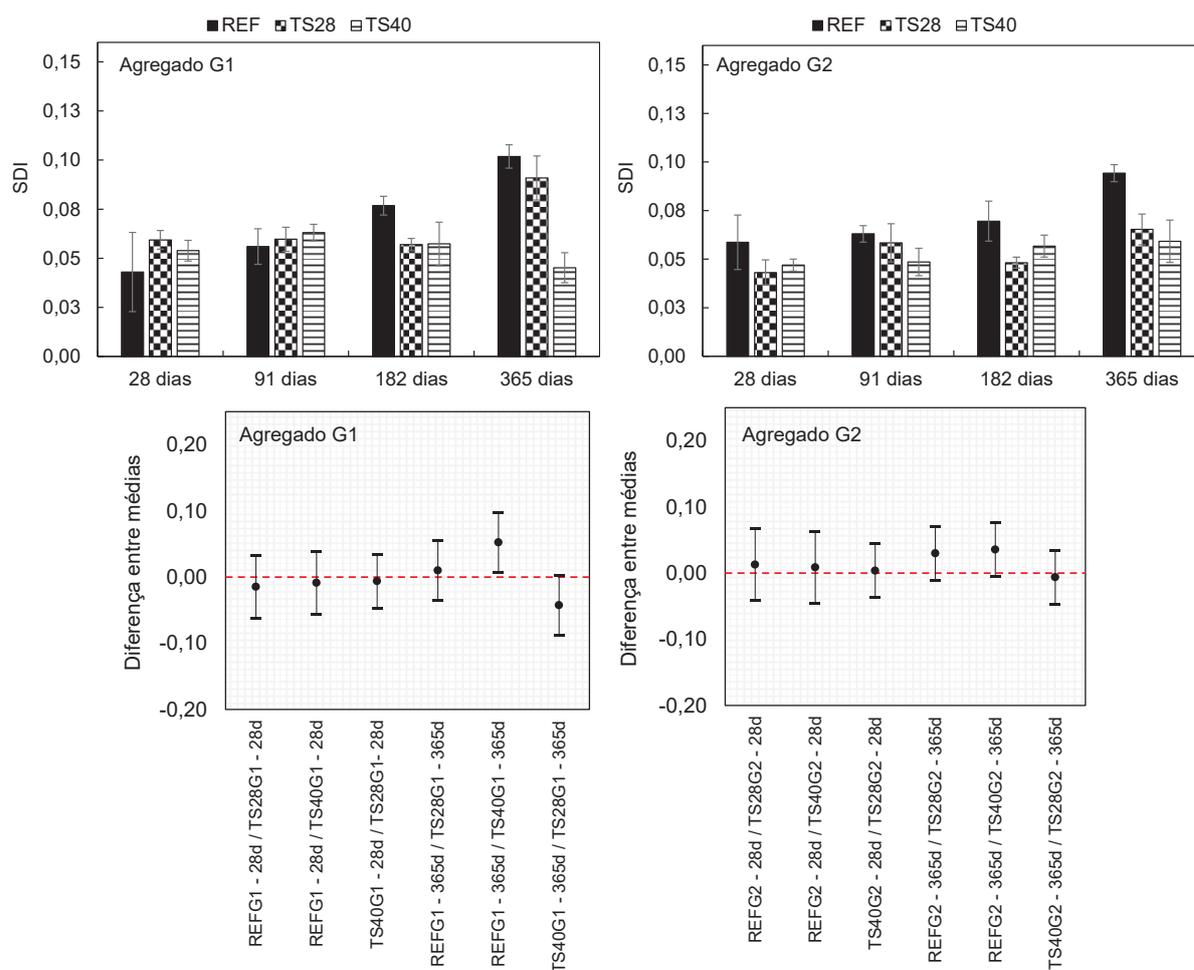
Cabe destacar também que os valores de expansão obtidos para as séries de referência são ligeiramente diferentes dos obtidos no capítulo 4, principalmente no que tange o agregado G1. Entretanto, neste capítulo era esperado que os valores de expansão fossem inferiores, uma vez que houve um processo de cura de 28 dias nos corpos de prova antes que os mesmos fossem inseridos nas condições de RAS. Vale ressaltar que neste capítulo não se avaliou limite de expansão, e sim, a eficácia dos tratamentos.

### 5.3.4 Análise da deterioração dos corpos de prova

Como no capítulo 4, a análise de deterioração dos corpos de prova devida a RAS contou com os ensaios de SDT e DRI.

A Figura 5.23 mostra os resultados do SDI para os corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, para todas as séries (com e sem tratamento de superfície). Em cada barra do gráfico é representada a média dos resultados de 5 corpos de prova e a barra de erro padrão desta média. Para avaliação dos resultados foi realizada análise estatística ANOVA e comparação entre médias utilizando o Teste de Tukey com um intervalo de 95% de confiança. Na Figura 5.23 foram plotadas apenas as diferenças entre médias das idades iniciais (28 dias) e finais (365 dias) do ensaio.

FIGURA 5.23 – Resultados do SDI dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança



Na Figura 5.23 é possível observar que o SDI é crescente ao longo das idades, principalmente para as séries de referência. Aos 365 dias de acompanhamento,

as séries com tratamento TS40, para ambos os agregados G1 e G2, foram as que apresentaram menores índices de dano devido a RAS, 0,05 e 0,06, respectivamente. O resultado de SDI, aos 365 dias, obtido para a série com aplicação do tratamento TS40 e agregado G1 obteve diferença estatística significativa quando comparada a série de referência (REF-G1).

Os concretos de referência contendo os agregados G1 e G2 apresentaram SDI igual a 0,10 e 0,09, respectivamente, aos 365 dias. Valores estes bem próximos dos obtidos no capítulo 4 para os mesmos concretos, e não apresentaram também diferença estatística significativa pelo teste de Tukey com um intervalo de confiança de 95%. Para os corpos de prova que foram aplicados o tratamento TS28, os valores obtidos de SDI aos 365 dias foram de 0,09 (agregado G1) e 0,07 (agregado G2), não apresentando também diferença estatística quando comparados aos valores das séries de referência (REF-G1 e REF G2).

De acordo com Li e Wu (2022) a utilização do TEOS como tratamento de superfície proporcionou melhora na resistência aos ciclos de gelo e degelo em concretos. Os autores relatam que este material reduziu a absorção de água nas primeiras idades e que as reações podem ter bloqueado os poros e microfissuras do concreto. Esses resultados corroboram com os encontrados nos ensaios de capilaridade e também nos ensaios realizados com as pastas de cimento desta tese. As reações ocorridas podem ter reduzido o acesso da água para o interior do concreto, se comparado as séries de referência, o que pode ser uma hipótese, visto o ensaio de variação de massa. E, portanto, esse efeito pode ter limitado, de certa forma, a ocorrência da RAS.

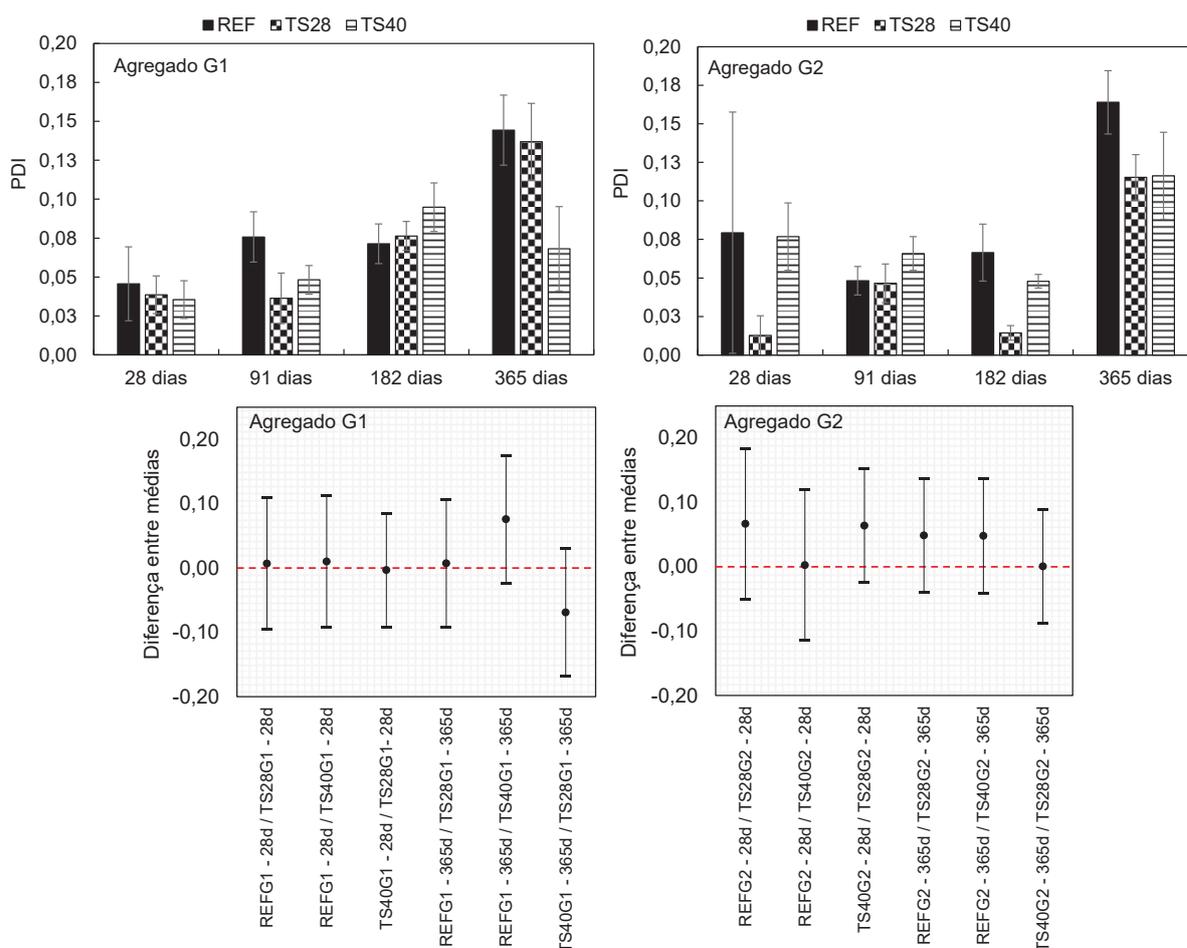
O TS40 também apresenta capacidade hidrofugante, mesmo que limitada a um tempo de atuação, como pôde ser observado no ensaio de ângulo de contato. Silanos e siloxanos são produtos classificados como hidrofugantes e que podem ser utilizados como proteção de superfície. Esses produtos penetram na superfície do concreto e se ligam quimicamente ao mesmo, formando uma camada hidrofóbica que dificulta a penetração de água, entretanto eles são permeáveis ao vapor de água (BASHEER; LONG, 1997; DESCHENES; MURRAY; HALE, 2017; PAN *et al.*, 2017a).

Bérubé *et al.* (2002a), Bérubé *et al.* (2002b), Lute *et al.* (2016), Rua *et al.* (2016), Deschenes, Waidner e Hale (2016), Deschenes (2017), Deschenes, Murray e Hale (2017) estudaram silanos e siloxanos como proteção de superfície para o concreto e evidenciaram que a expansão e os danos causados devido à reação álcali-sílica foram reduzidos em concretos onde os tratamentos foram aplicados. Estes tipos de tratamentos de superfície contribuem na redução da umidade interna pela menor

disponibilidade de umidade externa devido à barreira formada e como consequência o menor acesso à água para o desenvolvimento da RAS (DESCHENES, 2017). Dessa forma, o TS40 pode atuar, em um primeiro momento, reduzindo o acesso da água ao concreto, o que traduz os resultados encontrados tanto para expansão, como capilaridade e consequentemente os resultados de SDT.

A Figura 5.24 mostra os resultados do PDI para os corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, para todas as séries (com e sem tratamento de superfície). Para avaliação dos resultados foi realizada análise estatística ANOVA e comparação entre médias utilizando o Teste de Tukey com um intervalo de 95% de confiança. Na Figura 5.24 foram plotadas apenas as diferenças entre médias das idades iniciais (28 dias) e finais (365 dias) do ensaio.

FIGURA 5.24 – Resultados do PDI dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança

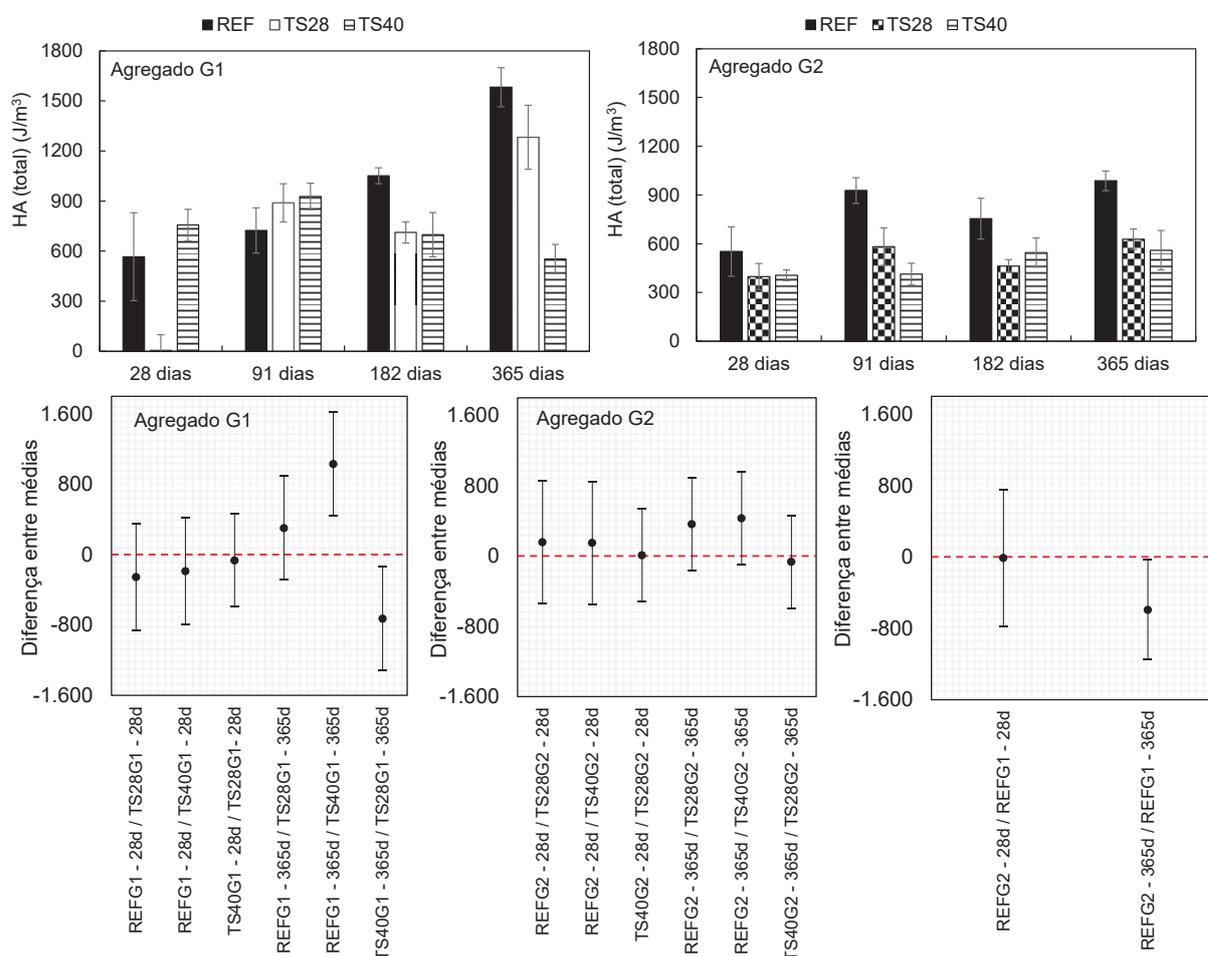


A Figura 5.24 mostra que o índice de deformação plástica também foi crescente ao longo do tempo. Aos 365 dias, as séries de referência, para ambos os agregados,

apresentaram valores de PDI de 0,14 e 0,16 para a REF-G1 e REF-G2 respectivamente, não apresentando diferença estatística significativa entre os resultados. Já as séries com tratamento TS28, obtiveram valores de PDI de 0,14 (agregado G1) e 0,12 (agregado G2). E as séries com tratamento TS40 obtiveram valores de 0,07 para os concretos com agregado G1 e 0,12 para os concretos com o agregado G2. Apesar de se observar valores menores de PDI para as séries de tratamento (TS40 e TS28), a análise estatística mostrou que os resultados obtidos são estatisticamente semelhantes aos obtidos para as séries de referência, para ambos os agregados (G1 e G2).

A área de histerese obtida para as séries de ambos os agregados também apresentou resultados semelhantes. Na Figura 5.25 é possível observar a área de histerese obtida ao final dos 5 ciclos de carga/descarga para todos os concretos estudados. Para avaliação dos resultados foi realizada análise estatística ANOVA e comparação entre médias utilizando o Teste de Tukey com um intervalo de 95% de confiança. Na Figura 5.25 foram plotadas apenas as diferenças entre médias das idades iniciais (28 dias) e finais (365 dias) do ensaio.

FIGURA 5.25 – Área de histerese - corpos de prova contendo os agregados G1 e G2, e análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança



Concretos mais afetados pela RAS apresentam maior energia dissipada pelo sistema para fechar estas fissuras, quando submetidos ao ensaio de SDT (SANCHEZ *et al.*, 2016a; SANCHEZ *et al.*, 2016b; SANCHEZ *et al.*, 2017). Os concretos de referência são os mais afetados pelos danos causados pela RAS, visto que há uma maior perda de energia nos ciclos, o que ocorre devido a maior fissuração nestes concretos. A área de histerese aos 365 dias para o concreto com aplicação do tratamento TS40 (agregado G1) foi em média 552,76 (J/m<sup>3</sup>), 65% menor que a obtida para o concreto de referência (1582,18 J/m<sup>3</sup>), já o concreto com aplicação do tratamento TS28 obteve área de 1282,19 J/m<sup>3</sup>, valor este 19% menor que a referência, apresentando assim, resultados estatisticamente diferentes. Esses resultados demonstram que, de certa forma, os tratamentos podem ter alterado a cinética da reação deletéria, uma vez que podem ter reduzido o acesso de água para o interior do concreto.

Todas as séries com o agregado G2 tiveram comportamentos semelhantes ao

longo do tempo, apresentando resultados semelhantes estatisticamente. Aos 365 dias a área de histerese para referência foi em média  $987,48 \text{ J/m}^3$ , já para os concretos com aplicação do TS40 e TS28, os valores foram de  $559,76 \text{ J/m}^3$  e  $627,77 \text{ J/m}^3$ , respectivamente.

As séries de referência contendo os agregados G1 e G2, aos 365 dias, apresentaram resultados estatisticamente diferentes. Isso corrobora com os demais resultados, evidenciando que o agregado G1 apresenta maior reatividade entre os dois e consequentemente o desenvolvimento da RAS é mais acelerada para os corpos de prova contendo esse agregado.

A Figura 5.26 mostra as diferenças obtidas nas propriedades mecânicas, resistência à compressão e módulo de elasticidade, dos concretos afetados pela RAS. Para avaliação dos resultados foi realizada análise estatística ANOVA e comparação entre médias utilizando o Teste de Tukey com um intervalo de 95% de confiança. Na Figura 5.27 foram plotadas apenas as diferenças entre médias das idades iniciais (28 dias) e finais (365 dias) do ensaio.

FIGURA 5.26 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova contendo os agregados G1 e G2 - resistência à compressão e módulo de elasticidade

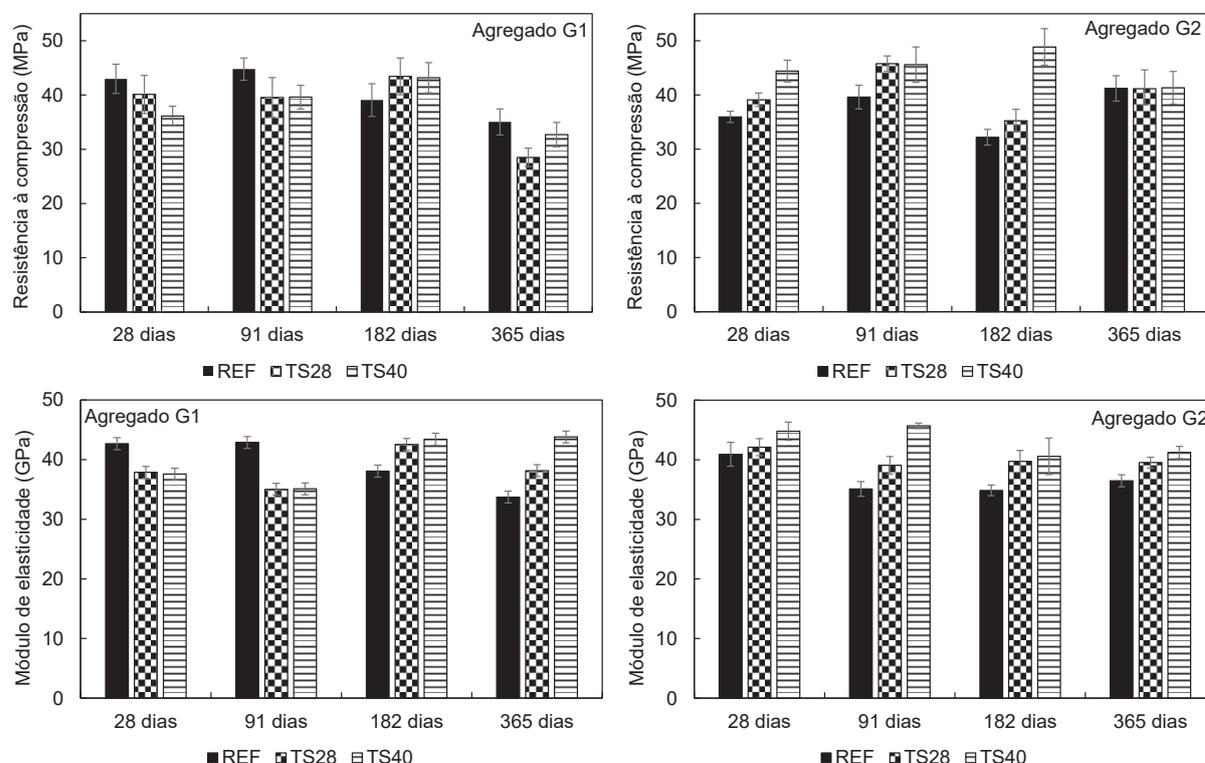
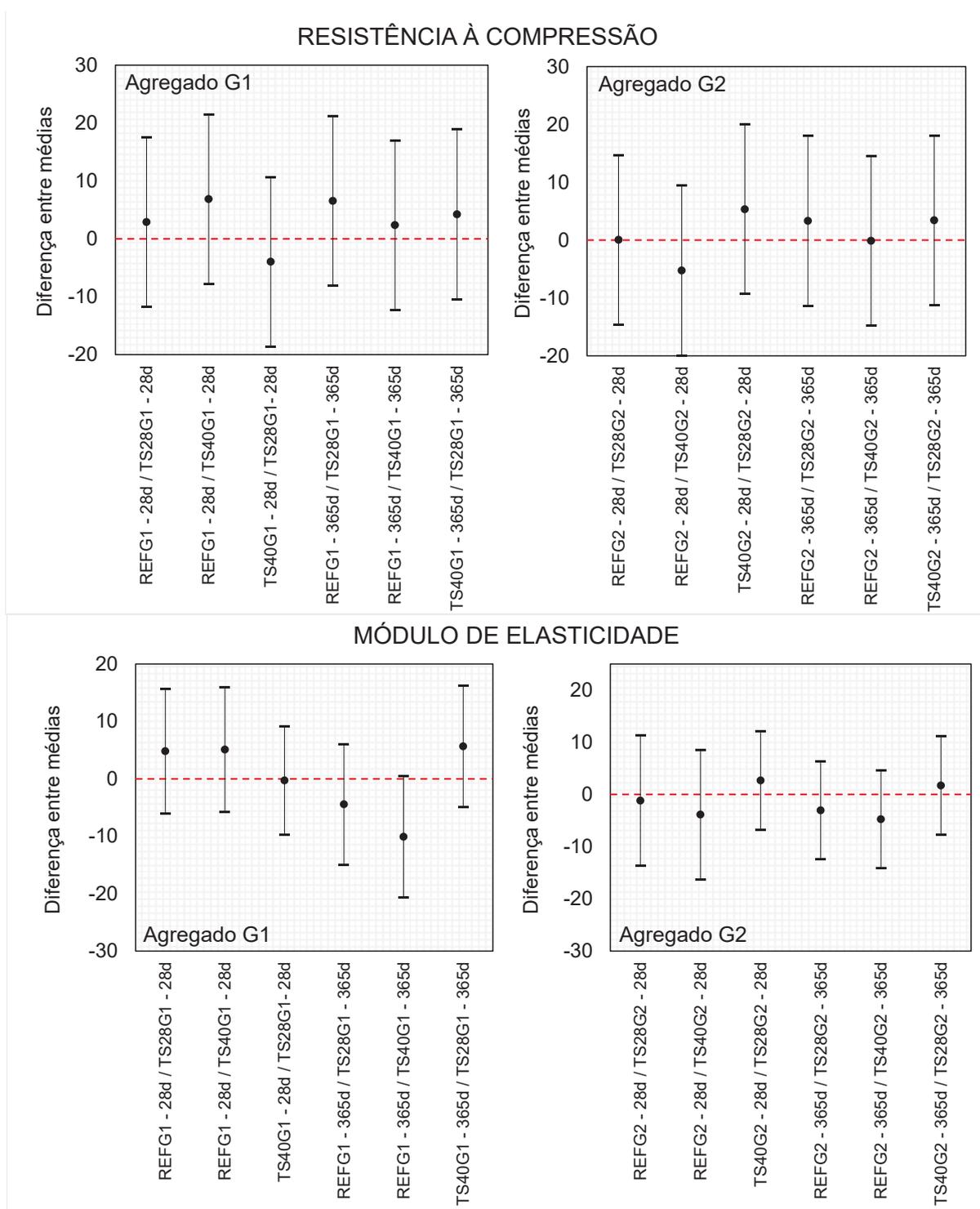


FIGURA 5.27 – Análise comparativa entre médias (teste de Tukey) com um intervalo de 95% de confiança para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, nas idades de 28 e 365 dias



Concretos com maiores danos devido a RAS além de apresentarem resultados de PDI e SDI mais elevados, também tendem a reduzir suas propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade (SANCHEZ *et al.*, 2017; SOUZA, 2022). Esse fato também

foi notado neste estudo, uma vez que é possível observar a redução do módulo de elasticidade ao longo do tempo, principalmente para os concretos de referência.

Aos 365 dias nota-se que o módulo de elasticidade dos concretos de referência, contendo agregados G1 e G2, apresentaram queda de 21% e 11%, respectivamente, em relação à idade de 28 dias. Para as séries com tratamento TS28, para o agregado G1 não houve diferença na redução das propriedades mecânicas ao longo do tempo, já para a série com o agregado G2 a perda foi em média de 6%. As séries com tratamento TS40 seguem o mesmo comportamento, para o agregado G1, houve um ganho no módulo de elasticidade ao longo do tempo, sendo que aos 365 dias esse ganho foi de, em média, 16,5%. Já para o agregado G2, a série teve uma redução no módulo de elasticidade de, em média, 8%. Apesar dessa redução no módulo de elasticidade, todas as séries apresentaram resultados estatisticamente semelhantes.

O módulo de elasticidade é governado por diversas características dos materiais utilizados no concreto e suas proporções de mistura, mas no geral o agregado utilizado tem bastante influência (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Dessa forma, as fissuras geradas a partir da reação deletéria no interior dos agregados, com o passar do tempo, tendem a se propagar para a zona de transição e pasta de cimento, e com isso contribuem na redução do módulo de elasticidade. E isso ocorre principalmente com as séries de referência, evidenciando que os tratamentos contribuíram alterando, de certa forma, a cinética da RAS.

No ensaio de resistência se observou redução dos valores de resistência à compressão nos concretos contendo agregado G1, entretanto esta redução não está necessariamente atrelada ao desenvolvimento da RAS, uma vez que é difícil determinar o dano a partir deste ensaio. Para os concretos contendo o agregado G2 foi observado um aumento de resistência à compressão ao longo do tempo. Todas as séries apresentaram resultados estatisticamente semelhantes.

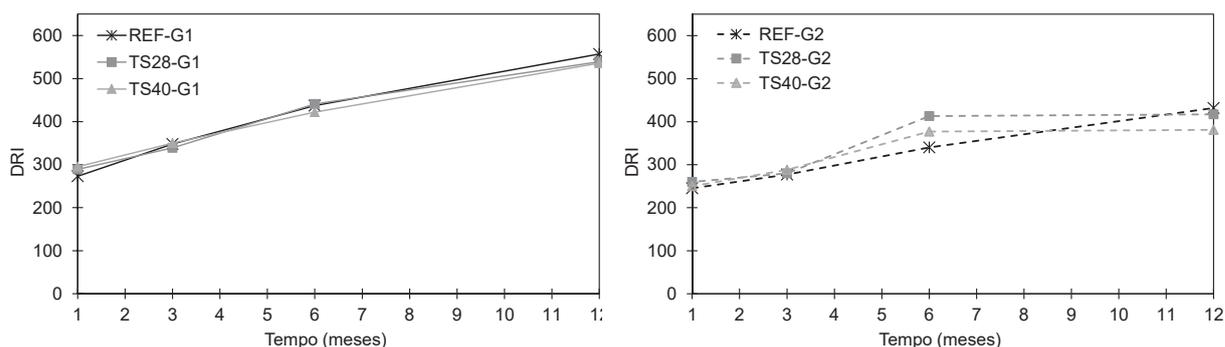
Com o objetivo de compreender melhor o dano causado pela RAS e as características microscópicas das fissuras desenvolvidas a partir da reação deletéria, o Índice de Classificação de Danos (DRI) foi utilizado.

A Figura 5.28 mostra a evolução do DRI ao longo do tempo, para ambos os agregados. De forma geral, os números de DRI aumentaram para todas as séries ao longo do tempo.

É possível observar na Figura 5.28 que o comportamento em relação à evolução do DRI foi semelhante para todos os concretos, independente do tipo de tratamento aplicado, tanto para o agregado G1, quanto para o G2. Como já identificado em outros

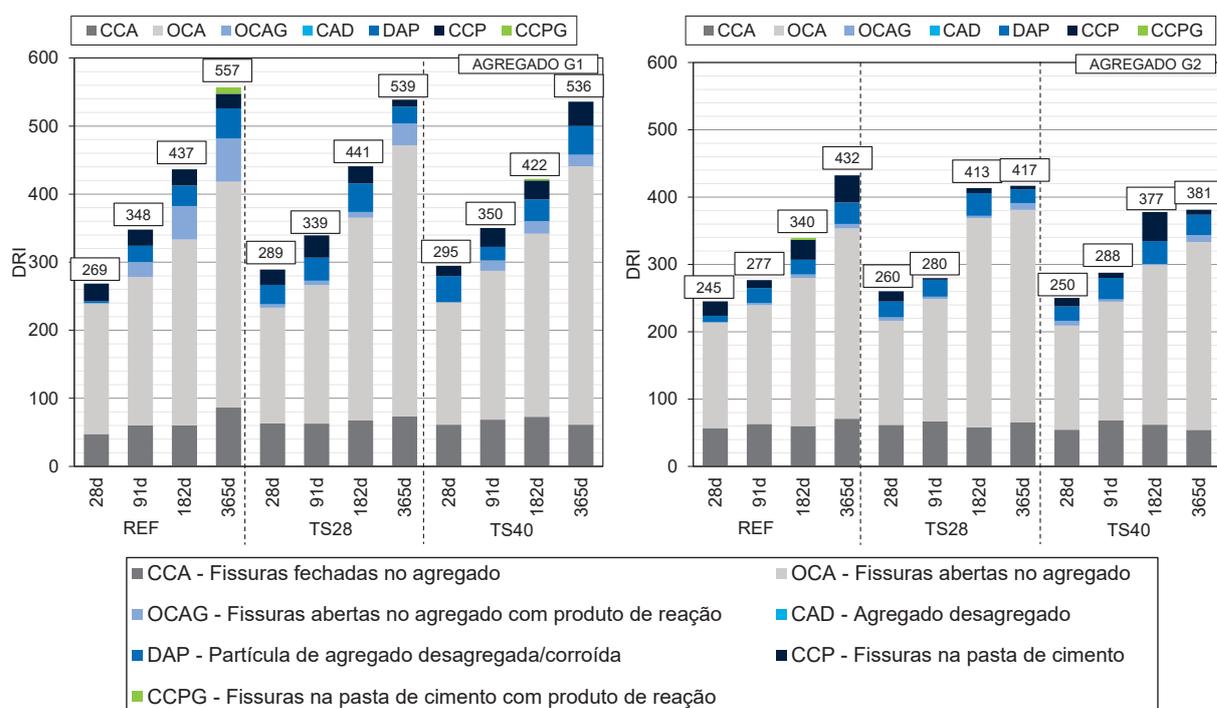
ensaios, o agregado G2 é menos reativo e, portanto, o número de DRI atingido é menor ao longo das idades de avaliação. A evolução do número de DRI é apenas um parâmetro o qual não deve ser analisado separadamente, uma vez que é importante saber se houve diferença na forma como as fissuras aconteceram nos concretos com a aplicação dos tratamentos.

FIGURA 5.28 – Evolução do DRI ao longo do tempo para todas as séries contendo os agregados G1 e G2



A Figura 5.29 mostra as características petrográficas para todas as séries dos concretos contendo os agregados G1 e G2, aos 28, 91, 182 e 365 dias.

FIGURA 5.29 – Características petrográficas dos concretos contendo os agregados G1 e G2, analisados ao longo do tempo



A análise de DRI mostra que ambos os agregados já apresentavam microfissu-

ras nas primeiras idades de avaliação. Essas microfissuras podem estar associadas a particularidades dos próprios agregados utilizados provenientes de processos de britagem e/ou intemperismo, como já apontado no capítulo 4.

Sanchez *et al.* (2015), Sanchez *et al.* (2017) citam que as fissuras causadas pela RAS iniciam-se dentro das partículas dos agregados reativos e, com o passar do tempo e avanço da reação deletéria, elas progridem para a pasta de cimento. Como já citado no capítulo 4, dentre os dois tipos de fissuras determinadas pelos autores (SANCHEZ *et al.*, 2015; SANCHEZ *et al.*, 2017) o tipo A, chamado de "sharp", é o mais comum encontrado em ambos os agregados utilizados neste estudo. A imagem representativa deste tipo de fissura, bem como do tipo B pode ser visualizada no capítulo 4, Figura 4.24. As fissuras do tipo A iniciam-se dentro das partículas, normalmente mais ao centro do agregado, e com o passar do tempo se estendem por todo ele. A Figura 5.30 e Figura 5.31 mostram as fissuras comumente encontradas nos agregados testados, evidenciando as análises de 365 dias nas séries de referência.

FIGURA 5.30 – Fissuras observadas nos agregados G1 aos 365 dias - análise microscópica

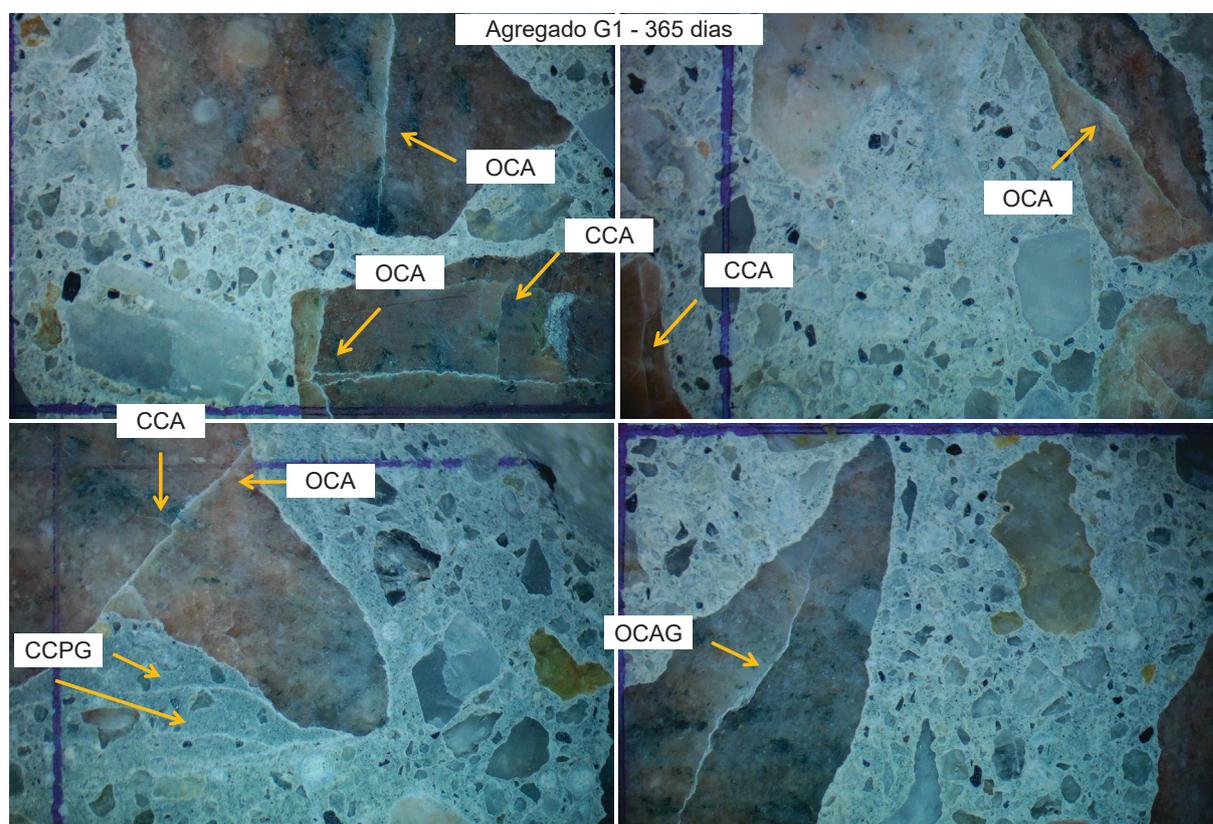
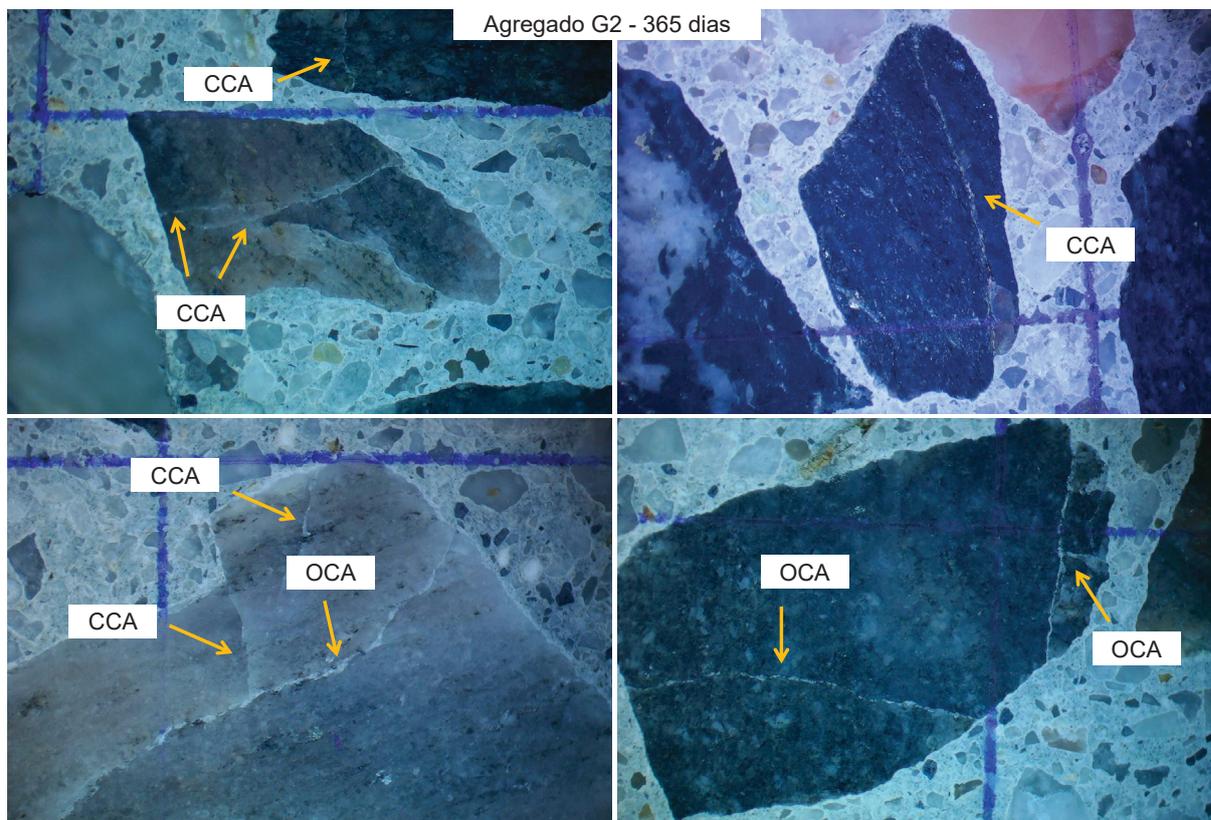


FIGURA 5.31 – Fissuras observadas nos agregados G2 aos 365 dias - análise microscópica



Como evidenciado no capítulo 4, para o nível de expansão encontrado, de acordo com Sanchez *et al.* (2015), Sanchez *et al.* (2016b), Sanchez *et al.* (2017), a fissuração na pasta com o passar do tempo, não é tão significativa. A análise microscópica mostra que o avanço das fissuras abertas nos agregados (OCA) é o que mais aumenta ao longo do tempo.

Quando se analisa as séries com tratamento, para ambos os agregados, é possível notar que não há muita diferença quanto ao número de DRI encontrado, se comparados as séries de referência, o que corrobora com os resultados de expansão encontrados. Todavia, não explica porque os ensaios de SDT se mostraram melhores nestes concretos. Entretanto, quando analisado os tipos de fissuras comumente encontrados nestes corpos de prova, é possível observar um padrão em relação à formação de gel. Foram encontradas em menores proporções a formação de gel nas análises, ou seja, as características petrográficas denominadas OCAG (Fissuras em agregado graúdo com produto de reação) e CCPG (Fissuras na pasta de cimento com produto de reação), como pode ser observado na Figura 5.29. Isso ocorreu principalmente nas amostras contendo o agregado G1, o mais reativo entre os dois.

Os resultados encontrados mostram, de forma global, que os tratamentos utilizados (TS28 e TS40) alteraram, de certa forma, a cinética da RAS. Essa mudança pode ter ocorrido pelo menor acesso de água ao interior do concreto, devido à barreira formada, seja pelas reações ocorridas (hidrólise e polimerização), seja pela barreira hidrofóbica formada pelo TS40. A sílica gel formada pela reação de polimerização não é expansiva, e além disso, dependendo da disponibilidade dos produtos nos poros do concreto, esta pode se ligar com os compostos de cálcio e formar C-S-H, proporcionando assim o tamponamento dos poros.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como objetivo avaliar a eficiência de dois tipos de tratamento de superfície, TS28 e TS40 no desencadeamento da RAS em concretos com diferentes agregados reativos (G1 e G2), utilizando técnicas de diagnóstico da reação.

- Quanto a avaliação dos tratamentos utilizados, de modo geral, ambos se mostraram promissores em reduzir o acesso de água ao interior do concreto, seja pela formação de produtos das reações ocorridas (hidrólise e polimerização), seja pela formação de uma barreira hidrofóbica, propriedade esta comprovada para o TS40 pela análise de ângulo de contato.
- A redução da absorção de água nas pastas contendo os tratamentos puderam ser observadas já nas primeiras idades de avaliação, acelerando o processo de redução da porosidade na matriz cimentícia que ocorreria pela hidratação do cimento.
- Os tratamentos podem ter alterado a cinética de hidratação do cimento, uma vez que foi encontrada etringita com maior frequência nas pastas contendo os tratamentos.
- No geral, os mecanismos de desenvolvimento dos danos causados pela RAS foram semelhantes em concretos com e sem tratamento de superfície.
- Quanto ao nível de expansão, não foram observadas reduções significativas nos concretos com o uso dos tratamentos de superfície para ambos os agregados testados.
- Quanto ao ensaio de SDT, os índices PDI e SDI obtidos foram inferiores para os concretos nos quais foram aplicados os tratamentos, principalmente naqueles com o TS40. Os valores encontrados não se encaixaram nas faixas usuais obtidas

na literatura para o nível de expansão atingido. Fato este que justifica a realização de uma extensa campanha experimental, com agregados provenientes do Brasil, que consiga caracterizar melhor o desenvolvimento dos mecanismos de danos decorrentes da RAS utilizando as ferramentas de diagnóstico e prognóstico da reação.

- Houve perda de módulo de elasticidade nas amostras de referência ao longo do tempo devido ao dano causado pela RAS. Não se observou essa perda nas séries que foram aplicados os tratamentos de superfície.
- Do ponto de vista microscópico, apesar da quantidade de fissuras encontradas na pasta ser crescente ao longo do tempo, as fissuras abertas nos agregados foram as que tiveram aumento mais significativo em todas as séries.
- Foi encontrada em menor proporção a formação de gel nas análises microscópicas realizadas nos corpos de prova com tratamento de superfície.
- Quando comparados os dois agregados (G1 e G2) pôde-se observar, pelos resultados, que o agregado G1 apresentou maior potencial reativo e, portanto, maiores valores de SDI, PDI e DRI para todas as misturas.
- Por fim, conclui-se que tanto o TS28 quanto o TS40 alteraram a cinética da RAS. Entretanto, mais estudos são necessários neste sentido, visando entender a forma química como este tipo de material atua no concreto. Sugere-se ainda a incorporação deste tipo de material na dosagem do concreto, a fim de entender a interação que o mesmo teria com os componentes do cimento. Sugere-se também a aplicação deste tipo de tratamento em idades avançadas, com maiores expansões ocorridas devido a RAS, a fim de compreender se estes tratamentos teriam resultados melhores de penetração na superfície devido o dano já instaurado.

## 6 MODELAGEM MATEMÁTICA

### 6.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E OBJETIVO DO CAPÍTULO

A reação álcali-sílica (RAS) é definida como um processo deletério que ocorre entre alguns componentes reativos de certos agregados e hidróxidos alcalinos presentes na solução de poros da matriz do concreto. O resultado dessa reação é um gel que, na presença de água, expande provocando tensões internas nos elementos de concreto (FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000). Uma vez que a RAS ocorre normalmente no longo prazo no Brasil (5-20 anos), o prognóstico do comportamento estrutural pode ser feito com o uso de modelos de previsão.

A modelagem do fenômeno da RAS é complexa. A dificuldade do uso dessa ferramenta para prever o desencadeamento da RAS em estruturas existe devido as diversas variáveis envolvidas no processo e a complexidade multinível da reação (ESPOSITO; HENDRIKS, 2019; GRAZIA *et al.*, 2021; NGUYEN *et al.*, 2022). Quando se faz o uso de modelagem numérica para prever o comportamento de uma estrutura ao longo do tempo, a ideia é tentar ilustrar o problema de forma que se leve em consideração os principais aspectos e fenômenos de interesse.

Diversos modelos já foram desenvolvidos em estudos nos últimos anos (PAN *et al.*, 2012; ESPOSITO; HENDRIKS, 2019). Alguns modelos são baseados no desencadeamento da reação em nível microscópico e mesoscópico, levando em conta os produtos de hidratação, agregado reativo, formação do gel e implicações mecânicas (BAZANT; STEFFENS, 2000; POYET *et al.*, 2007; MULTON; SELLIER; CYR, 2009; GRAZIA *et al.*, 2021); já outros visam compreender o comportamento das estruturas afetadas pela RAS, simulando um comportamento real. Porém, para que o modelo represente o correto desencadeamento da reação, a realidade das estruturas e seja válido, vários dos parâmetros devem ser determinados e calibrados com base em monitoramentos em campo e testes em laboratório (NGUYEN *et al.*, 2022).

Grazia *et al.* (2021) propuseram um modelo semi-empírico para descrever a expansão devido à reação álcali-agregado, baseado num modelo já existente e desenvolvido por Larive na década de 90. O objetivo desse estudo foi validar e entender a confiabilidade dos resultados gerados a partir do modelo, através de comparações com os resultados produzidos em laboratório. Com base neste estudo, este capítulo tem por objetivo contribuir para a calibração e validação do modelo matemático proposto

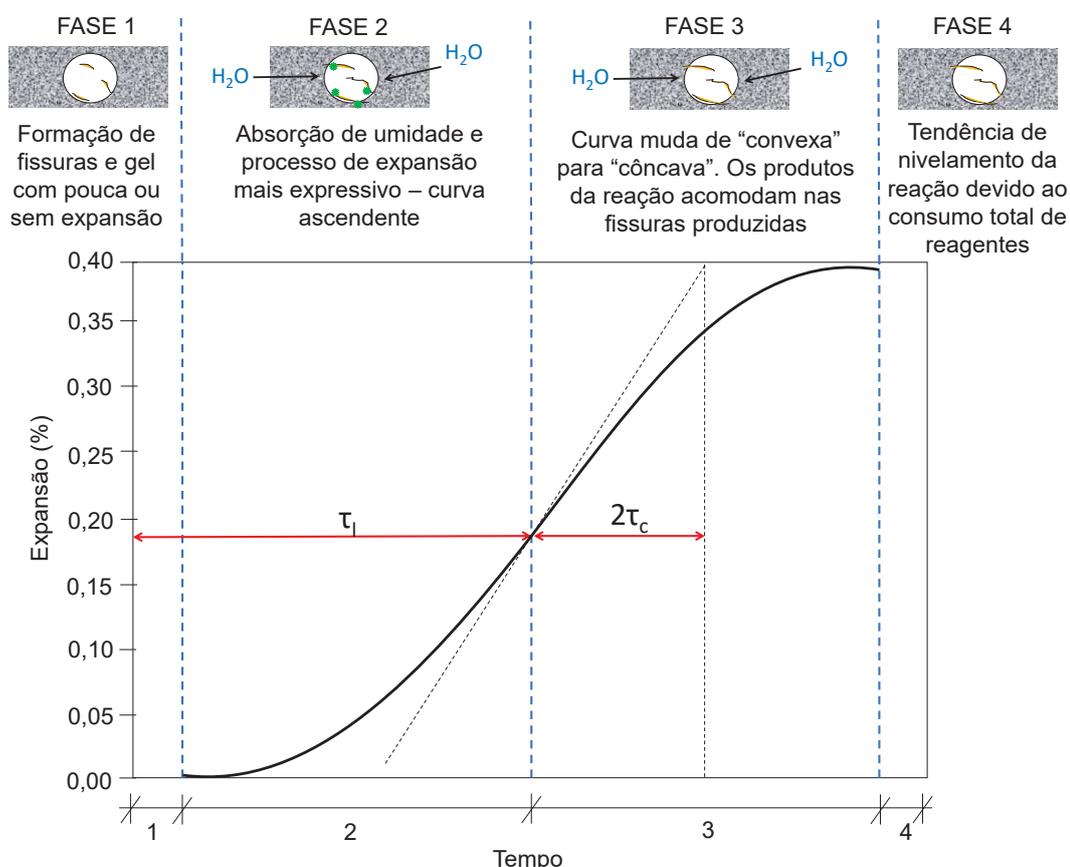
por Grazia *et al.* (2021).

## 6.2 MODELO SEMI-EMPÍRICO DA RAS

O modelo estudado e modificado por Grazia *et al.* (2021) foi proposto por Larive (LARIVE, 1997) em 1997. O modelo de Larive apresenta uma abordagem semi-empírica, desenvolvido com base em experimentos laboratoriais, e é descrito em função de três parâmetros principais: a expansão final ou expansão última ( $\varepsilon^\infty$ ), o tempo de latência ou período inicial ( $\tau_l$ ) e as fases características ( $\tau_c$ ), sendo que cada conjunto de parâmetros são válidos para uma dada temperatura ( $\theta$ ). A crítica em cima deste modelo é que o 'tempo de latência' e as 'fases características' são parâmetros puramente matemáticos, tornando-os de difícil definição dentro do modelo (GRAZIA *et al.*, 2021). O gráfico de expansão induzida, gerado a partir do modelo de Larive, normalmente se apresenta como uma curva S, a qual é dividida em quatro fases distintas, conforme mostra a Figura 6.1.

Na primeira fase há formação de fissuras nos agregados presentes no concreto, e início da formação do gel, com pouco ou quase nenhuma expansão. Na segunda fase inicia-se um processo de expansão mais expressivo, isso devido à absorção de umidade e expansão do gel. O gel formado pela RAS é basicamente composto por silicato de sódio e potássio em variadas proporções, podendo incorporar também íons de cálcio disponíveis na solução (GLASSER; KATAOKA, 1981; JOHN; POOLE; SIMS, 2012). Essa reação contínua modifica e danifica a estrutura inicial da sílica e favorece a absorção de mais álcalis e água (TAYLOR, 1997). Nesta fase a curva S tem formato ascendente. Já na terceira fase há mudança no formato da curva de convexa para côncava. Neste estágio há uma fissuração dos agregados e pasta suficientes para que os produtos de reação comecem a se acomodar nos espaços vazios e estabilizar a taxa de expansão. E o que ocorre depois, na quarta fase é a tendência ao nivelamento da reação e consequente expansão, devido ao consumo total dos produtos de reação (álcalis disponíveis e sílica reativa).

FIGURA 6.1 – Forma da curva devido à expansão induzida obtida a partir do modelo de Larive adaptado - níveis de expansão meramente ilustrativos



FONTE: Adaptado de Larive (1997) e Grazia *et al.* (2021)

Grazia *et al.* (2021) utilizaram um banco de dados com resultados de ensaios experimentais com objetivo de validar o modelo de Larive, trabalhando com uma aproximação empírica dos 3 principais parâmetros descritos. Para tanto os autores utilizaram características/fatores mensuráveis que representam maior influência no desencadeamento da RAS. Os fatores estudados e avaliados foram: tipo do agregado, natureza/reatividade do agregado, quantidade de álcalis, temperatura, exposição e umidade relativa.

A partir dos experimentos laboratoriais, os autores atribuíram coeficientes para estes fatores e definiram faixas de atuação para balizar novas pesquisas. Em seguida, o modelo proposto foi construído, calibrado e validado com base nos coeficientes definidos. A Equação 6.1 mostra o modelo modificado proposto por Grazia *et al.* (2021) para descrever a expansão devido a RAS em laboratório.

$$\varepsilon(t, \theta) = \varepsilon(t) \varepsilon^\infty = \frac{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_c k_c, T k_c, RH k_c, \% A k_c, E}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{(t - \tau_i k_{L, T} k_{L, RH} k_{L, \% A} k_{L, E})}{\tau_c k_c, T k_c, RH k_c, \% A k_c, E}\right)} \times (k_{Inf, T} k_{Inf, RH} k_{Inf, E} k_{Inf, \% A}) \varepsilon^\infty \quad (6.1)$$

Onde:

$t$  = tempo decorrido;

$\varepsilon(t)$  = a expansão no tempo decorrido;

$\varepsilon^\infty$  = a expansão máxima ou expansão última;

$\tau_c$  = as fases características (parâmetro em função do tipo e natureza/reactividade do agregado);

$\tau_l$  = tempo de latência (parâmetro em função do tipo e natureza/reactividade do agregado);

$k_{c,T}, k_{c,RH}, k_{c,E}, k_{c,\%A}$  = temperatura, umidade, exposição e quantidade de álcalis, fatores que impactam as fases características;

$k_{L,T}, k_{L,RH}, k_{L,E}, k_{L,\%A}$  = temperatura, umidade, exposição e quantidade de álcalis, fatores que impactam o tempo de latência;

$k_{Inf,T}, k_{Inf,RH}, k_{Inf,E}, k_{Inf,\%A}$  = temperatura, umidade, exposição e quantidade de álcalis, fatores que impactam a expansão última.

### 6.2.1 Tipo e natureza/reactividade do agregado

Grazia *et al.* (2021) destacam haver diferença nas curvas de expansão de acordo com o tipo de reação, ou seja, se é reação álcali-sílica (RAS) ou reação álcali-carbonato (RAC). Além disso, é possível observar também a diferença na expansão do concreto de acordo com o tamanho do agregado reativo utilizado (agregado graúdo e miúdo). A partir dos ensaios realizados no laboratório e destas observações, os autores criaram categorias para definir e separar estas características encontradas. Além disso, é preciso destacar que as categorias são separadas também por nível de expansão, ou seja, a categoria é definida conforme o nível de expansão obtido após um ano no ensaio de prismas de concreto (CPT) (Tabela 6.1). Estes níveis de expansão foram determinados em outro estudo experimental (SANCHEZ *et al.*, 2017), o qual destaca que estes valores podem ser utilizados como níveis de referência. A Tabela 6.1 mostra as categorias definidas de acordo com o tipo dos agregados e os coeficientes determinados conforme a natureza/reactividade, bem como a classificação segundo os níveis de expansão.

TABELA 6.1 – Níveis de expansão de referência, tipo de agregado e coeficientes de natureza/reactividade

Reação	Tipo agregado	Grau de dano	exp. CPT (%)	$\tau_c$	$\tau_L$	$\varepsilon^\infty$ (%)
RAS	-	Negligenciável	0,00 a 0,039	-	-	-
	gráúdo	Negligenciável/Margem	0,04 a 0,059	57	89	0,05
	gráúdo	Margem <sup>1</sup>	0,06 a 0,099	43	168	0,08
	gráúdo	Moderado	0,1 a 0,199	46	165	0,15
	gráúdo	Alto	0,2 a 0,299	50	44	0,23
	miúdo	Alto	0,2 a 0,299	38	157	0,26
	-	Muito alto	0,3 a 0,49	-	-	-
	gráúdo e miúdo	Ultra alto	$\geq 0,50$	42	103	0,60
RAC	miúdo	Ultra alto	$\geq 0,50$	71	0	0,60
	-	Ultra alto	$\geq 0,50$	49	0	0,70

<sup>1</sup> Agregado cujo resultado no ensaio de expansão se encontra no limite para ser considerado potencialmente reativo

FONTE: Adaptado de (SANCHEZ *et al.*, 2017) e (GRAZIA *et al.*, 2021)

De acordo com os testes de laboratório e as curvas geradas pelo estudo, foi possível observar que a reação álcali-carbonato apresenta uma cinética de desenvolvimento da expansão mais rápida, obtendo também um valor de expansão última maior. Já para a reação álcali-sílica existem algumas variáveis, como a utilização de agregado gráúdo e/ou agregado miúdo. No caso do agregado miúdo, a cinética da reação e a expansão última são inferiores às obtidas para a RAC. E no caso do agregado gráúdo a reação se desenvolve muito mais lentamente e o nível de expansão última atingido também é bem inferior se comparada ao obtido com o concreto contendo agregado miúdo reativo.

### 6.2.2 Temperatura

O aumento da temperatura altera a cinética da reação álcali-agregado, bem como acelera a mesma. Grazia *et al.* (2021) calibraram os coeficientes relativos à temperatura de acordo com dados obtidos de outro estudo (SANCHEZ, 2008). Para tanto, foram observados os resultados obtidos para os ensaios de expansão em concretos submetidos a temperaturas de 80 °C, 60 °C e 38 °C. Os coeficientes obtidos para a temperatura podem ser observados na Tabela 6.2.

TABELA 6.2 – Coeficientes determinados de acordo com a temperatura do ensaio

Temperatura (°C)	$k_T\tau_c$	$k_T\tau_L$	$k_T\ln f$
0	0,00	0,00	0,00
38	1,00	1,00	1,00
60	0,62	0,83	1,40
80	0,33	0,01	2,81

FONTE: (GRAZIA *et al.*, 2021)

### 6.2.3 Umidade

Em sua discussão, Grazia *et al.* (2021) mostram que a elevação da umidade acelera a expansão devido a RAS e impacta no valor de expansão última obtido. Entretanto, os autores destacam também dificuldades em medir e correlacionar os coeficientes, uma vez que, por exemplo, em elevada umidade (96% e 100%) há o fator de lixiviação dos álcalis no concreto, além disso as condições de armazenamento e tamanho das amostras também influenciam no resultado final, conforme observado no trabalho de Sinno e Shehata (2019).

Dessa forma os coeficientes relativos ao fator umidade foram mantidos iguais a 1 para os casos com elevada umidade (96% e 100%), sendo que para  $k_{RH} - \tau_L$  os ensaios não conseguiram representar o modelo, e assim optou-se por manter este coeficiente igual a 0. A Tabela 6.3 mostra os coeficientes determinados para o fator umidade.

TABELA 6.3 – Coeficientes determinados de acordo com a umidade do ensaio

RH	100%	96%
$k_{RH} - \tau_c$	1	1
$k_{RH} - \tau_L$	0	0
$k_{RH} - Inf$	1	1

FONTE: (GRAZIA *et al.*, 2021)

Cabe destacar que os testes realizados nos capítulos 3, 4 e 5 foram conduzidos todos em umidade elevada e, dessa forma, os valores relativos às variações de umidade não serão discutidas.

### 6.2.4 Quantidade de álcalis

Como visto, o tipo do agregado e sua natureza/reactividade tem influência na cinética da RAS. Dentro deste contexto, Grazia *et al.* (2021) mostram que a quantidade de álcalis tem relação direta com estas características, alterando assim o desenvolvimento da expansão devido a RAS. As normas relativas à avaliação do potencial reativo dos agregados em concreto sugerem, para a realização do ensaio, a elevação do equivalente alcalino com a adição de NaOH. Esse procedimento visa contribuir na aceleração do desenvolvimento da RAS e também para tentar reduzir a lixiviação alcalina devido às condições de ensaio. Dessa forma, Grazia *et al.* (2021) trazem os coeficientes obtidos para os casos em que há elevação do equivalente alcalino pela adição de NaOH (5,25 kg/m<sup>3</sup>) e para os casos em que não há essa adição de álcalis

(3,78 kg/m<sup>3</sup>). A Tabela 6.4 mostra esses coeficientes obtidos para ambos os casos considerando o tipo e grau de reatividade dos agregados.

TABELA 6.4 – Coeficientes determinados de acordo com a quantidade de álcalis

Tipo		3,78 kg/m <sup>3</sup>			5,25 kg/m <sup>3</sup>		
		$k\%A\tau_c$	$k\%A\tau_L$	$k\%AI_{nf}$	$k\%A\tau_c$	$k\%A\tau_L$	$k\%AI_{nf}$
Miúdo	Ultra alto	2,82	1,00	0,98	1,19	1,00	0,88
	Alto	3,03	1,80	1,00	1,86	1,15	0,91
	Alto	2,77	0,83	1,50	2,05	0,79	1,47
Graúdo	Moderado	4,08	2,40	1,64	2,98	1,22	1,61
	Margem	6,95	4,94	4,37	4,61	2,38	2,21

FONTE: (GRAZIA *et al.*, 2021)

### 6.2.5 Exposição

Grazia *et al.* (2021) citam que a aplicação dos coeficientes estudados pelos autores tornam possível a previsão da cinética da RAS em diversas condições de exposição em laboratório, sem que seja necessário a calibração do modelo, uma vez que os autores já fizeram estes ajustes utilizando diversos estudos e uma vasta campanha experimental. E, por fim, os autores incluíram um coeficiente relativo à exposição, o qual permite a simulação em períodos contínuos ( $k_{c,E} = 1$ ) e intermitentes ( $k_{c,E} \neq 1$ ).

Como já mencionado, concretos expostos a ambientes externos tem um comportamento diferente na cinética da RAS daqueles expostos a ambientes controlados, como é o caso do laboratório. Nguyen *et al.* (2022) trazem uma abordagem diferente do modelo de Larive para correlacionar as expansões obtidas em laboratório com as obtidas em campo. Nesta abordagem os autores destacam algumas variáveis importantes: temperatura e umidade (condições de exposição), liberação e lixiviação alcalina.

Nesta tese, o modelo proposto por Grazia *et al.* (2021) foi aplicado, uma vez que se pretendeu fazer observações apenas a respeito de testes desenvolvidos em laboratório. Entretanto, isso não descarta a discussão acerca das variáveis destacadas por Nguyen *et al.* (2022).

## 6.3 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com os testes produzidos nos capítulos 3 e 4, os parâmetros utilizados para os experimentos servirão de base para calibrar o modelo proposto por Grazia *et al.* (2021). Ao fim, os resultados obtidos a partir da inserção dos dados serão

comparados aos gerados em laboratório. Não foram utilizados os dados gerados no capítulo 5, pois as condições iniciais dos corpos de prova diferiram dos demais.

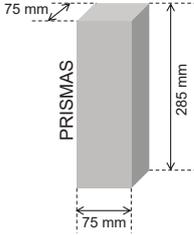
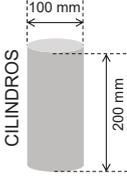
Todos os dados utilizados para compor os parâmetros e determinar os coeficientes serão descritos a seguir.

### 6.3.1 Parâmetros utilizados - ensaio CPT

A Figura 6.2 mostra os parâmetros e coeficientes relativos a tipo e natureza/reactividade dos agregados utilizados para gerar as curvas de expansão para os agregados G1 e G2, a partir do modelo modificado de Larive, proposto por Grazia *et al.* (2021). Nesta tabela foram apenas elencados os dados referentes ao ensaio em prismas de concreto (CPT), tanto para corpos de prova prismáticos, como cilíndricos, sendo que este último seguiu a mesma metodologia de ensaio, alterando apenas a forma do corpo de prova. Não foram utilizados os dados referentes aos outros agregados (B1 e B2) pois não atingiram o grau mínimo para serem considerados potencialmente reativos neste teste. Além destes, no capítulo 3 o agregado G2 também não atingiu valores superiores a 0,04% e, portanto, sua classificação quanto ao grau de reatividade se enquadra em negligenciável. Porém, Grazia *et al.* (2021) não citam a aplicação dos coeficientes neste caso. Sendo assim, ele será considerado na mesma categoria do agregado G1.

Cabe ressaltar também que as considerações sobre o grau de reatividade foram realizadas devido às diferenças obtidas nos ensaios em prismas e cilindros, como pode ser observado na Figura 6.2.

FIGURA 6.2 – Coeficientes utilizados conforme o tipo e natureza/reactividade dos agregados utilizados

CORPO DE PROVA	AGREGADO GRAÚDO	EXPANSÃO AOS 365 DIAS	GRAU DE REATIVIDADE	COEFICIENTES						
 PRISMAS	G1	0,049%	<ul style="list-style-type: none"> <li>ULTRA ALTO</li> <li>MUITO ALTO</li> <li>ALTO</li> <li>MODERADO</li> <li>MARGEM</li> <li><b>NEGLIGENCIÁVEL/MARGEM</b></li> <li>NEGLIGENCIÁVEL</li> </ul>	NEGLIGENCIÁVEL/MARGEM <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th><math>\tau_C</math></th> <th><math>\tau_L</math></th> <th><math>\epsilon^\infty</math> (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>57</td> <td>89</td> <td>0,05</td> </tr> </tbody> </table>	$\tau_C$	$\tau_L$	$\epsilon^\infty$ (%)	57	89	0,05
	$\tau_C$	$\tau_L$	$\epsilon^\infty$ (%)							
57	89	0,05								
G2	0,020%	<ul style="list-style-type: none"> <li>ULTRA ALTO</li> <li>MUITO ALTO</li> <li>ALTO</li> <li>MODERADO</li> <li>MARGEM</li> <li><b>NEGLIGENCIÁVEL/MARGEM</b></li> <li>NEGLIGENCIÁVEL</li> </ul>								
 CILINDROS	G1	0,17%	<ul style="list-style-type: none"> <li>ULTRA ALTO</li> <li>MUITO ALTO</li> <li>ALTO</li> <li><b>MODERADO</b></li> <li>MARGEM</li> <li>NEGLIGENCIÁVEL/MARGEM</li> <li>NEGLIGENCIÁVEL</li> </ul>	MODERADO <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th><math>\tau_C</math></th> <th><math>\tau_L</math></th> <th><math>\epsilon^\infty</math> (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>45</td> <td>165</td> <td>0,15</td> </tr> </tbody> </table>	$\tau_C$	$\tau_L$	$\epsilon^\infty$ (%)	45	165	0,15
	$\tau_C$	$\tau_L$	$\epsilon^\infty$ (%)							
45	165	0,15								
G2	0,07%	<ul style="list-style-type: none"> <li>ULTRA ALTO</li> <li>MUITO ALTO</li> <li>ALTO</li> <li>MODERADO</li> <li><b>MARGEM</b></li> <li>NEGLIGENCIÁVEL/MARGEM</li> <li>NEGLIGENCIÁVEL</li> </ul>	MARGEM <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th><math>\tau_C</math></th> <th><math>\tau_L</math></th> <th><math>\epsilon^\infty</math> (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>43</td> <td>168</td> <td>0,08</td> </tr> </tbody> </table>	$\tau_C$	$\tau_L$	$\epsilon^\infty$ (%)	43	168	0,08	
$\tau_C$	$\tau_L$	$\epsilon^\infty$ (%)								
43	168	0,08								

No ensaio com prismas de concreto, o agregado G1 atingiu 0,049% de expansão em 1 ano de avaliação. Já no ensaio em corpos de prova cilíndricos, o mesmo agregado atingiu 0,17%. O agregado G2, como já citado, no ensaio de prismas não atingiu valores superiores a 0,04% (limite para classificar um agregado como potencial reativo, neste caso). Já no ensaio com corpos de prova cilíndricos o mesmo agregado (G2) atingiu expansão final de 0,07%. Foram utilizadas apenas as séries de referência para a validação do modelo.

Para os coeficientes relativos à temperatura, foram considerados para a aplicação apenas os parâmetros do ensaio CPT, ou seja, a temperatura considerada foi a de 38°C. Para tanto os coeficientes utilizados podem ser observados na Tabela 6.5. A Tabela 6.5 também mostra os coeficientes utilizados devido ao parâmetro umidade. Da mesma forma que para a temperatura, o ensaio CPT tem umidade relativa mantida praticamente constante, pois consiste em utilizar um ambiente com UR acima de 95%. Ainda na Tabela 6.5 é possível observar também os coeficientes considerados para a quantidade de álcalis, a qual também é definida a partir do ensaio, uma vez que este sugere elevar o equivalente alcalino no concreto para acelerar a RAS.

TABELA 6.5 – Coeficientes utilizados de acordo com a temperatura, umidade e quantidade de álcalis utilizada no ensaio

Agregado		Temperatura (38 °C)			Umidade ( $\geq 95\%$ )			Álcalis (5,25 kg/m <sup>3</sup> )		
		$k_{c,T}$	$k_{L,T}$	$k_{Inf,T}$	$k_{c,RH}$	$k_{L,RH}$	$k_{Inf,RH}$	$k_{c,\%A}$	$k_{L,\%A}$	$k_{Inf,\%A}$
Prismas	G1/G2	1	1	1	1	0	1	4,61	2,38	2,21
Cilindros	G1	1	1	1	1	0	1	2,98	1,22	1,61
	G2	1	1	1	1	0	1	4,61	2,38	2,21

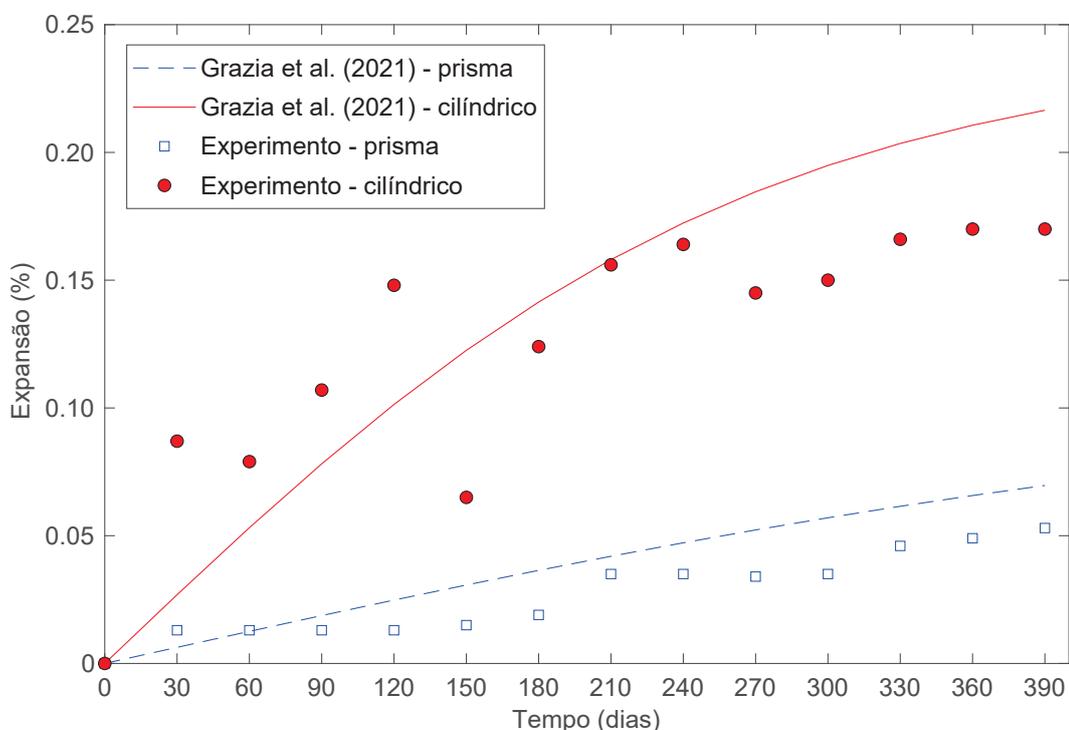
Por fim, o coeficiente relativo à exposição  $k_{c,E}$  foi definido como 1, uma vez que o ensaio é contínuo.

A partir dos parâmetros determinados, foram realizadas simulações computacionais usando o software MATLAB.

#### 6.4 RESULTADOS

Foram simuladas as curvas de expansão a partir do modelo modificado proposto por Grazia *et al.* (2021). Na Figura 6.3 se pode observar os resultados obtidos para o agregado G1 utilizando os dados apresentados na Tabela 6.5

FIGURA 6.3 – Modelo semi-empírico de Grazia *et al.* (2021) para o agregado G1



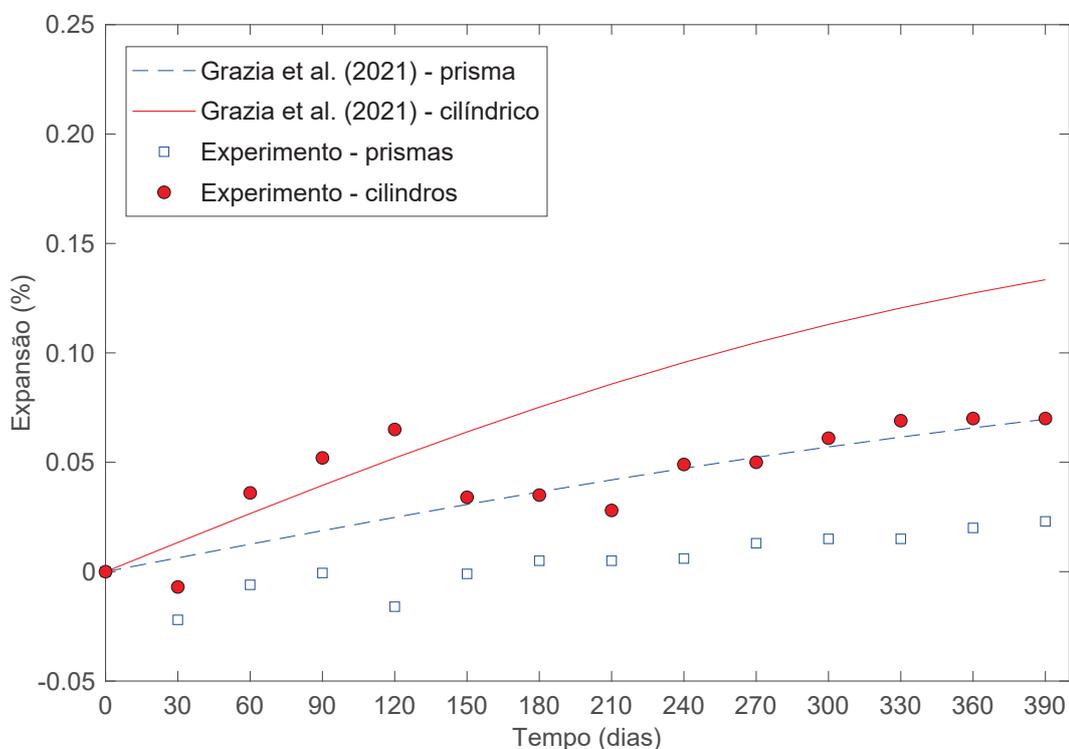
A curva com linha tracejada em cor azul é referente aos dados gerados pelo modelo de Grazia *et al.* (2021), relativo à classificação do ensaio em prismas de concreto, o qual obteve classificação do grau de reatividade como negligenciável/margem,

isso devido ao valor da expansão aos 365 dias obtida no ensaio em laboratório. Já a linha contínua de cor vermelha é referente aos dados gerados pelo modelo de Grazia *et al.* (2021), com os coeficientes relativos à classificação dos corpos de prova cilíndricos. Neste caso a classificação obtida para o grau de reatividade foi moderado ( $\varepsilon^\infty = 0,15\%$ ). O gráfico ainda mostra as curvas obtidas nos ensaios experimentais em laboratório para as séries estudadas (séries de referência dos capítulos 3 e 4). No capítulo 3 os corpos de prova prismáticos obtiveram, ao fim do ensaio, expansão igual a 0,049%. No capítulo 4, a expansão ao fim do ensaio foi de 0,17% e o ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos.

Pode-se observar que para ambos os ensaios experimentais, os dados gerados pelo modelo foram muito próximos aos obtidos.

A Figura 6.4 mostra os resultados obtidos para a modelo de Grazia *et al.* (2021) utilizando os parâmetros dos ensaios com o agregado G2. Ressalta-se, mais uma vez, que este agregado no ensaio de prismas não foi classificado como potencialmente reativo, entretanto, foram utilizados os coeficientes do grau de reatividade negligenciável/margem aplicando a expansão última  $\varepsilon^\infty = 0,05\%$ .

FIGURA 6.4 – Modelo semi-empírico de Grazia *et al.* (2021) para o agregado G2



Da mesma forma que para o agregado G1, a curva com linha tracejada em azul se refere a aplicação dos coeficientes dados pelo modelo de Grazia *et al.* (2021), devido à classificação do agregado G2 no ensaio de prismas de concreto (negligen-

ciável/margem com  $\varepsilon^\infty = 0,05\%$ ). A linha contínua de cor vermelha é referente aos dados gerados pelo modelo de Grazia *et al.* (2021), com os coeficientes relativos à classificação dos corpos de prova cilíndricos (margem e  $\varepsilon^\infty = 0,08\%$ ). O gráfico ainda mostra os resultados obtidos nos ensaios experimentais em laboratório para as séries de referência (capítulos 3 e 4). No capítulo 3 os corpos de prova prismáticos obtiveram, ao fim do ensaio, expansão igual a 0,20%. No capítulo 4, a expansão, ao fim do ensaio, foi de 0,07%.

E, da mesma forma que para o agregado G1, se pode observar que há validação para a aplicação do modelo de Grazia *et al.* (2021) quando comparadas as curvas com os dados experimentais, tanto para o ensaio com prismas de concreto, quanto para o ensaio nos corpos de prova cilíndricos. Entretanto, as curvas geradas pelo modelo não ficaram tão próximas das obtidas nos ensaios de laboratório. No caso do agregado G2, houve uma diferença maior na curva devido o fato de que não há coeficientes para o grau negligenciável (classificação do agregado G2) apontados no modelo para aplicação.

Devido às diferenças obtidas nos ensaios de expansão em prismas e cilindros, levanta-se a hipótese de que possa haver um efeito escala associado ao formato/dimensão dos corpos de prova. Apesar de o modelo ter contemplado ensaios com prismas e cilindros para definição de alguns coeficientes, essa diferença nos formatos não foi um fator considerado na avaliação.

Gao *et al.* (2013) citam que existe o efeito combinado entre o tamanho da partícula do agregado *versus* tamanho do corpo de prova e que este aspecto é pouco explorado em modelos matemáticos. Os autores (GAO *et al.*, 2013) tiveram como foco do seu estudo o efeito escala relacionando o tamanho do agregado com o tamanho dos corpos de prova e o impacto disto na expansão. Eles observaram haver diferenças principalmente quando se trata de agregados miúdos e graúdos. Entretanto, este efeito poderia ser aplicado também a diferenças no formato e tamanho dos corpos de prova, visto que essas características podem afetar a maneira como se propaga a reação (tensões internas e fissuração), principalmente porque as medidas de expansão são calculadas com base na variação do comprimento nos corpos de prova ao longo do tempo.

Sinno e Shehata (2019) investigaram o desenvolvimento da RAS em concretos de diferentes formatos, contendo dois tipos de agregados e diferentes adições minerais. Observou-se nos resultados de expansão que corpos de prova cilíndricos apresentam maiores valores de expansão que corpos de prova prismáticos. Outro resultado impor-

tante observado foi que os prismas tenderam a lixiviar mais álcalis do que os cilindros, mascarando assim os resultados de expansão. A diferença na lixiviação dos álcalis nas amostras de referência (ou seja, sem adições minerais) em prismas chegou a valores de até 41% em relação aos cilindros.

Como os agregados utilizados nesta tese também apresentam baixa reatividade, o impacto da lixiviação pode ter sido maior, e a diferença na expansão em ambos os corpos de prova (cilíndricos e prismáticos) tenderiam a apresentar resultados mais distantes, fato este constatado também por Sinno e Shehata (2019). Nos corpos de prova prismáticos, uma quantidade importante de álcalis pode ter sido lixiviada para fora do concreto devido aos efeitos de difusão e interrompido ou reduzido prematuramente a expansão dos corpos de prova nos ensaios. Entretanto, são necessários mais estudos para avaliar essa condição, pois a lixiviação alcalina não foi mensurada, apesar de observada, como já mencionado no capítulo 4.

Com a finalidade de avaliar a hipótese de haver um efeito escala associado ao formato/dimensão dos corpos de prova, bem como esse efeito contribuir na lixiviação alcalina, foi utilizada a ferramenta *Curve Fitting Tool Box* do MATLAB para determinar coeficientes que possam ajustar essa diferença no comportamento da expansão devido às diferenças nos tamanhos dos corpos de prova. Para tanto, entende-se que da mesma forma que todos os outros coeficientes foram calibrados no modelo, este deve seguir as mesmas definições, ou seja, deve ser em função dos três parâmetros principais: expansão final ou expansão última ( $\varepsilon^\infty$ ), tempo de latência ou período inicial ( $\tau_l$ ) e fases características ( $\tau_c$ ). Cabe ressaltar que estas observações foram realizadas em um número limitado de corpos de prova e agregados, e que mais estudos devem ser realizados a fim de validar se há de fato um efeito escala associado.

Dessa forma, o modelo contendo os coeficientes de efeito escala poderia ser descrito conforme a Equação 6.2.

$$\varepsilon(t, \theta) = \varepsilon(t) \varepsilon^\infty = \frac{1 - \exp^{-\frac{t}{\tau_c k_c, T k_c, RH k_c, \% A k_c, E^A}}}{1 + \exp^{-\frac{(t - \tau_l) k_L, T k_L, RH k_L, \% A k_L, E^B}}{\tau_c k_c, T k_c, RH k_c, \% A k_c, E^A}} \times (k_{Inf, T} k_{Inf, RH} k_{Inf, E} k_{Inf, \% A} C) (\varepsilon^\infty) \quad (6.2)$$

Onde:

A = Coeficiente de efeito escala, fator que impacta as fases características;

B = Coeficiente de efeito escala, fator que impacta o tempo de latência;

C = Coeficiente de efeito escala, fator que impacta a expansão última.

Para a avaliação da hipótese levantada, utilizou-se os dados experimentais obtidos a partir do ensaio de prismas de concreto e ajustou-os a partir da curva gerada pelo modelo, utilizando os coeficientes obtidos devido à classificação dos corpos de prova cilíndricos, adicionando a equação os coeficientes A, B e C, expostos acima. Os coeficientes de ajuste foram calculados a partir do método dos mínimos quadrados.

A Figura 6.5 mostra as curvas geradas pelo modelo devido à classificação do agregado G1, bem como os dados experimentais e também a curva do modelo ajustada, gerada a partir da utilização dos coeficientes de efeito escala. A Figura 6.6 mostra as mesmas curvas geradas para o agregado G2.

FIGURA 6.5 – Curva ajustada agregado G1

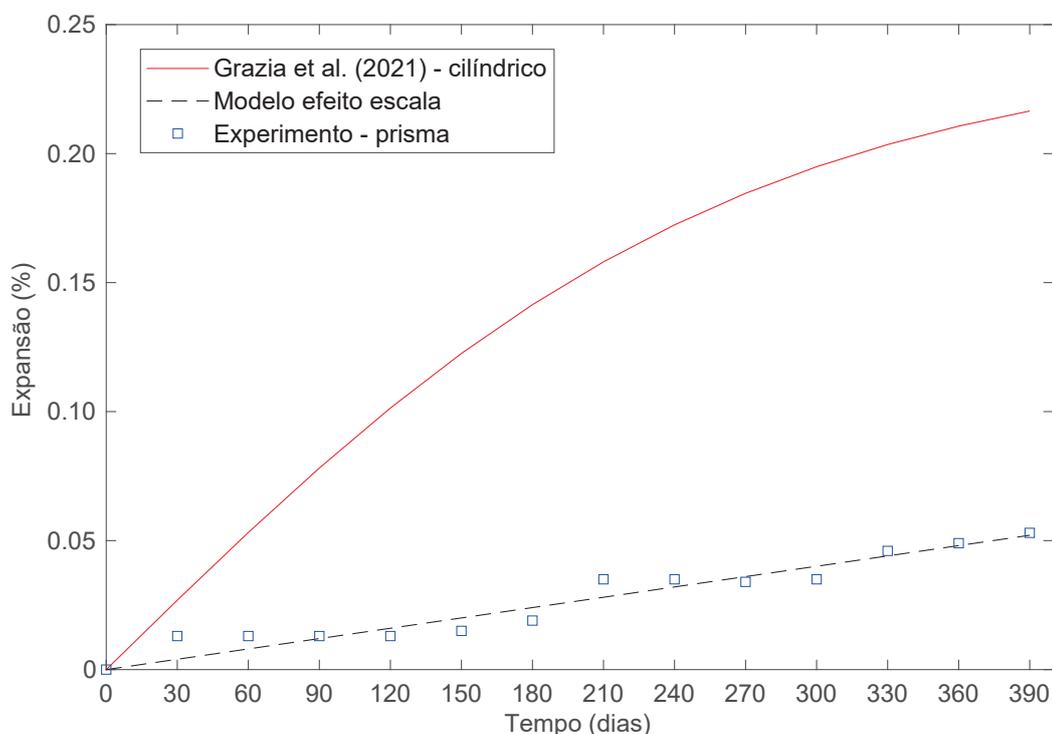
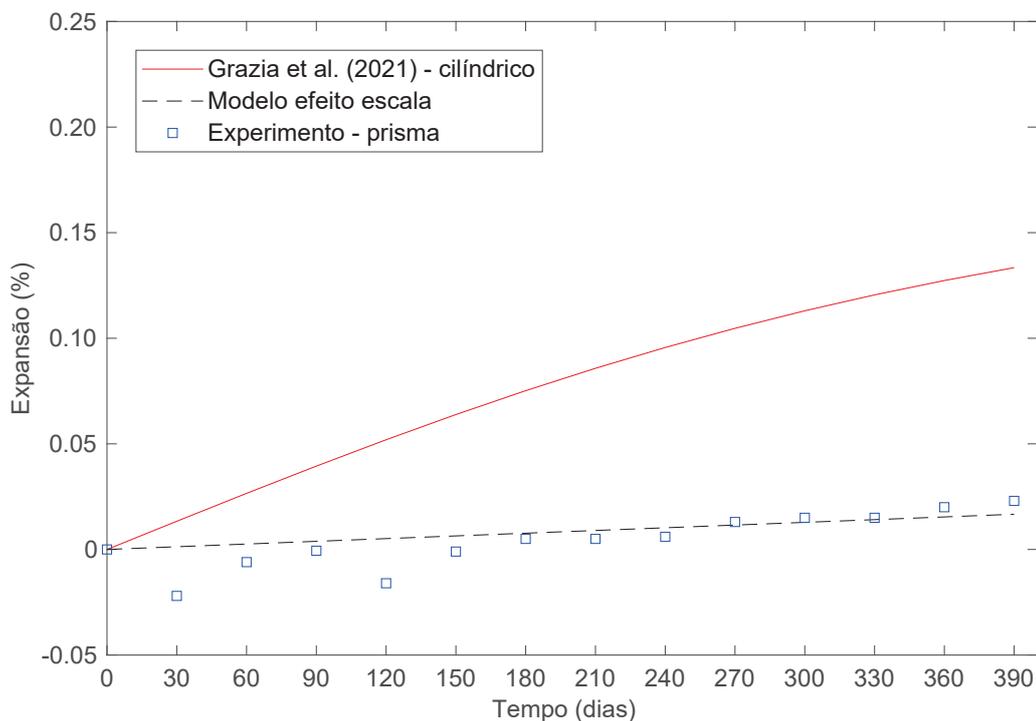


FIGURA 6.6 – Curva ajustada agregado G2



Os coeficientes obtidos podem ser observados na Tabela 6.6. Ressalta-se que não foi possível obter o coeficiente B, uma vez que o coeficiente  $k_{L,RH}$ , relativo à umidade, é igual a 0 (devido o ensaio CPT ocorrer em  $UR \geq 95\%$ ) na equação. Dessa forma, apenas os coeficientes A e C foram calculados.

TABELA 6.6 – Coeficientes A e C ajustados para o ensaio de prismas de concreto, conforme a classificação do agregado

Classificação agregado	coef. A	coef. C
Marginal	68,11	6,531
Moderada	66,57	9,871

A equação do modelo é não linear, e portanto, os coeficientes gerados são aproximados, e resultam no ajuste para a curva considerando os dados experimentais desta pesquisa. Avaliando os coeficientes obtidos é possível observar que eles foram bem próximos para ambos os agregados.

Os resultados obtidos são limitados, uma vez que a hipótese é baseada em apenas 2 tipos de agregados com classificações diferentes e um número limitado de corpos de prova (de cada ensaio - prismas e cilindros). Para que esse estudo seja validado é necessário que mais testes sejam realizados a fim de verificar a influência do tamanho/formato do corpo de prova e a lixiviação dos álcalis nos resultados de

expansão.

## 6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste capítulo foi contribuir para a validação de um modelo matemático semi-empírico, comparando os dados obtidos em laboratório com as curvas geradas pelo modelo.

- O modelo proposto mostrou resultados satisfatórios se comparadas as curvas geradas com os dados de laboratório obtidos, tanto para o agregado G1, como para o agregado G2;
- Faltam dados sobre coeficientes para prever corretamente o comportamento de agregados classificados no grau negligenciável. Pois, apesar de o modelo conseguir prever adequadamente o comportamento da expansão devido a RAS para o agregado G2, as curvas ficaram um pouco mais distantes dos dados experimentais, devido este agregado não apresentar potencial reativo no ensaio de prismas de concreto (CPT);
- A partir dos resultados de expansão obtidos em laboratório, levantou-se a hipótese de haver um efeito escala associado ao tamanho/formato dos corpos de prova, bem como diferenças na lixiviação dos álcalis devido a estas características. O efeito escala foi avaliado utilizando os dados obtidos nesta pesquisa e comparados ao modelo proposto, sendo ajustados a partir do cálculo de coeficientes pelo método dos mínimos quadrados. As curvas ajustadas geraram coeficientes próximos para ambos os agregados;
- A limitação deste estudo está na quantidade de amostras e agregados utilizados para prever uma correta abordagem do efeito escala associado a expansão devido a RAS. Além disso, não foram realizados ensaios para determinar a lixiviação dos álcalis nos concretos testados. São necessários mais testes utilizando uma gama de agregados, bem como diferentes formatos de corpos de prova para verificar a influência do tamanho/formato do corpo de prova e da taxa de lixiviação dos álcalis nos resultados de expansão em laboratório.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir serão apresentadas as conclusões elaboradas através das análises dos resultados obtidos no presente trabalho e, na sequência, serão propostas sugestões de temas para trabalhos futuros.

### 7.1 CONCLUSÕES

#### 7.1.1 Quanto a utilização de diferentes ensaios para avaliar o potencial reativo dos agregados

Dos agregados testados, os identificados como G1 (Gnaisse) e G2 (Granito) foram aqueles que mostraram melhores respostas pelo ponto de vista do concreto para o estudo nesta tese, apresentando maior potencial reativo nos ensaios. O agregado identificado como B2 (Basalto), apesar de mostrar expansões médias elevadas no teste acelerado em barras de argamassa, apresentou menores resultados em termos de RAS no concreto, caracterizando um resultado falso positivo no teste em argamassa. Isso também pôde ser observado com o agregado B1 (Basalto).

Dessa forma, os resultados demonstram que se deve testar os agregados a partir de todos os ensaios preconizados pela NBR 15577(2018), ou seja, em argamassa e concreto. Pois ficou comprovado que existe a possibilidade de classificação errônea de agregados se utilizado apenas o teste AMBT. E, portanto, este ensaio deve servir como balizador, não se devendo descartar ou aceitar um agregado apenas com o seu resultado.

#### 7.1.2 Quanto aos mecanismos de desenvolvimento da reação álcali-sílica em concretos com diferentes teores de cinza volante

Os resultados demonstraram que, em geral, os mecanismos de desenvolvimento dos danos causados pela RAS foram semelhantes em concretos com ou sem adição da cinza volante. Sendo que a utilização da cinza volante na composição do concreto apenas reduz a velocidade de desencadeamento da reação álcali-sílica. Além disso, quanto maior o nível de substituição, menores os resultados de expansão obtidos.

Quanto a utilização das ferramentas de diagnóstico da RAS, SDT e DRI, estas se mostraram satisfatórias pelo ponto de vista de avaliação da RAS. Para o SDT, os índices PDI e SDI obtidos mostraram a influência da adição de cinza volante no desenvolvimento da RAS quando comparados os resultados com a série de referência.

O ensaio de DRI mostrou que as fissuras eram crescentes ao longo do ensaio, evidenciando o desenvolvimento da RAS, principalmente nas séries de referência. As fissuras que mais tiveram um aumento foram as abertas nos agregados. Entretanto, pode-se observar também que grande parte das fissuras contabilizadas no ensaio, ao longo do tempo, eram provindas da progressão daquelas já preexistentes.

Por fim, todos os resultados apontaram o agregado G1 com potencial reativo mais elevado, corroborando com os resultados de expansão obtidos no capítulo 3.

### 7.1.3 Quanto ao efeito dos tratamentos de superfície no desencadeamento da reação álcali-sílica em concretos

Os resultados mostraram que os tratamentos modificaram a cinética da hidratação do cimento na superfície das amostras, onde foram aplicados.

De modo geral, ambos os tratamentos (TS28 e TS40) se mostraram promissores em reduzir o acesso de água ao interior do concreto, seja devido a formação de produtos das reações ocorridas (hidrólise e polimerização), seja pela formação de uma barreira hidrofóbica, propriedade esta comprovada para o TS40 pela análise de ângulo de contato.

Observou-se que os mecanismos de desenvolvimento dos danos causados pela RAS foram semelhantes em concretos com e sem tratamento de superfície. Não houve diferença significativa na expansão entre os concretos no tempo de ensaio. Entretanto, isso não significa que os tratamentos não tiveram influência no desenvolvimento da RAS.

Quanto ao uso das ferramentas de diagnóstico da RAS, ambas se mostraram satisfatórias pelo ponto de vista de avaliação da RAS quando aplicadas aos concretos com tratamento de superfície. No ensaio de SDT, os índices PDI e SDI obtidos foram inferiores para os concretos nos quais foram aplicados os tratamentos, principalmente naqueles com o TS40, evidenciando que houve alteração na cinética da reação álcali-sílica devido ao uso dos tratamentos.

O DRI mostrou que as fissuras foram crescentes ao longo do tempo de ensaio, e evidenciou que as fissuras abertas nos agregados foram as que tiveram aumento mais significativo em todas as séries no decorrer do tempo.

Por fim, conclui-se que tanto o TS28 quanto o TS40 alteraram a cinética da RAS, sendo que foi encontrada em menor proporção a formação de gel nas análises microscópicas realizadas nos corpos de prova com tratamento de superfície.

#### 7.1.4 Quanto ao uso do modelo semi-empírico proposto por Grazia *et al.* (2021)

Os resultados do modelo se mostraram satisfatórios se comparadas as curvas geradas com os dados de laboratório obtidos, tanto para o agregado G1, como para o agregado G2.

Foram obtidas diferenças nos ensaios de expansão quando utilizados corpos de prova prismáticos e cilíndricos. Essa diferença pode ser explicada pelo formato/tamanho do corpo de prova e lixiviação dos álcalis no desencadeamento da RAS. Dessa forma, levantou-se a hipótese de haver um efeito escala associado a estes fatores.

Aplicando esse efeito escala na equação, pode-se obter coeficientes para ajuste da curva bem próximos para ambos os agregados.

Entretanto, este estudo tem uma limitação, a lixiviação dos álcalis não foi determinada em laboratório e foram utilizadas poucas amostras (2 séries com prismas de concreto e 2 séries com cilindros de concreto) e agregados (2 diferentes tipos) para prever uma correta abordagem do efeito escala associado a expansão devido a RAS.

## 7.2 TRABALHOS FUTUROS

A partir das limitações observadas, sugerem-se estudos complementares a fim de auxiliar no avanço do conhecimento sobre o tema:

- Aplicação das ferramentas de diagnóstico, como DRI e SDT, em concretos com diferentes tipos de adições minerais e agregados reativos provenientes do Brasil;
- Estudar quimicamente a atuação dos tratamentos TS40 e TS28 na cinética de hidratação do cimento Portland;
- Incorporar os tratamentos TS40 e TS28 na dosagem do concreto, com a finalidade de entender a iteração do mesmo no desencadeamento da RAS;
- Aplicar os tratamentos TS40 e TS28 na superfície do concreto deteriorado (pela RAS, DEF, ataque por sulfato, carbonatação) e em idades avançadas com o objetivo de avaliar a eficácia destes materiais em concretos danificados;
- Avaliar o efeito escala em diferentes tamanhos/ formatos de corpos de prova com uma gama de agregados reativos, bem como determinar a lixiviação dos álcalis nestas amostras;
- Correlacionar estudos de laboratório com campos experimentais e casos reais.

## 7.3 ATUAÇÃO NA ELABORAÇÃO DE ARTIGOS

### 7.3.1 Publicações em eventos

- ADORNO, C. S.; LANGARO, E. A.; MEDEIROS, M. H. F. **Efeito das adições pozolânicas de alta reatividade na reação álcali-sílica**. 3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado. São Carlos-SP, Brasil. 2018.
- MARTINS, M. C.; LANGARO, E. A.; AMARAL, M.; VALDES, A.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. **Influência de adições minerais nas propriedades mecânicas do concreto submetido a um microclima agressivo de sulfato de amônio**. 61º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza-CE. 2019.
- AMARAL, M.; VALDES, A.; LANGARO, E. A.; MARTINS, M. C.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. **Ataque interno por sulfato de amônio em concretos com incorporação de adições pozolânicas de elevada reatividade**. XV Congreso Latinoamericano de Patología de Construcción y XVII Congreso de Control de Calidad en la Construcción, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas-México. 2019.
- MEDEIROS, M. H. F.; LANGARO, E. A. ; AMARAL, M.; CALVO, A. **Aprendizagem baseada em problemas: Uma experiência no ensino de patologia e reabilitação de estruturas**. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, Fortaleza. 2020.

### 7.3.2 Publicações em periódicos

- LANGARO, E. A.; COSTA DE MORAES, M.; BUTH, I. S. ; ANGULSKI DA LUZ, C.; PEREIRA FILHO, J. I.; MATOSKI, A. **Use of slag (GBFS) generated in charcoal blast furnace as raw material in alkali-activated cement**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (Online), v. 1, p. 1-9, 2020.
- CARNEIRO, A. F. B. ; DASCHEVI, P. A. ; LANGARO, E. A. ; PIERALISI, R. ; MEDEIROS, M. H. F. **Effectiveness of surface coatings in concrete: chloride penetration and carbonation**. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, v. 6, p. 1, 2020.
- LANGARO, E. A.; ADORNO, C. S.; MEDEIROS, M. H. F.; SOUZA, D. J.; PEREIRA, E. **Rice husk ash and the use as supplementary cementitious material to inhibit the alkali-silica reaction in mortars**. IBRACON Structures and Materials Journal. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 14, p. 1-14, 2021.
- MORAES, M. C.; BUTH, I. S.; LUZ, C. A.; LANGARO, E. A.; MEDEIROS, M. H. F. **Alkali-Activated Cement Subject to Alkali-Aggregate Reaction**. ACI Materials Journal, v. 118, p. 137-147, 2021.
- BILCATI, G. K.; LENGOWSKI, E. C.; JUMES, J. J.; ANDRADE, F. H.; NERVIS, I.

R.; SOUZA, I. S. C.; LANGARO, E. A. **Lightweight cementitious composites reinforced with Pinus spp. sawdust**. Cadernos de Ciência e Tecnologia, v. 38, p. 1, 2021.

- MARTINS, MONALISA C.; LANGARO, E. A.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. **External ammonium sulfate attack in concrete: Analysis of the current methodology**. Construction and Building Materials, v. 277, p. 122252, 2021.
- FRARE, A.; LANGARO, E. A.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F. **Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil**. REVISTA ALCONPAT, v. 13, p. 1-27, 2023.

#### 7.4 ATUAÇÃO EM CURSOS NO PERÍODO

- MEDEIROS, M. H. F.; REUS, G. C.; LANGARO, E. A. Workshop Técnicas de recuperação para o concreto armado: uma visão de presente e futuro. 2019. (Curso de curta duração ministrado/Extensão)
- LANGARO, E. A.; REUS, G. C.; MARTINS, M. C. ; MEDEIROS, M. H. F. Construindo uma revisão sistemática. 2020. (Duas edições - Curso de curta duração ministrado).

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, S.; KAZMI, S. M.; MUNIR, M. J. Potential of rice husk ash for mitigating the alkali-silica reaction in mortar bars incorporating reactive aggregates. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 132, p. 61–70, 2017. ISSN 09500618. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- AHMED, H.; ZAHEDI, A.; SANCHEZ, L. F. M.; FECTEAU, P.-L. Condition assessment of ASR-affected reinforced concrete columns after nearly 20 years in service. **Construction and Building Materials**, v. 347, p. 128570, 2022. ISSN 0950-0618. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 73.
- ALAEJOS, P.; LANZA, V.; BERMÚDEZ, M. A.; VELASCO, A. Effectiveness of the accelerated mortar bar test to detect rapid reactive aggregates (including their pessimum content) and slowly reactive aggregates. **Cement and Concrete Research**, Elsevier B.V., v. 58, p. 13–19, 2014. ISSN 0008-8846. Citado 3 vezes nas páginas 50, 52 e 63.
- ALEXANDER, M. G. **Alkali–aggregate reaction**. [S.l.]: Elsevier LTD, 2019. 87–113 p. ISBN 9780081026168. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.
- ANDRADE, C.; SARRÍA, J.; ALONSO, C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1249–1259, 1999. ISSN 00088846. Citado na página 35.
- ANDRADE, T. Cases in Building Foundations in the Recife Metropolitan Area. **IBRACON Materials Journal**, v. 2, n. 2, p. 97–105, 2006. Citado na página 21.
- ANDRADE, T. RAA em fundações na região metropolitana de Recife: 10 anos de história. **Concreto & Construção**, v. 76, p. 98–105, 2014. ISSN 1809-7197. Citado na página 21.
- AQUINO, W.; LANGE, D. A.; OLEK, J. The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 23, n. 6, p. 485–493, 12 2001. ISSN 09589465. Citado 3 vezes nas páginas 25, 32 e 70.
- ARAÚJO, D. T.; SOBRINHO, C. W. d. A. P. Blocos de Fundações de Edifícios Afetados por Reação Alcalis-Agregado - RAA: Estudo de Caso. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 1, n. 1, 2016. ISSN 2525-4251. Citado na página 21.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 1 - Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro, p. 21. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4 - Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro, p. 17. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-6: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 6 - Determinação da expansão em prismas de concreto**. Rio de Janeiro, p. 20. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-7: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado.** p. 20. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado.** p. 6. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5753: Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico.** p. 11. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.** p. 3. Rio de Janeiro, 2012.

BADER, T.; WALDNER, B. J.; UNTERBERGER, S. H.; LACKNER, R. On the performance of film formers versus penetrants as water-repellent treatment of High-Performance Concrete (HPC) surfaces. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 481–490, 2019. ISSN 0950-0618. Citado na página 106.

BADRUL, M.; HOSSAIN, Z. Effect of particle size of rice husk ash (RHA) in mitigating alkali silica reaction (ASR) in concrete pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, Chinese Society of Pavement Engineering, p. 0–5, 2018. ISSN 1996-6814. Citado na página 32.

BARBERENA-FERNÁNDEZ, A. M.; BLANCO-VARELA, M. T.; CARMONA-QUIROGA, P. M. Use of nanosilica- or nanolime-added TEOS to consolidate cementitious materials in heritage structures: Physical and mechanical properties of mortars. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 95, n. August 2018, p. 271–276, 2019. ISSN 09589465. Citado na página 106.

BARBERENA-FERNÁNDEZ, A. M.; CARMONA-QUIROGA, P. M.; BLANCO-VARELA, M. T. Interaction of TEOS with cementitious materials: Chemical and physical effects. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 145–152, 2015. ISSN 0958-9465. Citado 2 vezes nas páginas 104 e 119.

BASHEER, P. A. M.; LONG, A. E. Protective qualities of surface treatments for concrete. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings**, v. 122, n. 3, p. 339–346, 1997. Citado 4 vezes nas páginas 36, 37, 38 e 130.

BATTAGIN, A.; SILVEIRA, A. L.; MUNHOZ, F.; BATTAGIN, I. A evolução da cultura da prevenção da reação álcali-agregado no mercado nacional. **Concreto & Construções. Instituto Brasileiro de Concreto.**, v. 83, p. 39–43, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

BAZANT, Z. P.; STEFFENS, A. Mathematical model for kinetics of alkali–silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 3, p. 419–428, 2000. ISSN 0008-8846. Citado 3 vezes nas páginas 30, 47 e 142.

BENTUR, A.; DIAMOND, S.; BERKE, N. S. **Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice.** 1. ed. [S.l.]: E and FN SPON, 1997. 208 p. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the filler effect on the nucleation and

growth of C-S-H. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, n. 12, p. 3764–3773, 2014. ISSN 15512916. Citado na página 32.

BÉRUBÉ, M.A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali–silica reactivity. **Cement and Concrete Research**, n. 32, p. 1215–1227, 2002. Citado na página 30.

BÉRUBÉ, M. A.; FOURNIER, B. Canadian experience with testing for alkali-aggregatereactivity in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 15, n. 1-2, p. 27–47, 1993. ISSN 09589465. Citado na página 33.

BÉRUBÉ, M. A.; SMAOUI, N.; FOURNIER, B.; BISSONNETTE, B.; DURAND, B. Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction. Part III: Application to existing structures. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 32, n. 3, p. 463–479, 2005. ISSN 03151468. Citado na página 73.

BÉRUBÉ, M.A. A.; CHOUINARD, D.; PIGEON, M.; FRENETTE, J.; RIVEST, M.; VEZINA, D.; BÉRUBÉ, M.-A. A.; CHOUINARD, D.; PIGEON, M.; FRENETTE, J.; RIVEST, M.; VÉZINA, D. Effectiveness of sealers in counteracting alkali-silica reaction in highway median barriers exposed to wetting and drying, freezing and thawing, and deicing salt. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 29, n. 2, p. 329–337, 2002. ISSN 0315-1468. Citado 5 vezes nas páginas 24, 25, 39, 104 e 130.

BÉRUBÉ, M.A. A.; CHOUINARD, D.; PIGEON, M.; FRENETTE, J.; BOISVERT, L.; RIVEST, M.; BÉRUBÉ, M.-A. A.; CHOUINARD, D.; PIGEON, M.; FRENETTE, J.; BOIS-VERT, L.; RIVEST, M. Effectiveness of sealers in counteracting alkali-silica reaction in plain and air-entrained laboratory concretes exposed to wetting and drying, freezing and thawing, and salt water. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 29, n. 2, p. 289–300, 2002. ISSN 0315-1468. Citado 5 vezes nas páginas 25, 39, 104, 127, 130.

BINAL, A. The Pessimum Ratio and Aggregate Size Effects on Alkali Silica Reaction. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 15, p. 725–731, 2015. ISSN 1878-5220. Citado na página 30.

BISSONNETTE, B.; COURARD, L.; GARBACZ, A. **Concrete surface engineering**. 2015. 1–244 p. ISBN 9781498704892. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 38.

BODDY, A. M.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 8, p. 1263–1268, 2003. ISSN 00088846. Citado na página 32.

BOUZABATA, H.; MULTON, S.; SELIER, A.; HOUARI, H. Swellings due to alkali-silica reaction and delayed ettringite formation: Characterisation of expansion isotropy and effect of moisture conditions. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier Ltd, v. 34, n. 3, p. 349–356, 2012. ISSN 09589465. Citado na página 33.

CAI, Y.; HOU, P.; DUAN, C.; ZHANG, R.; ZHOU, Z.; CHENG, X.; SHAH, S. The use of tetraethyl orthosilicate silane (TEOS) for surface-treatment of hardened cement-based materials: A comparison study with normal treatment agents. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 144–151, 2016. ISSN 0950-0618.

Citado 8 vezes nas páginas 24, 104, 107, 111, 117, 125, 127 e 128.

CAMPOS, A. P. **Matriz cimentícia contendo sílica de casca de arroz e hidróxido de cálcio: Microestrutura, carbonatação e corrosão**. 1–152 p. Tese (Doutorado) —Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2020. Citado na página 117.

CAPRARO, A. P. B. **Mudanças nas propriedades microestruturais e mecânicas de pastas e argamassas dosadas com diferentes teores de contaminação por sulfetos**. 0–177 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Citado na página 74 e 117.

CARNEIRO, A. F.; DASCHEVI, P. A.; LANGARO, E. A.; PIERALISI, R.; MEDEIROS, M. H. Effectiveness of surface coatings in concrete: chloride penetration and carbonation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, Springer Science and Business Media B.V., v. 6, n. 1, 12 2021. ISSN 23653167. Citado na página 36.

CHEN, H.; GUO, Z.; HOU, P.; FU, X.; QU, Y.; LI, Q.; CHENG, X.; ZHU, X. The influence of surface treatment on the transport properties of hardened calcium sulfoaluminate cement-based materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103784, 2020. ISSN 0958-9465. Citado na página 115.

CHO, M. S.; NOH, J. M.; SONG, Y. C. Evaluation of a penetration-reinforcing agent to prevent the aging of concrete. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 41, n. 8, p. 1127–1134, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 105.

CHRISP, T. M.; WALDRON, P.; WOOD, J. G. Development of a non-destructive test to quantify damage in deteriorated concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 45, n. 165, p. 247–256, 1993. ISSN 1751763X. Citado 5 vezes nas páginas 22, 40, 45, 70 e 94.

COSTA, U.; MANGIALARDI, T.; PAOLINI, A. E. Minimizing alkali leaching in the concrete prism expansion test at 38 °C. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 547– 554, 2017. ISSN 09500618. Citado na página 68.

CUSTÓDIO, J.; RIBEIRO, A. B. Evaluation of damage in concrete from structures affected by internal swelling reactions - A case study. **Procedia Structural Integrity**, Elsevier B.V., v. 17, p. 80–89, 2019. ISSN 24523216. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 73.

DANG, Y.; XIE, N.; KESSEL, A.; MCVEY, E.; PACE, A.; SHI, X. Accelerated laboratory evaluation of surface treatments for protecting concrete bridge decks from salt scaling. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 128–135, 2014. ISSN 0950-0618. Citado 3 vezes nas páginas 24 e 38.

DESCHENES, R.; WAIDNER, M.; MICAH, W.; PHD, H. Mitigation of Alkali-Silica Reaction in Concrete Pavements By Silane Treatment. In: **15th Int. Conf. Alkali-Aggregate React**. São Paulo, 2016. Citado na página 127.

DESCHENES, R. A. **Mitigation and Evaluation of Alkali-Silica Reaction (ASR) and Freezing and Thawing in Concrete Transportation Structures**. 254 p. Tese (Doutorado), 2017. Citado 7 vezes nas páginas 24, 25, 39, 104, 130 e 131.

DESCHENES, R. A.; GIANNINI, E. R.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B.; HALE, W. M. Effects of moisture, temperature, and freezing and thawing on Alkali-Silica reaction. **ACI**

**Materials Journal**, v. 115, n. 4, p. 575–584, 2018. ISSN 0889325X. Citado na página 35.

DESCHENES, R. A.; MURRAY, C. D.; HALE, W. M. Mitigation of Alkali-Silica Reaction and Freezing and Thawing through Surface Treatment. **ACI Materials Journal**, v. 114, n. 2, 2017. ISSN 0889-325X. Citado 4 vezes nas páginas 24, 127 e 130.

DESCHENES, R. J.; WAIDNER, M.; HALE, M. W. Mitigation of alkali-silica reaction in concrete pavements by silane treatment. In: BERNARDES, H. d. M.; HASPARYK, N. P. (Ed.). **15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction**. São Paulo:[s.n.], 2016. Citado na página 130.

DESCHENES, J.; BÉRUBÉ, M.-A. Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against alkali – silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1057–1063, 2001. Citado na página 70.

DIAB, S. H.; SOLIMAN, A. M.; NOKKEN, M. Exterior strengthening for ASR damaged concrete: A comparative study of carbon and basalt FRP. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117435, 2020. ISSN 0950-0618. Citado na página 73.

DIAB, S. H.; SOLIMAN, A. M.; NOKKEN, M. R. Changes in mechanical properties and durability indices of concrete undergoing ASR expansion. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118951, 2020. ISSN 0950-0618. Citado na página 73.

DIAB, S. H.; SOLIMAN, A. M.; NOKKEN, M. R. Effect of triggering material, size, and casting direction on ASR expansion of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 269, 2 2021. ISSN 09500618. Citado na página 86.

DIAB, S. H.; SOLIMAN, A. M.; NOKKEN, M. R. Feasibility of basalt and glass FRP mesh for strengthening and confinement concrete damage due to ASR-expansion. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 120893, 2021. ISSN 0950-0618. Citado na página 73.

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 5, n. 4, p. 329–345, 1975. ISSN 00088846. Citado na página 28.

DU, H.; TAN, K. H. Effect of particle size on alkali-silica reaction in recycled glass mortars. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 66, p. 275–285, 2014. ISSN 09500618. Citado na página 29.

DUCHESNE, J.; BÉRUBÉ, M. A. Effect of supplementary cementing materials on the composition of cement hydration products. **Advanced Cement Based Materials**, v. 2, n. 2, p. 43–52, 1995. ISSN 10657355. Citado na página 32.

Empresa de Pesquisa Energética - Brasil. **Balço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. 2021. 0–292 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Citado na página 20.

ESPOSITO, R.; HENDRIKS, M. A. Literature review of modelling approaches for ASR in concrete: a new perspective. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, Taylor & Francis, v. 23, n. 11, p. 1311–1331, 2019. ISSN 19648189. Citado 3 vezes nas páginas 47, 48 e 142.

FANIJO, E. O.; KOLAWOLE, J. T.; ALMAKRAB, A. Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00563, 2021. Citado na página 50.

FEITEIRA, J.; RIBEIRO, M. S. Polymer action on alkali-silica reaction in cement mortar. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 44, p. 97–105, 2013. ISSN 00088846. Citado na página 73.

FERRO, I. P.; BRITO, A. J. Reação álcali-agregado: Um breve estudo da ocorrência nos blocos da Ponte Paulo Guerra - Recife/PE. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT**. Belém do Pará: [s.n.], 2016. p. 10. Citado na página 21.

FIGUEIRA, R.; SOUSA, R.; COELHO, L.; AZENHA, M.; ALMEIDA, J. de; JORGE, P.; SILVA, C. Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 222, p. 903–931, 2019. ISSN 09500618. Citado 5 vezes nas páginas 24, 31, 50, 51 e 88.

FORSTER, S. W.; BOONE, R. L.; HAMMER, M. S.; LAMOND, J. F.; LANE, D. S.; MILLER, R. E.; PARKER, S. E.; PERGALSKY, A.; PIERCE, J. S.; ROBERT, M. Q.; SCHMITT, J. W.; TOBIN, R. E.; ACI COMMITTEE 221. **State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity Reported by ACI Committee 221**. [S.l.], 1998. v. 98, n.Reapproved, 1–31 p. Citado na página 28.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M.-A. M.-A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, n. 2, p. 167–191, 2000. ISSN 1208-6029. Citado 6 vezes nas páginas 22, 28, 30, 34, 50 e 142.

FOURNIER, B.; BILODEAU, A.; BOUZOUBAA, N.; NKINAMUBANZI, P. C. Field and laboratory investigations on the use of fly ash and li-based admixtures to prevent ASR in concrete. In: **6th International Conference on Durability of Concrete Structures, ICDCS 2018**. 2018. p. 650–660. ISBN 1849953945. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.

FOURNIER, B.; CHEVRIER, R.; BILODEAU, A.; NKINAMUBANZI, P. C.; NOUZIU- BAA, N. Comparative Field and Laboratory Investigations on the use of Supplementary Cementing Materuals (SCMs) to Control Alkali-Silica Reaction in Concrete. In: **Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)**. Beijing, China: Eds. Tang Mingshu and Deng Min, 2016. v. 1, p. 528–537. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.

FOURNIER, B.; CHEVRIER, R.; GROSBOIS, M.; LISELLA, R.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; SHEHATA, M.; THOMAS, M.; BAXTER, S. The accelerated concrete prism test (60°C): Variability of the teste method and proposed expansion limits. In: **Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in Concrete**. Beijing, China: [s.n.], 2004. Citado na página 66.

FRANZONI, E.; PIGINO, B.; PISTOLESI, C. Ethyl silicate for surface protection of concrete: Performance in comparison with other inorganic surface treatments. **Cement and Concrete Composites**, v. 44, p. 69–76, 2013. ISSN 0958-9465. Citado 4 vezes nas páginas 25, 104, 105 e 106.

FRARE, A.; LANGARO, E. A.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F. Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil. **Revista ALCONPAT**, v. 13, n. 1, p. 1–27, 12 2022. ISSN 2007-6835. Citado na página 21.

GALLO, G.; SANCHEZ, L.; MEDEIROS, M.; ANDRADE, T. Medidas preventivas para a Reação álcali-Agregado (RAA) no concreto. **Concreto & Construção**, v. 46, p. 22–28, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.

GAO, X. X.; CYR, M.; MULTON, S.; SELIER, A. A comparison of methods for chemical assessment of reactive silica in concrete aggregates by selective dissolution. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 82–94, 2013. ISSN 0958-9465. Citado na página 153.

GARCÍA-LODEIRO, I.; ZARZUELA, R.; MOSQUERA, M. J.; BLANCO-VARELA, M. T. Consolidation of artificial decayed portland cement mortars with an alkoxy silane-based impregnation treatment and its influence on mineralogy and pore structure. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 304, p. 124532, 2021. ISSN 09500618. Citado na página 106.

GAUTAM, B. P.; PANESAR, D. K. The effect of elevated conditioning temperature on the ASR expansion, cracking and properties of reactive Spratt aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 140, p. 310–320, 2017. ISSN 0950-0618. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 40 e 73.

GAUTAM, B. P.; PANESAR, D. K. Multiaxial restraint of steel fibres in ASR-affected fibre reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 54, n. 3, 2021. Citado na página 73.

GAUTAM, B. P.; PANESAR, D. K.; SHEIKH, S. A.; VECCHIO, F. J. Effect of coarse aggregate grading on the ASR expansion and damage of concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 95, p. 75–83, 2017. ISSN 0008-8846. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 40 e 73.

GAUTAM, B. P.; PANESAR, D. K.; SHEIKH, S. A.; VECCHIO, F. J. Effect of multiaxial stresses on alkali-silica reaction damage of concrete. **ACI Materials Journal**, v. 114, n. 4, p. 595–604, 2017. ISSN 0889325X. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 40 e 73.

GIANNINI, E. R.; SANCHEZ, L. F.; TUINUKUAFE, A.; FOLLIARD, K. J. Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 162, p. 253–264, 2018. ISSN 09500618. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 73.

GILLOTT, J. E. Alkali-aggregate reactions in concrete. **Engineering Geology**, v. 9, n. 4, p. 303–326, 1975. ISSN 0013-7952. Citado na página 28.

GLASSER, L. D.; KATAOKA, N. The chemistry of ‘alkali-aggregate’ reaction. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, v. 11, n. 1, p. 1–9, 1 1981. ISSN 0008-8846. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 143.

GODART, B.; WOOD, J. G. Appraising structures affected by the alkali-aggregate reaction. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials**, v. 169, n. 3, p. 162–171, 2016. ISSN 17476518. Citado na página 73.

GOLMAKANI, F.; HOOTON, R. Comparison of laboratory performance tests used to assess alkali-silica reactivity. **Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering**, v. 2, p. 1–7, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 22, 49, 50 e 63.

GONZÁLEZ-CONEO, J.; ZARZUELA, R.; ELHADDAD, F.; CARRASCOSA, L. M.; GIL, M. L. A.; MOSQUERA, M. J. Alkylsiloxane/alkoxysilane sols as hydrophobic treatments for concrete: A comparative study of bulk vs surface application. **Journal of Building Engineering**, v. 46, p. 103729, 2022. ISSN 2352-7102. Citado na página 106.

GRATTAN-BELLEW, P. E. Laboratory Evaluation of Alkali-Silica Reaction in Concrete from Saunders Generating Station. **ACI Materials Journal**, v. 92, n. 2, p. 126–133, 1995. Citado 4 vezes nas páginas 22, 40, 41 e 73.

GRAZIA, M. T. D.; GOSHAYESHI, N.; GORGA, R.; SANCHEZ, L. F.; SANTOS, A. C.; SOUZA, D. J. Comprehensive semi-empirical approach to describe alkali aggregate reaction (AAR) induced expansion in the laboratory. **Journal of Building Engineering**, Elsevier Ltd, v. 40, 8 2021. ISSN 23527102. Citado 12 vezes nas páginas 47, 142, 143, 144, 145, 146, 148, 149, 151, 152, 153 e 160.

GUO, Z.; HOU, P.; HUANG, S.; XIE, N.; CHENG, X.; SINGH, L. P.; VALERIYA, S.; VIKTORIYA, N. Surface Treatment of concrete with tetraethyl orthosilicate, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> and Silane: Comparison of their effects on durability. **Ceramics-Silikáty**, v. 62, n. 4, p. 332–341, 2018. ISSN 0862-5468. Citado 6 vezes nas páginas 24, 25, 104, 105, 111 e 124.

HASPARYK, N. P. **Investigação De Concretos Afetados Pela Reação Álcali-Agregado E Caracterização Avançada Do Gel Exsudado**. 326 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. Citado na página 21.

HASPARYK, N. P.; SANCHEZ, L. **SDT-Método de Ensaio para a Determinação do Índice de Dano de Rigidez (SDI) e Índice de Deformação Plástica (PDI) em Concretos - Instrução Técnica ITDSBE0011**. Goiânia, 2021. Citado na página 41.

HASPARYK, N. P. Reação Álcali-Agregado no Concreto. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. vol. 2. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2022. Citado na página 21 e 63.

HERGRAND do Brasil LTDA. Catálogo dos produtos Siliethyl TS28 e Siliethyl TS40. 2019. 4 p. Citado na página 107.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 1–318 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Citado na página 88.

HOPPE FILHO, J.; GARCEZ, M. R.; MEDEIROS, M. H.; FILHO, L. C. S.; ISAIA, G. C. Reactivity assessment of residual rice-husk ashes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 1–7, 2017. ISSN 08991561. Citado na página 32.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; TANAKA, R. S.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento portland (Parte ii): índice de atividade pozolânica com cimento portland (IAP), difração de raios-x (DRX) e termo-gravimetria (TG/DTG). **Revista Materia**, v. 22, n. 3, 2017. ISSN 15177076. Citado na página 32.

HOPPE FILHO, J.; RODRIGUES, C. S.; RIBEIRO, L. S.; MEDEIROS, M. H. Evaluation of sample drying methods to determine the apparent porosity and estimation of degree of hydration of portland cement pastes. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, Springer Science and Business Media B.V., v. 6, n. 1, 12 2021. ISSN 23653167. Citado na página 109.

HOU, P.; CHENG, X.; QIAN, J.; SHAH, S. P. Effects and mechanisms of surface treatment of hardened cement-based materials with colloidal nanoSiO<sub>2</sub> and its precursor. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 53, p. 66–73, 2014. ISSN 09500618. Citado 2 vezes nas páginas 106 e 111.

HOU, P.; CHENG, X.; QIAN, J.; ZHANG, R.; CAO, W.; SHAH, S. P. Characteristics of surface-treatment of nano-SiO<sub>2</sub> on the transport properties of hardened cement pastes with different water-to-cement ratios. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier Ltd, v. 55, p. 26–33, 2015. ISSN 09589465. Citado na página 106.

HOU, P.; ZHANG, R.; CAI, Y.; CHENG, X.; SHAH, S. P. In situ Ca(OH)<sub>2</sub> consumption of TEOS on the surface of hardened cement-based materials and its improving effects on the Ca-leaching and sulfate-attack resistivity. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 890–896, 2016. ISSN 0950-0618. Citado 6 vezes nas páginas 24, 25, 104, 105, 108 e 111.

HOVER, K. C. The influence of water on the performance of concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 25, n. 7, p. 3003–3013, 2011. ISSN 09500618. Citado na página 34.

HUET, B.; L'HOSTIS, V.; MISERQUE, F.; IDRISSE, H. Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution. **Electrochimica Acta**, v. 51, n. 1, p. 172–180, 2005. ISSN 00134686. Citado na página 28.

IBRAM. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 2012. Citado na página 20.

IBRAM. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015**. 2015. Citado na página 20.

IBRAM. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2020**. 2020. Citado na página 20.

JAROONVECHATAM, N.; MEESAK, T.; SUJJAVANICH, S.; JONGPRATEEP, O. Fabrication of highly porous mortar to alleviate failure caused by alkali-silica reaction (ASR). **Materiaux et Techniques**, v. 105, n. 2, 2017. ISSN 17783771. Citado na página 34.

JENSEN, A. D.; CHATTERJI, S.; CHRISTENSEN, P.; THAULOW, N. Studies of alkali-silica reaction - Part II. Effect of air-entrainment on expansion. **Cement and Concrete Composites**, v. 14, p. 311–314, 1984. Citado na página 34.

JOHN, D. A. S.; POOLE, A. W.; SIMS, I. **Concrete petrography - A handbook of investigate techniques**. 2. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2012. 480 p. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 143.

JUENGER, M. C.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and**

**Concrete Research**, Elsevier, v. 122, n. May, p. 257–273, 2019. ISSN 00088846. Citado na página 23.

KAPETANAKI, K.; VAZGIOURAKI, E.; STEFANAKIS, D.; FOTIOU, A.; ANYFANTIS, G. C.; GARCÍA-LODEIRO, I.; BLANCO-VARELA, M. T.; ARABATZIS, I.; MARAVELAKI, P. N. TEOS Modified With Nano-Calcium Oxalate and PDMS to Protect Concrete Based Cultural Heritage Buildings. **Frontiers in Materials**, v. 7, 2020. Citado na página 106.

KAWABATA, Y.; YAMADA, K. Evaluation of Alkalinity of Pore Solution Based on the Phase Composition of Cement Hydrates with Supplementary Cementitious Materials and its Relation to Suppressing ASR Expansion. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 13, n. 11, p. 538–553, 2015. ISSN 1346-8014. Citado 2 vezes nas páginas 86 e 88.

KONG, X. M.; LIU, H.; LU, Z. B.; WANG, D. M. The influence of silanes on hydration and strength development of cementitious systems. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 67, p. 168–178, 2015. ISSN 00088846. Citado na página 106.

KONGSHAUG, S. S.; OSELAND, O.; KANSTAD, T.; HENDRIKS, M. A. N.; RODUM, E.; MARKESET, G. Experimental investigation of ASR-affected concrete — The influence of uniaxial loading on the evolution of mechanical properties, expansion and damage indices. **Construction and Building Materials**, v. 245, p. 118384, 2020. ISSN 0950-0618. Citado na página 73.

KURODA, M.; WATANABE, T.; TERASHI, N. Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 2, p. 253–258, 2000. ISSN 00088846. Citado na página 33.

LARIVE, C. **Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques**. 1–336 p. Tese (Doutorado) — École Nationale des Ponts et Chaussées, Français, 1997. Citado 4 vezes nas páginas 47, 48, 143 e 144.

LEÃO, S. L. A. **Utilização da lignina alcalina como aditivo em pastas de cimento Portland classe G e sua influência no processo de carbonatação**. 1–107 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio grande do Norte, 2019. Citado na página 117.

LEEMANN, A.; SAOUT, G. L.; WINNEFELD, F.; RENTSCH, D.; LOTHENBACH, B. Alkali-Silica reaction: The Influence of calcium on silica dissolution and the formation of reaction products. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 94, n. 4, p. 1243–1249, 2011. ISSN 00027820. Citado na página 31.

LI, T.; WU, Y. Effect of surface treatment materials on frost resistance of damaged concrete. In: **Journal of Physics: Conference Series**. 2022. v. 2195, n. 1. Citado na página 130.

LI, T.; WU, Y.; WU, H. A Study on Impact of Different Surface Treatment Agents on the Durability of Airport Pavement Concrete. **Coatings**, v. 12, n. 2, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 105.

LINDGÅRD, J.; ANDIÇ-ÇAKIR, O.; FERNANDES, I.; RØNNING, T. F.; THOMAS, M. D. A. Alkali-silica reactions(ASR): Literature review on parameters influencing laboratory

performance testing. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 2, p. 223–243, 2012. ISSN 00088846. Citado na página 88.

LINDGÅRD, J.; THOMAS, M. D. A.; SELLEVOLD, E. J.; PEDERSEN, B.; ANDIÇ-ÇAKIR, O.; JUSTNES, H.; RØNNING, T. F. Alkali–silica reaction (ASR)—performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 53, p. 68–90, 2013. ISSN 0008-8846. Citado na página 68.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011. ISSN 00088846. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 70.

LUTE, R. D.; FOLLIARD, K. J.; DRIMALAS, T.; RUST, C. K. Coatings and sealers for mitigation of alkali-silica reaction and /or delayed ettringite formation. In: BERNARDES, H. d. M.; HASPARYK, N. P. (Ed.). **15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction**. São Paulo: [s.n.], 2016. Citado na página 130.

MALVAR, L. J.; LENKE, L. R. Efficiency of fly ash in mitigating alkali-silica reaction based on chemical composition. **ACI Materials Journal**, v. 103, n. 5, p. 319–326, 2006. ISSN 0889325X. Citado 3 vezes nas páginas 25, 33 e 70.

MARQUES, M. **Estudo da reação álcali-agregado na tomada d'água da UHE Jaguari por meio de ensaios laboratoriais**. 156 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira., 2009. Citado na página 21.

MARTIN, R. P.; SANCHEZ, L.; FOURNIER, B.; TOUTLEMONDE, F. Evaluation of different techniques for the diagnosis & prognosis of Internal Swelling Reaction (ISR) mechanisms in concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 156, p. 956–964, 2017. ISSN 09500618. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 40 e 73.

MARZOUK, H.; LANGDON, S. The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4, p. 549–556, 2003. ISSN 0958-9465. Citado na página 30.

MEDEIROS, M.; HELENE, P. Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 41, n. 1, p. 59–71, 1 2008. ISSN 13595997. Citado na página 36.

MEDEIROS, M. H.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 23, n. 3, p. 1476–1484, 2009. ISSN 09500618. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 125.

MEDEIROS, M. H. F.; CASTRO-BORGES, P.; ALEIXO, D. M.; QUARCIONI, V. A.; MARCONDES, C. G. N.; HELENE, P. Reducing Water and Chloride Penetration Through Silicate Treatments for Concrete as a Mean to Control Corrosion Kinetics. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 7, n. 10, p. 9682–9696, 2012. ISSN 1452-3981. Citado 6 vezes nas páginas 24, 36, 38, 39 e 104.

MEDEIROS, M. H. F. d. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 140 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado na página 36.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Durabilidade e proteção do concreto armado.

**Revista Técnica**, p. 1–8, 2009. Citado na página 36.

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, Springer International Publishing, v. 2, n. 1, p. 1–9, 2017. ISSN 2365-3159. Citado na página 32.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 4. ed., McGraw-Hill Education, 2014. 675 p. Citado 4 vezes nas páginas 34, 115, 117 e 136.

MENÉNDEZ, E.; SANJUÁN, M.; GARCÍA-ROVES, R.; ARGIZ, C.; RECINO, H. Sustainable and durable performance of pozzolanic additions to prevent alkali-silica reaction (ASR) promoted by aggregates with different reaction rates. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 24, p. 1–24, 2020. ISSN 20763417. Citado na página 88.

MENÉNDEZ, E.; SANJUÁN, M.; GARCÍA-ROVES, R.; ARGIZ, C.; RECINO, H. Durability of blended cements made with reactive aggregates. **Materials**, MDPI AG, The Eduardo Torroja Institute for Construction Science (Spanish National Research Council, CSIC), C/Serrano Galvache, 4, Madrid, 28033, Spain, v. 14, n. 11, 2021. ISSN 19961944 (ISSN). Citado 2 vezes nas páginas 87 e 88.

MOHAMMADI, A.; GHIASVAND, E.; NILI, M. Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 119567, 2020. ISSN 0950-0618. Citado na página 73.

MOSER, R. D.; JAYAPALAN, A. R.; GARAS, V. Y.; KURTIS, K. E. Assessment of binary and ternary blends of metakaolin and Class C fly ash for alkali-silica reaction mitigation in concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 40, n. 12, p. 1664–1672, 2010. ISSN 00088846. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 70.

MULTON, S.; SELIER, A.; CYR, M. Chemo-mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 39, n. 6, p. 490–500, 2009. ISSN 00088846. Citado na página 142.

MULTON, S.; TOUTLEMONDE, F. Effect of moisture conditions and transfers on alkali silica reaction damaged structures. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 40, n. 6, p. 924–934, 2010. ISSN 00088846. Citado na página 35.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2. ed., 2010. v. 2. 442 p. ISSN 15401413. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

NGUYEN, T. N.; SANCHEZ, L. F.; LI, J.; FOURNIER, B.; SIRIVIVATNANON, V. Correlating alkali-silica reaction (ASR) induced expansion from short-term laboratory testings to long-term field performance: A semi-empirical model. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier Ltd, v. 134, 11 2022. ISSN 09589465. Citado 4 vezes nas páginas 47, 48, 142 e 148.

NOËL, M.; SANCHEZ, L.; TAWIL, D. Structural implications of internal swelling reactions in concrete: Review and research needs. **Magazine of Concrete Research**, v. 70, n. 20, p. 1052–1063, 2018. ISSN 1751763X. Citado na página 73.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed

methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 2015. ISSN 15882861. Citado na página 71.

PAN, J. W.; FENG, Y. T.; WANG, J. T.; SUN, Q. C.; ZHANG, C. H.; OWEN, D. R. Modeling of alkali-silica reaction in concrete: A review. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1–18, 2012. ISSN 20952430. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 142.

PAN, X.; SHI, Z.; SHI, C.; LING, T. C.; LI, N. A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 132, p. 578–590, 2017. ISSN 09500618. Citado 3 vezes nas páginas 36, 125 e 130.

PAN, X.; SHI, Z.; SHI, C.; LING, T. C.; LI, N. A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 133, p. 81–90, 2017. ISSN 09500618. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 125.

PENTTALA, V. **Causes and mechanisms of deterioration in reinforced concrete**. [S.l.]: Woodhead Publishing Limited, 2009. 3–31 p. ISBN 9781845694081. Citado na página 33.

PIGINO, B.; LEEMANN, A.; FRANZONI, E.; LURA, P. Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part II: Characteristics and performance. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 3, p. 313–321, 2012. ISSN 0958-9465. Citado 5 vezes nas páginas 24, 25, 104, 105 e 108

POYET, S.; SELLIER, A.; CAPRA, B.; FORAY, G.; TORRENTI, J. M.; COGNON, H.; BOURDAROT, E. Chemical modelling of Alkali Silica reaction: Influence of the reactive aggregate size distribution. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 40, n. 2, p. 229–239, 2007. ISSN 13595997. Citado na página 142.

RAJABIPOUR, F.; GIANNINI, E.; DUNANT, C.; IDEKER, J. H.; THOMAS, M. D. A. Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 76, p. 130–146, 2015. ISSN 0008-8846. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 47.

RASHIDI, M.; KNAPP, M. C. L.; HASHEMI, A.; KIM, J.-Y. Y.; DONNELL, K. M.; ZOUGHI, R.; JACOBS, L. J.; KURTIS, K. E. Detecting alkali-silica reaction: A multi-physics approach. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier Ltd, v. 73, p. 123–135, 2016. ISSN 0958-9465. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 40 e 73.

RAUPACH, M.; BUETTNER, T. Hydrophobic treatments on concrete - Evaluation of the durability and non-destructive testing. In: **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II - Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2009**. London: Taylor & Francis Group, 2009. p. 333–334. ISBN 978-0-415-46850-3. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 104.

RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; FIGUEIREDO, E. P.; HASPARYK, N. P.; BORGES, L. D. Effect of Particle Size of Residual Rice-Husk Ash in Consumption of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, p. 1–9, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

RIVARD, P.; BALLIVY, G. Assessment of the expansion related to alkali-silica reaction by the Damage Rating Index method. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 2, p. 83–90, 2005. ISSN 0950-0618. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 40 e 73.

RIVARD, P.; BÉRUBÉ, M.-A.; OLLIVIER, J.-P.; BALLIVY, G. Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali–aggregate reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 8, p. 1147–1153, 2003. ISSN 0008-8846. Citado na página 68.

RIVARD, P.; FOURNIER, B.; BALLIVY, G. Quantitative petrographic technique for concrete damage due to ASR: Experimental and application. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 22, n. 1, p. 63–72, 2000. ISSN 01496123. Citado na página 73.

RIVARD, P.; FOURNIER, B.; BALLIVY, G. The damage rating index method for ASR affected concrete - A critical review of petrographic features of deterioration and evaluation criteria. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 24, n. 2, p. 81–91, 2002. ISSN 01496123. Citado na página 73.

RODRIGUE, A.; DUCHESNE, J.; FOURNIER, B.; CHAMPAGNE, M.; BISSONNETTE, B. Alkali-silica reaction in alkali-activated combined slag and fly ash concretes: The tempering effect of fly ash on expansion and cracking. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118968, 2020. ISSN 0950-0618. Citado na página 73.

RUA, C. M. S.; HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M.; MOLIN, D. D.; EIGER, L. Study of silane compositions to mitigate alkali-silica reaction. In: **15th Int. Conf. Alkali-Aggregate React.** São Paulo, 2016. Citado na página 130.

SAHA, A. K.; KHAN, M. N.; SARKER, P. K.; SHAIKH, F. A.; PRAMANIK, A. The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 171, p. 743–758, 2018. ISSN 09500618. Citado 8 vezes nas páginas 23, 25, 33, 70, 75, 78, 88 e 102.

ŞAHMARAN, M.; KESKIN, S. B.; OZERKAN, G.; YAMAN, I. O. Self-healing of mechanically-loaded self-consolidating concretes with high volumes of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 872–879, 11 2008. ISSN 09589465. Citado na página 94.

SANCHEZ, L.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B. Assessing condition of concrete affected by internal swelling reactions (ISR) through the Damage Rating Index (DRI). **Cement**, v. 1-2, p. 100001, 6 2020. ISSN 26665492. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.

SANCHEZ, L.; KUPERMAN, S. C.; HELENE, P. Uso do método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT) para avaliação da reação álcali-agregado (RAA). **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais (RIEM)**, v. 4, n. 4, p. 575–581, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 27, 52, 57, 61 e 64.

SANCHEZ, L.; KUPERMAN, S. C.; HELENE, P.; PECCHIO, M.; MUNHOZ, F.; KIHARA, Y. Reação Álcali-agregado: Análise comparativa entre o método acelerado de barras de argamassa (AMBT) e o método acelerado de prismas de concreto (ACPT). In: **Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2007. Citado na

página 63.

SANCHEZ, L. F. **Contribuição Ao Estudo Dos Métodos De Ensaio Na Avaliação Das Reações Álcali-Agregado Em Concretos**. 170 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 27, 52, 57, 64 e 146.

SANCHEZ, L. F. **Contribution to the assessment of damage in aging concrete infrastructures affected by alkali-aggregate reaction**. 377 p. Tese (Doutorado) — Université Laval, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 41, 42, 82, 89, 92 e 94.

SANCHEZ, L. F.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. Comprehensive damage assessment in concrete affected by different internal swelling reaction (ISR) mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 107, n. September 2017, p. 284–303, 2018. ISSN 00088846. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 73.

SANCHEZ, L. F.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; DUCHESNE, J. Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 67, p. 74–92, 2015. ISSN 00088846. Citado 11 vezes nas páginas 29, 42, 43, 44, 70, 73, 83, 98, 99, 138 e 139.

SANCHEZ, L. F.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 93, p. 17–31, 2017. ISSN 00088846. Citado 19 vezes nas páginas s 22, 23, 40, 43, 45, 46, 70, 73, 81, 92, 96, 98, 99, 133, 135, 138, 139, 145 e 146.

SANCHEZ, L. F.; MULTON, S.; SELIER, A.; CYR, M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M. Comparative study of a chemo-mechanical modeling for alkali silica reaction (ASR) with experimental evidences. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 72, p.301–315, 2014. ISSN 09500618. Citado 8 vezes nas páginas 22, 23, 40, 45, 68, 70, 73 e 81.

SANCHEZ, L. F. M.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B. Assessing condition of concrete affected by internal swelling reactions (ISR) through the Damage Rating Index (DRI). **Cement**, v. 1-2, p. 100001, 2020. ISSN 2666-5492. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 73.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J. Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkali-silica reaction (ASR): Input parameters and variability of the test responses. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 77, p. 20–32, 2015. ISSN 0950-0618. Citado 5 vezes nas páginas 45, 70, 73, 81 e 89.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D. Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 125, p. 1178–1188, 2016. ISSN 09500618. Citado 8 vezes nas páginas 22, 23, 40, 46, 70, 73, 92 e 133.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BEDOYA, M. A. B.; BASTIEN, J.; DUCHESNE, J. Use of Damage Rating Index to quantify alkali-silica reaction damage in concrete: Fine versus coarse aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 113,

n. 4, p. 395–407, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 44, 73, 92, 99, 133 e 139.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D. Tools for assessing damage in concrete affected by AAR coming from fine and coarse aggregates Técnicas para a avaliação da deterioração proveniente. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 10, n. 1, p. 84–91, 2017. Citado 8 vezes nas páginas 22, 23, 40, 43, 45, 46, 73 e 92.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. Condition assessment of an ASR-affected overpass after nearly 50 years in service. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 236, p. 117554, 2020. ISSN 0950-0618. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 73.

SANDROLINI, F.; FRANZONI, E.; PIGINO, B. Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part I: Pozzolanic effect of ethyl silicate. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 3, p. 306–312, 2012. ISSN 0958-9465. Citado 5 vezes nas páginas 104, 106, 114, 119 e 121.

SATO, F. H. **Monitoramento de umidade em concreto de barragem de usina hidroelétrica para estudo de reação álcali-agregado e utilização de correlação de imagens digitais**. 116 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira., 2017. Citado na página 21.

SCRIVENER, K. L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: Understanding and quantification. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 8, p.935–945, 11 2004. ISSN 09589465. Citado na página 117.

SHAFATIAN, S. M. H.; AKHAVAN, A.; MARAGHECHI, H.; RAJABIPOUR, F. How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)? **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 143–153, 2013. ISSN 0958-9465. Citado 7 vezes nas páginas 25, 70, 75, 78, 86, 88 e 102.

SHEHATA, M. H.; JAGDAT, S.; ROGERS, C.; LACHEMI, M. Long-Term effects of different cementing blends on alkali-carbonate reaction. **ACI Materials Journal**, v. 114, n. 4, p.661–672, 2017. ISSN 0889-325X. Citado na página 78.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali–silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 7, p. 1063–1072, 2000. ISSN 0008-8846. Citado 5 vezes nas páginas 25, 32, 33, 70 e 78.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali–silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 3, p. 341–349, 2002. ISSN 0008-8846. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 102.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. The role of alkali content of Portland cement on the expansion of concrete prisms containing reactive aggregates and supplementary cementing materials. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 569–574, 2010. ISSN 0008-8846. Citado na página 31.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A.; BLESZYNSKI, R. F. The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, v. 29, n. 12, p. 1915–1920, 12 1999. ISSN 0008-8846. Citado na página 33.

SHON, C. S. C.-S.; ZOLLINGER, D. G.; SARKAR, S. L. Evaluation of modified ASTM C 1260 accelerated mortar bar test for alkali-silica reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1981–1987, 2002. ISSN 00088846. Citado na página 52.

SILVA, F. A. N.; DELGADO, J.; AZEVEDO, A. C.; MAHFOUD, T.; KHELIDJ, A.; NAS-CIMENTO, N.; LIMA, A. G. B. Diagnosis and assessment of deep pile cap foundation of a tall building affected by internal expansion reactions. **Buildings**, v. 11, n. 3, 2021. Citado na página 21.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso/CHESF. Influência da reação nas propriedades do concreto**. 220 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007. Citado na página 21.

SINNO, N.; PIERSANTI, M.; SHEHATA, M. H. Assessing residual expansion of alkali-silica reaction-affected structures. **ACI Materials Journal**, v. 118, n. 2, p. 139–148, 2021. Citado na página 73.

SINNO, N.; SHEHATA, M. H. Effect of sample geometry and aggregate type on expansion due to alkali-silica reaction. **Construction and Building Materials**, v. 209, p.738–747, 2019. ISSN 0950-0618. Citado 4 vezes nas páginas 86, 147, 153 e 154.

SMAOUI, N.; BÉRUBÉ, M. A.; FOURNIER, B.; BISSONNETTE, B.; DURAND, B. Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction. Part I: Experimental study. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 31, n. 5, p. 826–845, 2004. ISSN 03151468. Citado 8 vezes nas páginas 22, 23, 40, 43, 45, 70, 73 e 94.

SMAOUI, N.; FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M.-A. A.; BISSONNETTE, B.; DURAND, B. Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction. Part II: Application to nonreinforced concrete specimens exposed outside. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 31, n. 6, p. 997–1011, 2004. ISSN 03151468. Citado na página 73.

SOUZA, D. J. D. **Avoiding & Mitigating alkali-aggregate reaction (AAR) in concrete structures**. 307 p. Tese (Doutorado) — University of Ottawa, Ottawa, Canadá, 2022. Citado 5 vezes nas páginas 72, 96, 99, 127 e 135.

SOUZA, D. J. D.; ANTUNES, L. R.; SANCHEZ, L. F. M. The evaluation of Wood Ash as a potential preventive measure against alkali-silica reaction induced expansion and deterioration. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 358, n. August 2021, p.131984, 2022. ISSN 0959-6526. Citado 4 vezes nas páginas 40, 70, 72 e 73.

SOUZA, D. J. D.; SANCHEZ, L. F.; GRAZIA, M. T. D. Evaluation of a direct shear test setup to quantify AAR-induced expansion and damage in concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 229, p. 116806, 2019. ISSN 09500618. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 40 e 73.

STROW, M.; BEVINGTON, P.; BENTIVEGNA, A.; BAKHTIARI, S.; ARANSON, I.; OZE-VIN, D.; HEIFETZ, A. Monitoring accelerated alkali-silica reaction in concrete prisms with petrography and electrical conductivity measurements. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 55, n. 4, 2022. Citado na página 73.

SULEIMAN, A. R.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Effect of surface treatment on

durability of concrete exposed to physical sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 674–681, 2014. ISSN 0950-0618. Citado 4 vezes nas páginas 24, 38 e 104.

SWENSON, E. G.; GILLOTT, J. E. Alkali-Carbonate Rock Reaction. **Highway Research Record**, v. 45, n. 45, p. 21–40, 1964. Citado na página 31.

SZELES, T.; WRIGHT, J.; RAJABIPOUR, F.; STOFFELS, S. Mitigation of alkali-silica reaction by hydrated alumina. **Transportation Research Record**, n. 2629, p. 15–23, 2017. ISSN 0361-1981. Citado na página 88.

TAYFUR, S.; YÜKSEL, C.; ALVER, N.; AKAR, O.; ANDIÇ-ÇAKIR, Evaluation of alkali-silica reaction damage in concrete by using acoustic emission signal features and damage rating index: damage monitoring on concrete prisms. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 54, n. 4, 2021. Citado na página 73.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed.: THOMAS TELFORD PUBLISHING, 1997. 459 p. Citado 3 vezes nas páginas 29, 33 e 143.

TERMKHAJORNKIT, P.; NAWA, T.; YAMASHIRO, Y.; SAITO, T. Self-healing ability of fly ash-cement systems. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 3, p. 195–203, 2009. ISSN 09589465. Citado 2 vezes nas páginas 94 e 95.

THOMAS, M. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. **Cement and Concrete Research**, Elsevier Ltd, v. 41, n. 12, p. 1224–1231, 2011. ISSN 00088846. Citado 5 vezes nas páginas 30, 32, 33, 70 e 88.

THOMAS, M.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; SHEHATA, M. Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 10, p. 1842–1856, 2006. ISSN00088846. Citado 4 vezes nas páginas 22, 50, 52 e 63.

TITTELBOOM, K. V.; BELIE, N. D. Self-healing in cementitious materials-a review. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 2013. ISSN 19961944. Citado na página 94.

TITTELBOOM, K. V.; GRUYAERT, E.; RAHIER, H.; BELIE, N. D. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 349–359, 2012. ISSN 09500618. Citado na página 94.

TOSUN, K.; FELEKOĞLU, B.; BARADAN, B. The effect of cement alkali content on ASR susceptibility of mortars incorporating admixtures. **Building and Environment**, v. 42, n. 9, p. 3444–3453, 2007. ISSN 03601323. Citado na página 31.

TROTTIER, C.; ZAHEDI, A.; ZIAPOUR, R.; SANCHEZ, L.; LOCATI, F. Microscopic assessment of recycled concrete aggregate (RCA) mixtures affected by alkali-silica reaction (ASR). **Construction and Building Materials**, v. 269, p. 121250, 2021. ISSN0950-0618. Citado na página 73.

TROTTIER, C.; ZIAPOUR, R.; ZAHEDI, A.; SANCHEZ, L.; LOCATI, F. Microscopic characterization of alkali-silica reaction (ASR) affected recycled concrete mixtures induced by reactive coarse and fine aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 144, p. 106426, 2021. ISSN 0008-8846. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 73.

UN Environment; SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 2018. Citado na página 20.

VASCONCELOS, L. **Informativo Econômico - Indústria da Construção Civil (CBIC)**. 2022. Citado na página 20.

VAYGHAN, A. G.; RAJABIPOUR, F.; ARNDT, C. THE INFLUENCE OF ASR GELS COMPOSITION ON THEIR SWELLING PROPERTIES. In: BERNARDES, H. d. M.; HASPARYK, N. P. (Ed.). **15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction**. São Paulo, Brasil, 2016. Citado na página 101.

VILLEMURE, F. A.; Fiset, M.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D.; FOURNIER, B. Behavior of epoxy bonded bars in concrete affected by alkali-silica reaction. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 6, p. 179–191, 2019. ISSN 0889325X. Citado na página 73.

VILLENEUVE, V. **Veronique Villeneuve Determination De L' Endommagement Du Béton Par Méthode Péetrographique**. Tese (Doutorado), 2011. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 70 e 83.

Waidner, M. C. **Identifying Damage, Predicting Expansion, and Determining the Effectiveness of Sealers on Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction and Freeze-Thaw**. 78 p. Tese (Doutorado) — University of Arkansas, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.

WALSH, J. B. The effect of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, n. 2, p. 399–411, 1965. ISSN 0148-0227. Citado na página 40.

WANG, Y.; YU, G.; DENG, M.; TANG, M.; LU, D. The use of thermodynamic analysis in assessing alkali contribution by alkaline minerals in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 353–359, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 34.

YUJIANG, W.; MIN, D.; MINGSHU, T. Alkali release from aggregate and the effect on AAR expansion. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 41, n. 1, p. 159–171, 2008. Citado na página 30.

ZAHEDI, A.; SANCHEZ, L. F. M.; NOËL, M. Appraisal of visual inspection techniques to understand and describe ASR-induced development under distinct confinement conditions. **Construction and Building Materials**, v. 323, p. 126549, 2022. ISSN 0950-0618. Citado na página 73.

ZAHEDI, A.; TROTTIER, C.; SANCHEZ, L.; NOËL, M. Evaluation of the induced mechanical deterioration of alkali-silica reaction affected concrete under distinct confinement conditions through the Stiffness Damage Test. **Cement and Concrete Composites**, v. 126, p. 104343, 2022. ISSN 0958-9465. Citado na página 73.

ZAHEDI, A.; TROTTIER, C.; SANCHEZ, L. F. M.; NOËL, M. Microscopic assessment of ASR-affected concrete under confinement conditions. **Cement and Concrete Research**, v. 145, n. April, p. 106456, 2021. ISSN 0008-8846. Citado na página 73.

ZAHEDI, A.; TROTTIER, C.; SANCHEZ, L. F. M.; NOËL, M. Condition assessment of alkali-silica reaction affected concrete under various confinement conditions incorporating fine and coarse reactive aggregates. **Cement and Concrete Research**,

v. 153, p.106694, 2022. ISSN 0008-8846. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 73.

ZAMBOTTO, D. **Estudo preliminar dos efeitos da reação álcali-agregado das respostas estruturais de pavimentos de concreto**. 114 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014. Citado na página 21.

ZHANG, B.; HE, P.; POON, C. S. Optimizing the use of recycled glass materials in alkali activated cement (AAC) based mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120228, 2020. ISSN 0959-6526. Citado na página 94.

ZHANG, T.; VANDEPERRE, L. J.; CHEESEMAN, C. R. Formation of magnesium silicate hydrate (M-S-H) cement pastes using sodium hexametaphosphate. **Cement and Concrete Research**, v. 65, p. 8–14, 2014. ISSN 0008-8846. Citado na página 94.

ZHU, Y.; ZAHEDI, A.; SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; BEAUCHEMIN, S. Overall assessment of alkali-silica reaction affected recycled concrete aggregate mixtures derived from construction and demolition waste. **Cement and Concrete Research**, v. 142, p. 106350, 2021. ISSN 0008-8846. Citado na página 73.

ZIAPOUR, R.; TROTTIER, C.; ZAHEDI, A.; SANCHEZ, L. F. M. Assessment of effects of ASR-induced cracking on direct shear strength of recycled concrete. **Materiales de Construcción**, v. 72, n. 346, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 73.

## A ANEXO A

### A.1 MÉTODO DE DOSAGEM PARA A DEFINIÇÃO DO TRAÇO DE CONCRETO

O concreto foi dosado seguindo as prescrições da NBR 15577(2018). A norma estabelece alguns requisitos:

- dimensão máxima característica do agregado graúdo: 19 mm;
- módulo de finura do agregado miúdo:  $2,7 \pm 0,2$ ;
- consumo de cimento:  $(420 \pm 10)$  kg/m<sup>3</sup>;
- relação água/cimento ( $a/c$ ): 0,45;
- volume de agregado graúdo, no estado compactado seco, deve ser de  $(70,0 \pm 0,2)\%$  do volume total do concreto.

Com isso adotou-se o método da ABCP/ACI para cálculo do traço, considerando que alguns requisitos já estão fixados, como a relação  $a/c$  (0,45) e o consumo de cimento ( $C_c$ ) (420 Kg/m<sup>3</sup>), requisitos visando a dosagem de um concreto com 35 MPa aos 28 dias.

O consumo de água ( $C_a$ ) por m<sup>3</sup> de concreto foi obtido pela equação A.1:

$$C_a = \frac{a}{c} \cdot C_c \quad (\text{A.1})$$

sendo:

$$C_a = 189 \text{ litros/m}^3$$

Para a dosagem do concreto no capítulo 3 foi utilizada areia normal do IPT para o cálculo. Foram consideradas as porcentagens para cada granulometria da areia com a finalidade de atender ao módulo de finura (MF) definido pela NBR 15577 e também aproximação da areia natural utilizada nos demais capítulos (4 a 6)(Tabela A.1)

TABELA A.1 – Granulometria da areia utilizada

Abertura peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada
4,75	0	0
1,18	25	25
0,6	25	50
0,3	25	75
0,15	25	100

A partir do MF do agregado miúdo (2,5) e da dimensão máxima de agregado graúdo (19 mm) se pode determinar o volume de agregado graúdo seco ( $V_c$ ) por  $m^3$  de concreto, e o qual também deve atender aos requisitos da NBR 15577 já mencionados acima. Esse volume é apontado pelo método da ABCP/ACI a partir do uso da Tabela A.2 descrita abaixo.

TABELA A.2 – Determinação do volume de agregado graúdo ( $V_c$ )

MF	Diâmetro máximo (mm)				
	9,5	<b>19</b>	25	32	38
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
<b>2,4</b>	0,585	<b>0,710</b>	0,735	0,760	0,785
<b>2,6</b>	0,565	<b>0,690</b>	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Com o módulo de finura do agregado miúdo (2,5), que se encontra entre as faixas 2,4 e 2,6 (em negrito na Tabela A.1), e o diâmetro máximo do agregado graúdo (19 mm) define-se o  $V_c = 0,70$ .

Com o  $V_c$ , pode-se calcular o consumo de agregados graúdos ( $C_b$ ), utilizando a massa unitária compactada de cada agregado  $M_u$  e a equação A.2. A Tabela A.3 mostra os resultados para o  $C_b$  em  $kg/m^3$  de concreto.

$$C_b = V_c.M_u \quad (A.2)$$

TABELA A.3 – Consumo de agregado graúdo ( $Kg/m^3$ )

Agregado	Massa unitária ( $Kg/m^3$ )	$C_b$
G1	1500	1050
G2	1540	1078
B1	1680	1176
B2	1670	1069

Com os dados obtidos acima, calcula-se o volume de agregado miúdo ( $C_m$ ) por  $m^3$  de concreto a partir da equação A.3. O cálculo leva em consideração a massa específica ( $\gamma$ ) de cada componente.

$$\frac{Cm}{\gamma_m} = 1 - \left( \frac{Cc}{\gamma_c} + \frac{Cb}{\gamma_b} + \frac{Ca}{\gamma_a} \right) \quad (\text{A.3})$$

#### A.1.1 Traço para os concretos utilizando areia natural

O mesmo procedimento é aplicado na dosagem dos concretos contendo agregado com areia natural (capítulos 4 e 5), a única diferença no cálculo é o uso da massa específica da areia utilizada. Isso altera apenas a quantidade de areia no traço final. Os demais parâmetros se mantêm.

## B ANEXO B

### B.1 RESULTADOS DE EXPANSÃO DOS CORPOS DE PROVA - PRISMÁTICOS - CAPÍTULO 3

As Tabelas B.1, B.3, B.5 e B.7 mostram os resultados das expansões dos corpos de prova dos ensaios acelerados de barras de argamassa (AMBT). Foi calculado o desvio relativo máximo (DRM) para cada valor de expansão de acordo com o prescrito na NBR 15577-4 (2018) (Tabelas B.2, B.4, B.6 e B.8). Os valores em negrito foram descartados do cálculo da média pois não atenderam o requisito de DRM prescrito (de até 40% da expansão média dos corpos de prova).

TABELA B.1 – Expansão dos corpos de prova de argamassa com o agregado G1

CP/Dia	Agregado G1										
	Expansão (%)										
	0	4	7	9	14	16	21	23	25	28	30
CP 1	0,000	0,010	0,050	0,086	0,116	0,138	0,190	0,198	0,226	0,240	0,250
CP 2	0,000	0,014	0,062	0,088	0,117	0,134	0,175	0,183	0,210	0,223	0,233
CP 3	0,000	0,012	0,062	0,088	0,118	0,136	0,184	0,187	0,212	0,226	0,236
CP 4	0,000	<b>0,006</b>	<b>0,140</b>	0,084	0,111	0,127	0,175	0,186	0,216	0,231	0,268
CP 5	0,000	0,010	0,053	0,085	0,117	0,136	0,190	0,199	0,232	0,243	0,252
Média	0,000	0,012	0,057	0,086	0,116	0,134	0,183	0,190	0,219	0,233	0,248

TABELA B.2 – Desvio relativo máximo dos corpos de prova de argamassa com o agregado G1

CP/Dia	Agregado G1									
	DMR (%)									
	4	7	9	14	16	21	23	25	28	30
CP 1	3,8	31,4	0,3	0,6	2,9	4,2	3,7	3,0	3,3	1,1
CP 2	30,8	15,7	1,7	0,9	0,4	4,4	4,0	4,2	4,3	5,9
CP 3	19,2	15,7	2,6	1,6	1,1	0,7	1,7	3,4	2,7	4,9
CP 4	<b>42,3</b>	<b>91,0</b>	3,0	3,9	5,4	4,2	2,4	1,2	0,8	8,2
CP 5	3,8	28,2	1,6	0,9	1,7	3,7	4,4	5,9	4,5	1,5

TABELA B.3 – Expansão dos corpos de prova de argamassa com o agregado G2

CP/Dia	Agregado G2							
	Expansão (%)							
	0 (2)	9	14	16	18	21	28	30
CP 1	0,000	0,085	0,132	0,140	0,135	0,166	0,185	0,191
CP 2	0,000	0,089	0,122	0,135	0,146	0,161	0,181	0,185
CP 3	0,000	0,071	0,115	0,138	0,153	0,174	0,197	0,200
CP 4	0,000	0,087	0,128	0,140	0,150	0,167	0,187	0,193
CP 5	0,000	0,092	0,136	0,149	0,164	0,173	0,202	0,206
CP 6	0,000	0,087	0,133	0,134	0,151	0,169	0,195	0,201
Média	0,000	0,085	0,128	0,139	0,150	0,168	0,191	0,196

TABELA B.4 – Desvio relativo máximo dos corpos de prova de argamassa com o agregado G2

CP/Dia	Agregado G2						
	DMR (%)						
	9	14	16	18	21	28	30
CP 1	0,4	3,5	0,4	9,9	1,2	3,2	2,6
CP 2	4,6	4,6	3,3	2,8	4,4	5,4	5,7
CP 3	16,2	9,9	1,2	2,1	3,3	2,9	2,2
CP 4	1,8	0,5	0,9	0,3	1,0	2,1	1,5
CP 5	8,1	6,4	6,8	9,5	2,8	5,7	5,1
CP 6	2,1	4,1	3,6	0,9	0,5	2,1	2,6

TABELA B.5 – Expansão dos corpos de prova de argamassa com o agregado B1

CP/Dia	Agregado B1										
	Expansão (%)										
	0	4	7	9	14	16	21	23	25	28	30
CP 1	0,000	0,014	0,029	0,047	0,060	0,071	0,128	0,158	0,215	0,276	0,309
CP 2	0,000	<b>0,007</b>	0,029	0,042	0,058	0,070	0,121	0,150	0,211	0,262	0,292
CP 3	0,000	0,011	0,018	0,028	0,038	0,050	0,109	0,136	0,190	0,249	0,285
CP 4	0,000	0,014	0,031	0,043	0,052	0,062	0,108	0,130	0,180	0,233	0,270
CP 5	0,000	<b>0,019</b>	0,022	0,040	0,050	0,059	0,110	0,131	0,176	0,225	0,264
Média	0,000	0,013	0,026	0,040	0,051	0,062	0,115	0,141	0,194	0,249	0,284

TABELA B.6 – Desvio relativo máximo dos corpos de prova de argamassa com o agregado B1

CP/Dia	Agregado B1									
	DMR (%)									
	4	7	9	14	16	21	23	25	28	30
CP 1	8,4	11,8	17,2	15,9	13,8	11,0	11,8	10,7	11,0	8,9
CP 2	<b>45,8</b>	11,8	5,2	12,0	12,5	5,1	6,4	8,4	5,1	2,7
CP 3	15,7	30,1	28,9	25,3	20,3	5,6	3,5	2,1	0,1	0,4
CP 4	8,4	21,1	7,2	1,1	1,0	6,0	7,8	7,4	6,3	4,9
CP 5	<b>44,6</b>	14,6	0,8	3,6	4,9	4,6	6,9	9,5	9,7	7,0

TABELA B.7 – Expansão dos corpos de prova de argamassa com o agregado B2

CP/Dia	Agregado B2										
	Expansão (%)										
	0	4	7	9	14	16	21	23	25	28	30
CP 1	0,000	0,012	0,044	0,115	0,191	0,273	0,339	0,361	0,394	0,403	0,398
CP 2	0,000	0,011	0,042	0,113	0,201	0,276	0,328	0,344	0,360	0,367	0,379
CP 3	0,000	<b>0,005</b>	0,028	0,112	0,208	0,270	0,314	0,338	0,346	0,353	0,361
CP 4	0,000	0,012	0,028	0,097	0,190	0,260	0,318	0,340	0,355	0,361	0,366
CP 5	0,000	<b>0,019</b>	0,044	0,131	<b>0,356</b>	0,385	0,450	0,464	0,484	0,496	0,509
Média	0,000	0,012	0,037	0,114	0,198	0,293	0,350	0,369	0,388	0,396	0,402

TABELA B.8 – Desvio relativo máximo dos corpos de prova de argamassa com o agregado B2

CP/Dia	Agregado B2									
	DMR (%)									
	4	7	9	14	16	21	23	25	28	30
CP 1	1,4	17,7	1,5	16,7	6,8	3,2	2,3	1,8	1,7	1,2
CP 2	4,8	12,3	0,6	12,5	5,5	6,3	6,8	7,2	7,3	5,9
CP 3	<b>59,2</b>	25,5	1,7	9,2	7,9	10,2	8,6	10,8	10,8	10,2
CP 4	5,4	23,3	14,7	17,0	11,3	9,0	7,9	8,5	8,9	9,1
CP 5	<b>59,9</b>	18,8	15,6	<b>55,3</b>	31,5	28,7	25,6	24,8	25,3	26,4

As Tabelas B.9, B.10, B.11 e B.12 mostram os resultados das expansões dos corpos de prova dos ensaios acelerados em prismas de concreto (ABCPT - 80 °C).

TABELA B.9 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G1 - ABCPT

CP/Dia	Agregado G1				
	Expansão (%)				
	0	7	14	21	28
CP 1	0,000	0,035	0,054	0,075	0,088
CP 2	0,000	0,056	0,073	0,091	0,104
CP 3	0,000	0,048	0,068	0,088	0,103
Média	0,000	0,046	0,065	0,085	0,098
Desvio padrão	0,000	0,011	0,009	0,009	0,009
Erro médio	0,000	0,006	0,005	0,005	0,005

TABELA B.10 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G2 - ABCPT

CP/Dia	Agregado G2				
	Expansão (%)				
	0	7	14	21	28
CP 1	0,000	-0,007	-0,007	-0,006	0,001
CP 2	0,000	0,000	0,016	0,021	0,037
CP 3	0,000	-0,011	-0,002	0,000	0,016
Média	0,000	-0,006	0,002	0,005	0,018
Desvio padrão	0,000	0,006	0,012	0,014	0,018
Erro médio	0,000	0,003	0,007	0,008	0,010

TABELA B.11 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B1 - ABCPT

CP/Dia	Agregado B1				
	Expansão (%)				
	0	7	14	21	28
CP 1	0,000	0,037	0,048	0,068	0,072
CP 2	0,000	0,050	0,060	0,073	0,078
CP 3	0,000	0,033	0,042	0,066	0,070
Média	0,000	0,040	0,050	0,069	0,073
Desvio padrão	0,000	0,009	0,009	0,003	0,004
Erro médio	0,000	0,005	0,005	0,002	0,003

TABELA B.12 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B2 - ABCPT

Agregado B2					
CP/Dia	Expansão (%)				
	0	7	14	21	28
CP 1	0,000	0,026	0,036	0,045	0,061
CP 2	0,000	0,020	0,032	0,039	0,054
CP 3	0,000	0,043	0,044	0,044	0,039
Média	0,000	0,029	0,038	0,043	0,051
Desvio padrão	0,000	0,012	0,006	0,003	0,011
Erro médio	0,000	0,007	0,003	0,002	0,006

As Tabelas B.13, B.14, B.15 e B.16 mostram os resultados das expansões dos corpos de prova dos ensaios acelerados em prismas de concreto (ACPT - 60°C).

TABELA B.13 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G1 - ensaio ACPT

Agregado G1					
CP/semanas	Expansão (%)				
	0	5	10	15	20
CP 1	0,000	0,017	0,043	0,052	0,078
CP 2	0,000	0,025	0,052	0,066	0,093
CP 3	0,000	0,060	0,077	0,070	0,113
Média	0,000	0,034	0,057	0,063	0,095
Desvio padrão	0,000	0,023	0,017	0,009	0,017
Erro médio	0,000	0,003	0,010	0,005	0,010

TABELA B.14 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G2 - ensaio ACPT

Agregado G2					
CP/semanas	Expansão (%)				
	0	5	10	15	20
CP 1	0,000	0,015	0,059	0,078	0,127
CP 2	0,000	0,013	0,045	0,048	0,081
CP 3	0,000	0,015	0,059	0,060	0,071
Média	0,000	0,014	0,055	0,062	0,093
Desvio padrão	0,000	0,002	0,008	0,015	0,030
Erro médio	0,000	0,001	0,005	0,009	0,017

TABELA B.15 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B1 - ensaio ACPT

Agregado B1					
CP/semanas	Expansão (%)				
	0	5	10	15	20
CP 1	0,000	0,000	0,025	0,036	0,054
CP 2	0,000	-0,047	0,011	0,011	0,019
CP 3	0,000	-0,051	0,002	0,002	0,005
Média	0,000	-0,032	0,013	0,016	0,026
Desvio padrão	0,000	0,028	0,012	0,018	0,025
Erro médio	0,000	0,016	0,007	0,010	0,014

TABELA B.16 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B2 - ensaio ACPT

		Agregado B2				
CP/semanas	Expansão (%)					
	0	5	10	15	20	
CP 1	0,000	-0,009	-0,002	-0,013	-0,012	
CP 2	0,000	0,003	0,002	0,010	0,008	
CP 3	0,000	-0,011	-0,011	0,000	-0,001	
Média	0,000	-0,006	-0,004	0,000	-0,001	
Desvio padrão	0,000	0,008	0,007	0,011	0,010	
Erro médio	0,000	0,004	0,004	0,007	0,006	

As Tabelas B.17, B.18, B.19 e B.20 mostram os resultados das expansões dos corpos de prova dos ensaios acelerados em prismas de concreto (CPT - 38°C).

TABELA B.17 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G1 - ensaio CPT

		Agregado G1																
CP/meses	Expansão (%)																	
	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
CP 1	0,000	0,006	0,009	0,012	0,016	0,043	0,041	0,030	0,032	0,032	0,042	0,041	0,043	0,046	0,048	0,055	0,086	
CP 2	0,000	0,011	0,008	0,012	0,012	0,005	0,030	0,034	0,034	0,026	0,041	0,045	0,054	0,064	0,064	0,074	0,089	
CP 3	0,000	0,023	0,022	0,015	0,017	0,011	0,034	0,042	0,036	0,046	0,056	0,060	0,061	0,063	0,066	0,072	0,092	
Média	0,000	0,013	0,013	0,013	0,015	0,019	0,035	0,035	0,034	0,035	0,046	0,049	0,053	0,058	0,059	0,067	0,089	
Desvio p.	0,000	0,009	0,008	0,002	0,003	0,021	0,006	0,006	0,002	0,010	0,008	0,010	0,009	0,010	0,010	0,010	0,003	
Erro médio	0,000	0,005	0,005	0,001	0,001	0,012	0,003	0,004	0,001	0,006	0,005	0,006	0,005	0,006	0,006	0,006	0,002	

TABELA B.18 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado G2 - ensaio CPT

		Agregado G2												
CP/meses	Expansão (%)													
	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
CP 1	0,000	-0,020	-0,005	-0,015	-0,004	0,003	0,006	0,006	0,014	0,020	0,015	0,023	0,024	
CP 2	0,000	-0,023	-0,004	-0,015	-0,006	0,003	0,008	0,004	0,006	0,010	0,010	0,014	0,022	
CP 3	0,000	-0,024	-0,007	-0,017	0,006	0,010	0,002	0,006	0,012	0,016	0,017	0,023	0,022	
Média	0,000	-0,022	-0,006	-0,016	-0,001	0,005	0,005	0,006	0,011	0,015	0,014	0,020	0,023	
Desvio p.	0,000	0,003	0,001	0,001	0,006	0,004	0,003	0,001	0,004	0,005	0,004	0,005	0,001	
Erro médio	0,000	0,001	0,001	0,001	0,004	0,002	0,002	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	

TABELA B.19 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B1 - ensaio CPT

		Agregado B1												
CP/meses	Expansão (%)													
	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
CP 1	0,000	-0,016	-0,008	0,006	-0,008	0,000	-0,005	-0,012	-0,006	-0,006	-0,006	-0,008	-0,010	
CP 2	0,000	-0,015	-0,003	-0,004	0,002	0,006	0,006	-0,002	0,005	0,007	0,007	0,007	0,013	
CP 3	0,000	-0,009	-0,011	-0,010	-0,004	0,002	0,001	-0,001	0,002	0,002	0,021	0,022	0,008	
Média	0,000	-0,013	-0,007	-0,002	-0,003	0,003	0,001	-0,005	0,000	0,001	0,007	0,007	0,004	
Desvio p.	0,000	0,004	0,004	0,008	0,005	0,003	0,006	0,006	0,006	0,007	0,014	0,015	0,012	
Erro médio	0,000	0,002	0,002	0,005	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004	0,008	0,009	0,007	

TABELA B.20 – Expansão dos corpos de prova de concreto com o agregado B2 - ensaio CPT

		Agregado B2											
CP/meses	Expansão (%)												
	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CP 1	0,000	-0,009	0,002	0,002	0,003	0,006	0,007	0,007	0,005	0,004	0,002	0,009	0,023
CP 2	0,000	-0,010	0,003	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,003	0,002	0,004	0,007	0,026
CP 3	0,000	-0,007	0,016	0,005	0,003	0,000	0,008	0,002	0,002	0,002	0,001	0,007	0,026
Média	0,000	-0,009	0,007	0,003	0,003	0,004	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002	0,008	0,025
Desvio p.	0,000	0,001	0,008	0,002	0,000	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
Erro médio	0,000	0,001	0,005	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

## B.2 RESULTADOS DE MASSA DOS CORPOS DE PROVA - CAPÍTULO 3

As Tabelas B.21, B.22, B.23 e B.24 mostram os resultados das massas (g) dos corpos de prova de argamassa, medidas ao longo do tempo do ensaio AMBT.

TABELA B.21 – Massa dos corpos de prova de argamassa contendo o agregado G1

		Agregado G1					
CP/Dia	Massa (g)						
	0	7	16	21	28	30	
CP 1	391,9	396,3	398,4	401,3	402,5	402,4	
CP 2	389,9	391,4	394,8	397,8	398,9	399,0	
CP 3	388,1	389,6	393,3	396,5	397,7	397,8	
CP 4	400,4	404,6	406,7	409,1	410,4	410,4	
CP 5	388,9	393,2	395,0	397,4	398,4	398,3	
Média	391,9	395,0	397,6	400,4	401,6	401,6	
Desvio padrão	4,9	5,9	5,4	5,2	5,3	5,2	

TABELA B.22 – Massa dos corpos de prova de argamassa contendo o agregado G2

		Agregado G2					
CP/Dia	Massa (g)						
	0	7	16	21	28	30	
CP 1	407,7	408,9	412,2	412,7	413,4	414,3	
CP 2	402,7	404,9	408,8	408,2	409,6	410,1	
CP 3	414,2	418,3	421,4	421,6	422,9	423,1	
CP 4	407,6	411,1	413,4	413,9	415,7	415,9	
CP 5	404,9	408,6	411,9	411,71	412,6	412,9	
CP 6	409,7	413,6	416,6	416,58	417,5	418,0	
Média	407,8	410,9	414,1	414,1	415,26	415,7	
Desvio padrão	3,9	4,6	4,4	4,6	4,6	4,5	

TABELA B.23 – Massa dos corpos de prova de argamassa contendo o agregado B1

Agregado B1						
CP/Dia	Massa (g)					
	0	7	16	21	28	30
CP 1	415,0	417,6	418,1	419,5	420,7	421,0
CP 2	421,9	425,9	426,7	428,0	429,0	429,4
CP 3	419,8	423,7	425,1	426,4	427,5	427,8
CP 4	415,3	417,4	418,7	420,0	420,9	421,3
CP 5	428,2	431,7	431,9	433,2	434,4	434,4
Média	420,0	423,3	424,1	425,4	426,5	426,8
Desvio padrão	5,4	6,0	5,8	5,8	5,8	5,7

TABELA B.24 – Massa dos corpos de prova de argamassa contendo o agregado B2

Agregado B2						
CP/Dia	Massa (g)					
	0	7	16	21	28	30
CP 1	404,1	405,8	407,9	409,3	411,9	411,95
CP 2	403,7	405,6	408,2	410,0	411,5	411,5
CP 3	408,3	410,3	413,9	415,5	416,4	416,9
CP 4	405,8	406,3	410,3	411,8	413,9	413,9
CP 5	400,7	402,9	405,9	407,1	407,9	408,1
Média	404,5	406,2	409,3	410,7	412,3	412,5
Desvio padrão	2,8	2,7	3,0	3,1	3,1	3,3

As Tabelas B.25, B.26, B.27 e B.28 mostram os resultados das massas (g) dos corpos de prova de concreto, medidas ao longo do tempo do ensaio ABCPT.

TABELA B.25 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G1

Agregado G1					
CP/Dia	Massa (g)				
	0	7	14	21	28
CP 1	3907,9	3915,5	3915,2	3915,5	3918,9
CP 2	3997,7	3999,3	3999,5	4001,1	4001,58
CP 3	3989,3	3993,4	3995,7	3996,4	3999,9
Média	3964,9	3969,4	3970,1	3970,9	3973,5
Desvio padrão	49,6	46,8	47,6	48,1	47,3

TABELA B.26 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G2

Agregado G2					
CP/Dia	Massa (g)				
	0	7	14	21	28
CP 1	3684,8	3684,2	3684,4	3684,9	3684,8
CP 2	3691,5	3691,7	3695,8	3693,8	3699,5
CP 3	3796,0	3796,5	3796,6	3796,9	3797,5
Média	3796,1	3724,1	3725,6	3725,2	3727,27
Desvio padrão	62,4	62,8	61,8	62,3	61,3

TABELA B.27 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B1

Agregado B1					
CP/Dia	Massa (g)				
	0	7	14	21	28
CP 1	4042,7	4048,5	4051,7	4054,7	4051,1
CP 2	4112,9	4118,0	4121,2	4124,3	4123,2
CP 3	4071,6	4068,5	4070,0	4072,1	4070,5
Média	4075,7	4078,3	4080,9	4083,7	4081,58
Desvio padrão	35,3	35,8	36,0	36,2	37,3

TABELA B.28 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B2

Agregado B2					
CP/Dia	Massa (g)				
	0	7	14	21	28
CP 1	4167,6	4169,0	4170,6	4168,7	4168,7
CP 2	4068,6	4072,2	4070,4	4071,8	4072,7
CP 3	4167,2	4167,7	4167,3	4173,0	4173,0
Média	4134,5	4136,3	4136,1	4137,9	4138,2
Desvio padrão	57,1	55,5	56,9	57,2	56,7

As Tabelas B.29, B.30, B.31 e B.32 mostram os resultados das massas (g) dos corpos de prova de concreto, medidas ao longo do tempo do ensaio ACPT.

TABELA B.29 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G1

Agregado G1					
CP/semanas	Massa (g)				
	0	5	10	15	20
CP 1	3932,2	3945,5	3945,6	3949,7	3952,8
CP 2	3864,2	3876,9	3881,0	3883,2	3884,0
CP 3	3967,5	3982,5	3986,7	3988,9	3993,0
Média	3921,3	3934,9	3937,8	3940,6	3943,3
Desvio padrão	52,5	53,6	53,3	53,4	55,1

TABELA B.30 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G2

Agregado G2					
CP/semanas	Massa (g)				
	0	5	10	15	20
CP 1	3764,1	3770,2	3775,6	3776,4	3787,2
CP 2	3867,9	3874,8	3874,9	3874,2	3884,9
CP 3	3766,2	3773,4	3777,3	3774,9	3779,1
Média	3799,4	3806,1	3809,3	3808,5	3817,1
Desvio padrão	59,3	59,5	56,8	56,7	58,9

TABELA B.31 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B1

		Agregado B1				
CP/semanas	Massa (g)					
	0	5	10	15	20	
CP 1	4007,7	3844,2	3932,4	3994,6	3983,1	
CP 2	4086,5	3944,0	4027,9	4050,7	4047,4	
CP 3	4078,8	3937,4	4033,7	4049,1	4050,2	
Média	4057,7	3908,6	3998,0	4031,5	4026,9	
Desvio padrão	43,4	55,8	56,9	31,9	37,9	

TABELA B.32 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B2

		Agregado B2				
CP/semanas	Massa (g)					
	0	5	10	15	20	
CP 1	4034,3	4036,5	4048,7	4041,8	4042,3	
CP 2	4023,1	4035,7	4038,9	4035,6	4037,2	
CP 3	3953,3	3955,2	3962,6	3959,8	3960,2	
Média	4003,6	4009,1	4016,7	4012,4	4013,2	
Desvio p.	43,9	46,7	47,1	45,7	46,0	

As Tabelas B.33, B.34, B.35 e B.36 mostram os resultados das massas (g) dos corpos de prova de concreto, medidas ao longo do tempo do ensaio CPT.

TABELA B.33 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G1

		Agregado G1											
CP/meses	Massa (g)												
	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
CP 1	3914,5	3919,7	3921,8	3934,0	3934,0	3936,0	3942,9	3940,6	3940,9	3940,9	3945,3	3945,9	
CP 2	3865,1	3870,7	3867,4	3880,2	3883,0	3885,0	3892,9	3889,9	3889,9	3889,3	3894,4	3895,0	
CP 3	3898,2	3904,0	3904,9	3916,6	3917,4	3918,8	3922,5	3924,5	3925,3	3926,1	3932,5	3934,1	
Média	0,0	3898,1	3898,1	3910,3	3911,5	3913,3	3919,4	3918,3	3918,7	3918,8	3924,1	3925,0	
Desvio p.	25,2	25,0	27,8	27,4	26,0	25,9	25,1	25,9	26,1	26,6	26,4	26,7	

TABELA B.34 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado G2

		Agregado G2											
CP/meses	Massa (g)												
	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
CP 1	3897,0	3898,6	3910,1	3911,0	3912,1	3917,5	3918,8	3918,7	3918,9	3918,2	3919,3	3919,5	
CP 2	3736,1	3738,1	3749,5	3752,0	3752,9	3758,7	3761,3	3761,2	3759,6	3760,5	3760,5	3759,3	
CP 3	3852,2	3853,2	3865,3	3867,0	3870,4	3870,3	3874,3	3874,4	3876,5	3873,3	3873,4	3873,8	
Média	0,0	3830,0	3841,6	3843,4	3845,1	3848,8	3851,5	3851,4	3851,7	3850,7	3851,1	3850,8	
Desvio p.	83,1	82,7	82,9	82,1	82,5	81,6	81,2	81,2	82,5	81,3	81,7	82,5	

TABELA B.35 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B1

		Agregado B1											
CP/meses	Massa (g)												
	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
CP 1	4001,8	4008,1	4160,6	4017,1	4019,5	4020,1	4020,1	4020,0	4021,7	4021,5	4021,7	4021,8	
CP 2	3992,3	3995,7	3999,2	4002,3	4003,0	4004,9	4003,6	4003,6	4005,2	4005,5	4005,0	4004,4	
CP 3	4154,8	4157,4	4014,1	4162,4	4164,6	4165,3	4164,6	4164,8	4166,8	4166,8	4166,7	4166,4	
Média	0,0	4053,7	4058,0	4060,6	4062,4	4063,5	4062,8	4062,8	4064,5	4064,6	4064,5	4064,2	
Desvio p.	91,2	90,0	89,2	88,4	88,9	88,6	88,5	88,7	88,9	88,9	88,9	88,9	

TABELA B.36 – Massa dos corpos de prova de concreto contendo o agregado B2

		Agregado B2											
CP/meses	Massa (g)												
	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
CP 1	3976,5	3981,4	4031,7	4042,3	3993,7	3992,2	3996,6	3999,4	3998,5	3996,1	3996,4	3999,0	
CP 2	4139,9	4145,3	4152,9	4157,2	4160,2	4157,4	4162,4	4165,6	4165,6	4162,4	4162,5	4162,5	
CP 3	4118,4	4125,4	4089,2	4090,2	4136,0	4136,6	4137,0	4141,5	4142,5	4139,0	4139,1	4140,3	
Média	0,0	4084,0	4091,3	4096,5	4096,6	4095,4	4098,6	4102,1	4102,2	4099,2	4099,3	4100,6	
Desvio p.	88,8	89,5	60,6	57,7	89,9	90,0	89,3	89,8	90,6	90,0	89,9	88,7	