



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**LAISY MEURER PERIN**

**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO DE MECANISMOS  
EXPANSIVOS EM CONCRETO PRODUZIDO COM AREIA  
DE MINÉRIO DE FERRO**

Uberlândia, 2024

**LAISY MEURER PERIN**

**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO DE MECANISMOS  
EXPANSIVOS EM CONCRETO PRODUZIDO COM AREIA  
DE MINÉRIO DE FERRO**

Defesa apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

Uberlândia, 2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P445 Perin, Laisy Meurer, 1999-  
2024 AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO DE MECANISMOS EXPANSIVOS EM  
CONCRETO PRODUZIDO COM AREIA DE MINÉRIO DE FERRO  
[recurso eletrônico] / Laisy Meurer Perin. - 2024.

Orientador: Antonio Carlos dos Santos.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.636>  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil. I. Santos, Antonio Carlos dos,  
1968-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. III.  
Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



## ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 305, PPGEC				
Data:	02 de Setembro de 2024	Hora de início:	08:30 h	Hora de encerramento:	11:00 h
Matrícula do Discente:	12212ECV006				
Nome do Discente:	Laisy Meurer Perin				
Título do Trabalho:	Avaliação da Interação de Mecanismos Expansivos em Concreto Produzido com Areia de Minério de Ferro				
Área de concentração:	Construção Civil, Estruturas e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Estruturas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Avaliação do uso de Areia VALE na produção de concreto para dormentes sob a perspectiva da durabilidade				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Andrielli Moraes de Oliveira - UFG, Eliane Betânia Carvalho Costa - UFU e Antonio Carlos dos Santos, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Antonio Carlos dos Santos, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

### **Aprovado**

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Carlos dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/09/2024, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andrielli Moraes de Oliveira, Usuário Externo**, em 02/09/2024, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Eliane Betânia Carvalho Costa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/09/2024, às 11:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5645060** e o código CRC **4A71200B**.

---

**Referência:** Processo nº 23117.055663/2024-35

SEI nº 5645060

*Dedico este trabalho a meu pai (in  
memoriam), que sempre foi meu maior  
propulsor, e a minha mãe, por ter tornado a  
jornada mais fácil.*

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de dissertação só foi possível graças ao apoio e contribuição de diversas pessoas e instituições, às quais gostaria de expressar minha profunda gratidão.

Primeiramente, agradeço a Deus pela saúde, força, sabedoria e paciência concedidas ao longo dessa jornada.

Dedico este trabalho à memória do meu querido pai, Osório, que infelizmente não pôde estar presente na conclusão desta etapa da minha vida. Sua orientação, ensinamentos e princípios sempre estarão comigo. A saudade é grande, mas seu legado de dedicação e perseverança continua a me inspirar todos os dias.

Agradeço à minha mãe, Ida, pelo amor incondicional, suporte e encorajamento em todos os momentos, e principalmente por se fazer sempre presente e apoiar minhas escolhas, mesmo que à distância. Não há palavras que expressem minha gratidão por tudo o que fez e ainda faz por mim.

Às minhas irmãs, Morgana e Adriana por compreenderem minhas escolhas, entenderem minha ausência e por trazerem ao mundo as coisas mais preciosas da minha vida, meus sobrinhos: João, Alice, Davi, Heloísa e Verônica. A eles, guardo um agradecimento especial, por serem a alegria da família, e me motivarem a sempre dar o melhor de mim e ser seu exemplo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Carlos, gostaria de expressar minha sincera gratidão, não apenas pela orientação acadêmica excepcional, mas pela relação de amizade que desenvolvemos ao longo desses anos. Suas valiosas sugestões e ensinamentos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Seu apoio constante, palavras de incentivo, conselhos e até mesmo as críticas, foram essenciais para meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia pelas contribuições durante o curso.

Ao meu professor de graduação, e amigo, Rennan Medeiros, por ter sido a primeira pessoa a me incentivar a seguir a área acadêmica, me ajudar durante o processo de ingresso no mestrado e ser uma grande inspiração para mim.

Um agradecimento especial aos colegas do laboratório, em especial aos colegas do grupo de pesquisa DurAE, pelo apoio técnico, troca de conhecimentos e pela amizade cultivada

ao longo desses anos. Agradeço também aos técnicos e funcionários da universidade, que sempre estiveram dispostos a ajudar.

À empresa Vale e Agera, pelo suporte financeiro e pelo fornecimento da areia de minério de ferro para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus amigos, Maria Eduarda, Rhuan e Felipe, que me apoiaram, me incentivaram, e foram meus pilares nos momentos mais difíceis da minha vida. A conclusão desse trabalho só foi possível devido a todo o suporte emocional que eles me proporcionaram, além dos momentos de descontração e alegria, essenciais para o equilíbrio durante essa trajetória.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos, meu muito obrigado!

## RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto é um tema de crescente interesse técnico-científico devido à frequente ocorrência de manifestações patológicas que podem comprometer a integridade e a vida útil das construções. Entre essas manifestações, destacam-se as reações expansivas internas, como a reação álcali-agregado (RAA) e a formação de etringita tardia (DEF), que podem ocorrer de forma separada ou também simultaneamente. Este estudo visa avaliar a interação desses mecanismos expansivos em concretos produzidos com areia proveniente da extração de minério de ferro, um subproduto industrial promissor.

A pesquisa desenvolveu-se por meio de um programa experimental que envolveu a caracterização física e química da areia de minério de ferro, a produção de concreto de alta resistência e com 65% desse material em relação ao total de agregado miúdo e a indução das reações expansivas, tanto de forma isolada quanto simultânea. Foram monitoradas as variações dimensionais ao longo do tempo e realizados ensaios não-destrutivos, físicos e mecânicos, além de análises microestruturais e químicas nos concretos para entender os efeitos das reações expansivas.

Os resultados indicaram que, até a idade de 200 dias, a combinação de mecanismos expansivos não amplificou os níveis de degradação do concreto. Além disso, a reação álcali-agregado (RAA) apresentou uma cinética mais rápida em comparação à formação de etringita tardia (DEF), sendo ainda predominante na degradação do concreto quando na ocorrência dos mecanismos combinados.

**Palavras-chave:** Durabilidade; Formação de Etringita Tardia (DEF); Reação Álcali-Agregado (RAA); Mecanismos expansivos; Concreto; Areia de minério de ferro.

## ABSTRACT

The durability of concrete structures is a topic of growing technical-scientific interest due to the frequent occurrence of pathological manifestations that compromise the integrity and service life of constructions. Among these manifestations, internal expansive reactions such as alkali-aggregate reaction (AAR) and delayed ettringite formation (DEF) stand out, which can also occur simultaneously. This study aims to evaluate the interaction of these expansive mechanisms in concretes produced with sand from iron ore extraction, a promising industrial by-product.

The research was conducted through an experimental program that involved the physical and chemical characterization of iron ore sand, the production of high-strength concrete with 65% of this material relative to the total fine aggregate, and the induction of expansive reactions, both in isolation and combined. Dimensional variations over time were monitored, and non-destructive, physical, and mechanical tests were carried out, along with microstructural and chemical analyses to understand the effects of the reactions occurring both in isolation and simultaneously.

The results indicated that, up to the age of 200 days, the combination of expansive mechanisms did not amplify the levels of concrete degradation. Furthermore, the alkali-aggregate reaction (AAR) showed a faster kinetics compared to delayed ettringite formation (DEF), and it was still predominant in concrete degradation when the mechanisms occurred combined.

**Keywords:** Durability; Delayed Ettringite Formation (DEF); Alkali-Aggregate Reaction (AAR); Expansive mechanisms; Concrete; Iron ore sand.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção mundial de minério de ferro bruto no ano de 2021 .....	27
Figura 2 – Gráfico representando a quantidade de minério concentrado e de resíduo gerado no ano de 2021.....	28
Figura 3 – Principais mecanismos de degradação do concreto armado .....	33
Figura 4 – Processo de formação da RAS: a) compostos presentes na reação; b) dissolução dos álcalis, liberação de hidroxilas e interação com a sílica dos agregados; c) formação do gel; d) expansão do gel devido à interação com a água, gerando pressões internas e fissuração.....	34
Figura 5 – Gráfico representando o modelo de Larive.....	36
Figura 6 – Resultado do estudo de RAA com diferentes tipos/naturezas de agregados .....	38
Figura 7 – Resultados do estudo de RAA com diferentes granulometrias de agregado graúdo: a) expansão; b) número de fissuras.....	39
Figura 8 – Resultados de expansão com diferentes MCSs: a) diferentes teores de incorporação; b) diferentes finuras .....	40
Figura 9 – Resultados da expansão de prismas de concreto expostos a diferentes temperaturas .....	41
Figura 10 – Resultados de expansão em diferentes condições ambientais.....	42
Figura 11 – Fases de um ciclo térmico padrão .....	46
Figura 12 – Representação gráfica de diferentes regimes de cura .....	46
Figura 13 – Resultado do estudo sobre a influência do tempo de duração do tratamento térmico: a) 71 °C; b) 81 °C .....	47
Figura 14 – Resultado do estudo sobre a influência de adições na expansão por DEF.....	49
Figura 15 – Relação entre a expansão e a relação $SO_3/Al_2O_3$ do cimento .....	53
Figura 16 – Coeficiente de ativação térmica para a precipitação de etringita.....	54
Figura 17 – Expansão das amostras expostas a diferentes umidades .....	55
Figura 18 – Influência da concentração de KOH da água de armazenamento na cinética de DEF .....	56
Figura 19 – Condições para ocorrência de DEF e RAA simultaneamente .....	58
Figura 20 – Resultado de expansão dos diferentes mecanismos deletérios .....	59
Figura 21 – Fluxograma das variáveis em análise do programa experimental .....	61
Figura 22 – Gráfico do calor de hidratação do cimento .....	64

Figura 23 – Agregados utilizados na pesquisa: a) areia de minério de ferro; b) areia natural quartzosa; c) brita 1 inerte; d) brita 1 potencialmente reativa .....	66
Figura 24 – Análise por microscopia eletrônica de varredura nas amostras de agregado miúdo: a) areia de minério de ferro (100 x); b) areia de minério de ferro (500 x); c) areia natural quartzosa (100 x); d) areia natural quartzosa (500 x).....	67
Figura 25 – Mapeamento dos elementos químicos (EDS) da areia de minério de ferro.....	68
Figura 26 – Mapeamento dos elementos químicos (EDS) da areia natural quartzosa .....	68
Figura 27 – Difratoograma de raios X (DRX) da amostra de areia de minério de ferro.....	72
Figura 28 – Difratoograma de raios X (DRX) da amostra de areia natural quartzosa .....	72
Figura 29 – Difratoograma de raios X (DRX) da amostra de brita 1 reativa .....	73
Figura 30 – Difratoograma de raios X (DRX) da amostra de brita 1 inerte.....	73
Figura 31 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos .....	75
Figura 32 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos .....	76
Figura 33 – Etapas metodológicas utilizadas no trabalho .....	77
Figura 34 – Processo de produção do concreto: a) separação de materiais; b) imprimação da betoneira; c) colocação dos materiais na betoneira; d) diluição de aditivo superplastificante em 70% da água de amassamento; e) mistura inicial dos materiais; f) diluição de NaOH em 30% água de amassamento; g) adição da solução de NaOH; h) retirada do material fino aderido na superfície da betoneira; i) fim do processo de mistura.....	79
Figura 35 – <i>Slump test</i> .....	80
Figura 36 – Adensamento dos corpos de prova: a) mesa vibratória; b) vibrador de imersão ..	81
Figura 37 – Gráfico representativo do tratamento térmico para a RAA .....	82
Figura 38 – Armazenamento de corpos de prova em câmara úmida à 50 °C .....	82
Figura 39 – Tanque de aquecimento utilizado no tratamento térmico das amostras.....	83
Figura 40 – Gráfico representativo do tratamento térmico para a DEF .....	83
Figura 41 – Armazenamento dos corpos de prova de referência em câmara úmida.....	84
Figura 42 – Processo de inserção dos pinos para medição das expansões: a) retificação do corpo de prova; b) centralização do corpo de prova; c) perfuração; d) limpeza do furo; e) secagem do furo; f) preparação da cola; g) preenchimento do furo com cola; h) introdução do parafuso; i) limpeza do excesso de cola no entorno do parafuso .....	86
Figura 43 – Acompanhamento da expansão: a) corpo de prova com pino; b) medição da expansão com micrômetro.....	87
Figura 44 – Realização de ensaio de velocidade de ultrassom.....	89
Figura 45 – Ensaio de resistividade elétrica superficial .....	90

Figura 46 – Ensaio de caracterização física: a) amostras submetidas a absorção durante processo de fervura; b) amostra submetida a absorção por capilaridade .....	90
Figura 47 – Ensaio mecânicos: a) resistência à compressão; b) resistência à tração por compressão diametral; c) módulo de elasticidade estático .....	91
Figura 48 – Configuração do ensaio de energia de fraturamento pelo modo 1 (G1): a) desenho em 2D; b) desenho em 3D .....	92
Figura 49 – Ensaio de energia de fraturamento: a) colagem das chapas metálicas para o posicionamento do <i>clip-gage</i> ; b) ensaio em andamento.....	93
Figura 50 – Preparação das amostras para análise de DRI: a) corte; b) polimento.....	94
Figura 51 – Análise de DRI sendo realizada .....	94
Figura 52 – Amostras para MEV: a) retirada de amostra do corpo de prova; b) amostras armazenadas até o ensaio; c) amostras recobertas com ouro.....	96
Figura 53 – Processo de preparação das amostras: a) amostras secas; b) moinho de discos; c) amostras moídas; d) peneiramento; e) quarteamento; f) armazenamento em <i>Eppendorf</i> .....	97
Figura 54 – Análise de DRX: a) amostras fixadas (prensadas) no porta-amostra; b) análise em andamento.....	98
Figura 55 – Gráfico com os valores de variação dimensional.....	100
Figura 56 – Resultados de velocidade de ultrassom.....	102
Figura 57 – Resultados de resistividade elétrica superficial.....	104
Figura 58 – Gráfico correlacionando a resistividade elétrica superficial e o índice de vazios .....	106
Figura 59 – Resultados de absorção de água por capilaridade .....	107
Figura 60 – Resultados de absorção de água por imersão .....	109
Figura 61 – Resultados de índice de vazios.....	110
Figura 62 – Resultados de resistência à compressão axial, em MPa.....	111
Figura 63 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral, em MPa .....	113
Figura 64 – Resultados de módulo de elasticidade estático, em GPa.....	114
Figura 65 – Resultados de energia de fraturamento pelo modo 1 (G1), em J.m <sup>2</sup> .....	116
Figura 66 – Imagem de MEV de poro em amostras de DEF: a) 28 dias; b) 200 dias.....	117
Figura 67 – Imagem de MEV de poro em amostra de DEF aos 200 dias (Figura 66b) com aproximação de 5 kX.....	118
Figura 68 – Gel exsudado na superfície do concreto.....	119
Figura 69 – Imagens de corpos de prova de RAA com presença de gel: a) gel preenchendo os poros e se espalhando pela extensão da amostra; b) aproximação da imagem .....	119

Figura 70 – Imagem de MEV de poro em amostras de RAA: a) 28 dias; b) 200 dias .....	120
Figura 71 – Imagem de MEV de interface em amostras de RAA: a) 28 dias; b) 200 dias ....	120
Figura 72 – Imagem de MEV de poro em amostras de DEF+RAA: a) 28 dias; b) 200 dias .	121
Figura 73 – Imagem de MEV de poro em amostra de DEF+RAA aos 200 dias (Figura 72b) com aproximação de 5 kX.....	121
Figura 74 – Imagem de MEV de poro em amostras de RR: a) 28 dias; b) 200 dias .....	122
Figura 75 – Imagem de MEV de poro em amostras de RI: a) 28 dias; b) 200 dias .....	123
Figura 76 – Cristais de etringita em amostras de 28 dias. a) RR; b) RI .....	123
Figura 77 – Imagens do grupo RAA: a) amostra de 28 dias; b) amostra de 200 dias.....	124
Figura 78 – Resultado de <i>Damage Rating Index</i> (DRI) .....	125
Figura 79 – Difratoograma de raio-X de DEF .....	127
Figura 80 – Difratoograma de raio-X de RAA.....	128
Figura 81 – Difratoograma de raio-X de DEF+RAA.....	128
Figura 82 – Difratoograma de raio-X de RR.....	129
Figura 83 – Difratoograma de raio-X de RI .....	129
Figura 84 – Variação de temperatura do concreto produzido com diferentes tipos e consumos de cimento .....	154

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Procedência e tipos de rochas estudadas .....	37
Quadro 2 – Ensaio de caracterização do cimento e respectivas normas técnicas utilizadas...	63
Quadro 3 – Ensaio de caracterização dos agregados e respectivas normas técnicas utilizadas .....	66
Quadro 4 – Ensaio de caracterização do concreto e respectivas normas técnicas utilizadas..	88
Quadro 5 – Fatores de ponderação do DRI .....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Calor de hidratação dos compostos minerais do clínquer .....	51
Tabela 2 – Características químicas do cimento .....	63
Tabela 3 – Características físicas do cimento.....	65
Tabela 4 – Composição mineralógica (% em número de grãos) e classificação das amostras de agregados miúdos .....	69
Tabela 5 – Composição química dos agregados.....	71
Tabela 6 – Índices físicos dos agregados miúdos.....	74
Tabela 7 – Índices físicos dos agregados graúdos.....	75
Tabela 8 – Especificações do aditivo <i>Glenium 51</i> .....	77
Tabela 9 – Quantidade de materiais dos traços .....	78
Tabela 10 – Resultados de velocidade de ultrassom, em m/s.....	102
Tabela 11 – Variação na velocidade de ultrassom causada pelos mecanismos expansivos...	103
Tabela 12 – Resultados de resistividade elétrica superficial, em $\Omega.m$ .....	104
Tabela 13 – Variação na resistividade elétrica superficial causada pelos mecanismos expansivos .....	105
Tabela 14 – Resultados de absorção de água por capilaridade após 72 horas, em mm .....	107
Tabela 15 – Resultados de absorção de água por imersão, em % .....	108
Tabela 16 – Resultados de índice de vazios, em % .....	109
Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão axial, em MPa .....	111
Tabela 18 – Variação da resistência à compressão causada pelos mecanismos expansivos..	112
Tabela 19 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral, em MPa.....	113
Tabela 20 – Resultados de módulo de elasticidade estático, em GPa .....	114
Tabela 21 – Variação do módulo de elasticidade estático causada pelos mecanismos expansivos .....	115
Tabela 22 – Resultados de energia de fraturamento pelo modo 1 (G1), em J.m <sup>2</sup> .....	116
Tabela 23 – Variação da energia de fraturamento pelo modo 1 causada pelos mecanismos expansivos .....	116
Tabela 24 – Resultados de DRI normalizado .....	124
Tabela 25 – Compilação dos resultados obtidos com o estudo .....	130
Tabela 26 – Variáveis utilizadas no cálculo de variação da temperatura em função dos diferentes tipos de cimento.....	154

Tabela 27 – Controle de concretagem do grupo “DEF” .....	155
Tabela 28 – Controle de concretagem do grupo “RAA” .....	156
Tabela 29 – Controle de concretagem do grupo “DEF + RAA” .....	157
Tabela 30 – Controle de concretagem do grupo “RR” .....	158
Tabela 31 – Controle de concretagem do grupo “RI” .....	159
Tabela 32 – Dados de variação dimensional .....	160
Tabela 33 – Análise de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias.....	161
Tabela 34 – Resultados de comparação múltipla entre grupos e testes <i>post-hoc</i> realizados nas amostras de variação dimensional .....	162
Tabela 35 - Resultados da análise estatística de velocidade de ultrassom das amostras de 28 dias .....	163
Tabela 36 – Resultados da análise estatística de velocidade de ultrassom das amostras de 200 dias.....	163
Tabela 37 – Resultados da análise estatística de resistividade elétrica superficial das amostras de 28 dias .....	163
Tabela 38 – Resultados da análise estatística de resistividade elétrica superficial das amostras de 200 dias .....	164
Tabela 39 – Resultados da análise estatística de capilaridade após 72 horas das amostras de 28 dias.....	164
Tabela 40 – Resultados da análise estatística de capilaridade após 72 horas das amostras de 200 dias.....	164
Tabela 41 – Resultados da análise estatística de absorção de água por imersão das amostras de 28 dias.....	164
Tabela 42 – Resultados da análise estatística de absorção de água por imersão das amostras de 200 dias.....	165
Tabela 43 – Resultados da análise estatística de índice de vazios das amostras de 28 dias... 165	
Tabela 44 – Resultados da análise estatística de índice de vazios das amostras de 200 dias. 165	
Tabela 45 – Resultados da análise estatística de resistência à compressão axial das amostras de 28 dias.....	165
Tabela 46 – Resultados da análise estatística de resistência à compressão axial das amostras de 200 dias.....	166
Tabela 47 – Resultados da análise estatística de resistência à tração por compressão diametral das amostras de 28 dias .....	166

Tabela 48 – Resultados da análise estatística de resistência à tração por compressão diametral das amostras de 200 dias .....	166
Tabela 49 – Resultados da análise estatística de módulo de elasticidade estático das amostras de 28 dias.....	166
Tabela 50 – Resultados da análise estatística de módulo de elasticidade estático das amostras de 200 dias.....	167
Tabela 51 – Resultados da análise estatística de energia de fraturamento pelo modo I (G <sub>I</sub> ) das amostras de 28 dias.....	167
Tabela 52 – Resultados da análise estatística de energia de fraturamento pelo modo I (G <sub>I</sub> ) das amostras de 200 dias.....	167
Tabela 53 – Resultados da análise estatística de DRI das amostras de 28 dias.....	167
Tabela 54 – Resultados da análise estatística de DRI das amostras de 200 dias.....	168

## LISTA DE SÍMBOLOS

CO <sub>2</sub>	Gás carbônico (dióxido de carbono)
%	Percentual
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
n°	Número
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
°C	Graus Celsius
Mg(OH) <sub>2</sub>	Brucita (hidróxido de magnésio)
CaCO <sub>3</sub>	Calcita (carbonato de cálcio)
Ca(OH) <sub>2</sub>	Porlandita (hidróxido de cálcio)
Ca,Mg(CO <sub>3</sub> )	Carbonato de cálcio ou magnésio
NaOH	Soda cáustica (hidróxido de sódio)
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de sódio
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sódio
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio
kg	Quilograma
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
CaO	Óxido de cálcio
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silício
Ca	Cálcio
Si	Silício
±	Mais ou menos
C <sub>3</sub> A	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (aluminato tricálcico)
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de cálcio
Δθ	Varição de temperatura do concreto
C <sub>c</sub>	Consumo de cimento
Q <sub>t</sub>	Calor de hidratação do cimento
J	Joule
g	Gramma
c <sub>p</sub>	Calor específico do concreto
kJ	Quilojoule

$\rho_c$	Massa específica do concreto
SO <sub>3</sub>	Sulfato (trióxido de enxofre)
C <sub>3</sub> S	3CaO.SiO <sub>2</sub> (silicato tricálcico)
C <sub>2</sub> S	2CaO.SiO <sub>2</sub> (silicato dicálcico)
C <sub>4</sub> AF	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ferro aluminato tetracálcico)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
KOH	Potassa cáustica (hidróxido de potássio)
mmol/L	Milimol por litro
MgO	Óxido de magnésio
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita (óxido de ferro)
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de manganês
kW	Quilowatt
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de fósforo
SrO	Óxido de estrôncio
W	Watt
cm <sup>3</sup>	Centrímetro cúbico
min	Minuto
cm <sup>2</sup>	Centímetro quadrado
µm	Micrômetro
cm	Centímetro
mL	Mililitro
O	Oxigênio
g	Grama
h	Hora
mA	Miliampere
θ	Teta
CuK $\alpha$	Radiação K-alpha do cobre
Å	Angstrom (10 <sup>-10</sup> metros)
°/min	Graus por minuto
Al(OH) <sub>3</sub>	Gibbsita (hidróxido de alumínio)
L	Litro
mg	Miligrama

pH	Potencial de hidrogênio
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
N	Newton
m	Metro
kHz	Quilohertz
Ω	Ohm

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFm	Monossulfoaluminato de cálcio
AFt	Trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita)
Aq.	Aquoso
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )
CAD	Agregado graúdo descolado ( <i>coarse aggregate de-bonded</i> )
CCA	Fissuras fechadas em agregados graúdos ( <i>closed cracks in aggregates</i> )
CCP	Fissuras na pasta de cimento ( <i>cracks in cement paste</i> )
CCPG	Fissuras com produto de reação na pasta de cimento ( <i>cracks with reaction product in cement paste</i> )
CG	Extensômetro ( <i>Clip-gage</i> )
CP	Corpo de prova
CP II – F	Cimento Portland composto com filer
CP II – Z	Cimento Portland composto com pozolana
CP IV	Cimento Portland pozolânico
cps	Contagens por segundo
CP V – ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DAP	Partícula de agregado desagregada/corroída ( <i>disaggregate/corroded aggregate particle</i> )
DEF	Formação de etringita tardia ( <i>Delayed Ettringite Formation</i> )
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
DRI	Índice de classificação de danos ( <i>Damage Rating Index</i> )
DRX	Difração de raios-X
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
EIS	Espectroscopia eletroquímica de impedância ( <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> )
END	Ensaio não-destrutivo
ESA	Ataque externo por sulfato ( <i>External Sulfate Attack</i> )
FECIV	Faculdade de Engenharia Civil

FRX	Fluorescência de raios-X
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICSD	Banco de dados de estrutura cristalina inorgânica ( <i>Inorganic Crystal Structure Database</i> )
IFSTTAR	Instituto Francês de Ciência e Tecnologia para Transporte, Desenvolvimento e Redes ( <i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux</i> )
ISA	Ataque interno por sulfato ( <i>Internal Sulfate Attack</i> )
LOI	Perda ao fogo ( <i>Loss on Ignition</i> )
MCS	Material cimentício suplementar
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MG	Minas Gerais
Na,K-C-S-H	Gel álcali silicato de cálcio hidratado
OCA	Fissuras abertas ou em rede em agregados graúdos ( <i>opened cracks in aggregates</i> )
OCAG	Fissuras abertas ou em rede com produto de reação em agregados graúdos ( <i>opened cracks with reaction product in aggregate</i> )
PE	Pernambuco
RAA	Reação álcali-agregado
RAC	Reação álcali-carbonato
RAS	Reação álcali-sílica
TG	Termogravimetria
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UR	Umidade relativa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1	OBJETIVOS.....	25
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	25
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	25
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	26
<b>2</b>	<b>MINÉRIO DE FERRO .....</b>	<b>27</b>
2.1	COPRODUTOS DE MINÉRIO DE FERRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	29
2.1.1	<i>Coproducto de minério de ferro como agregado miúdo no concreto.....</i>	31
<b>3</b>	<b>MECANISMOS EXPANSIVOS .....</b>	<b>33</b>
3.1	REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO .....	34
3.1.1	<i>Agregados.....</i>	36
3.1.2	<i>Álcalis.....</i>	39
3.1.3	<i>Condições ambientais .....</i>	41
3.2	ETRINGITA TARDIA .....	43
3.2.1	<i>Aquecimento do concreto .....</i>	44
3.2.2	<i>Dosagem.....</i>	48
3.2.3	<i>Composição química e mineralógica.....</i>	51
3.2.4	<i>Condição de exposição.....</i>	54
3.3	INTERAÇÃO ENTRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E ETRINGITA TARDIA	56
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>61</b>
4.1	MATERIAIS .....	62
4.1.1	<i>Cimento .....</i>	62
4.1.2	<i>Agregados.....</i>	65
4.1.3	<i>Água .....</i>	76
4.1.4	<i>Aditivos e adições.....</i>	76
4.2	MÉTODOS.....	77
4.2.1	<i>Moldagem de corpos de prova.....</i>	77
4.2.2	<i>Tratamento térmico e cura.....</i>	81
4.2.3	<i>Monitoramento das reações expansivas .....</i>	84
4.2.4	<i>Caracterização do concreto .....</i>	87

4.2.5	<i>Tratamento estatístico</i> .....	98
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>100</b>
5.1	VARIAÇÃO DIMENSIONAL .....	100
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO .....	101
5.2.1	<i>Ensaio não-destrutivo</i> .....	102
5.2.2	<i>Caracterização física</i> .....	106
5.2.3	<i>Caracterização mecânica</i> .....	110
5.2.4	<i>Análise microestrutural</i> .....	117
5.2.5	<i>Caracterização química</i> .....	126
5.3	RESUMO GERAL.....	130
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>131</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>133</b>
	<b>APÊNDICE A – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CONCRETO PARA DIFERENTES TIPOS E CONSUMOS DE CIMENTO</b> .....	<b>154</b>
	<b>APÊNDICE B – CONTROLE DE CONCRETAGENS</b> .....	<b>155</b>
	<b>APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL</b> .....	<b>160</b>
	<b>APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO</b> .....	<b>163</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto tornou-se uma preocupação no meio técnico-científico, tendo em vista que as construções estão cada vez mais acometidas por manifestações patológicas, responsáveis pela deterioração e diminuição da vida útil (ATHIBARANAN; KARTHIKEYAN; RAWAT, 2021). Muitas são as reações existentes que influenciam na durabilidade das estruturas, entre elas as reações que ocorrem devido à presença de componentes deletérios no próprio material, chamadas de reações internas (DELGADO *et al.*, 2021).

Dentre as reações expansivas internas de maior destaque, estão as reações álcali-agregado (RAA) e seus diferentes tipos, bem como a formação de etringita tardia (DEF - *Delayed Ettringite Formation*) (SANCHEZ; DRIMALAS; FOURNIER, 2020). Essas reações já foram encontradas e estudadas em várias estruturas, como em barragens, fundações, pontes, estruturas marinhas e dormentes de ferrovias (JOSHI *et al.*, 2022; MATOS *et al.*, 2022).

A literatura apresenta casos de deterioração do concreto em barragens de concreto no mundo todo, nas quais a degradação é atribuída à reação álcali-agregado (SELLIER *et al.*, 2017; ZHAI *et al.*, 2022). De acordo com Blanco *et al.* (2019), a partir de seus estudos em mais de 15 barragens com problemas de durabilidade, a reação álcali-agregado foi identificada como a principal causa de expansão. Ainda segundo os autores, as reações por ataque interno de sulfatos também acometem estas estruturas, mas em menor número de casos.

No Brasil, principalmente no nordeste do país, blocos sobre estaca e blocos de fundação de pontes e edifícios residenciais são comumente afetados pelas reações expansivas de origem interna ainda em idades precoces (AZEVEDO *et al.*, 2021).

Além das estruturas afetadas isoladamente por DEF ou RAA, algumas pesquisas mostram a existência de estruturas com ambas as reações deletérias, acontecendo concomitantemente. Um dos primeiros estudos que trata das reações expansivas acontecendo simultaneamente foi em dormentes de concreto protendido curados à vapor (SHAYAN; QUICK, 1992).

Blanco *et al.* (2018) apresentaram o caso de uma barragem construída em 1955, no Uruguai, acometida por ambas as reações expansivas. Na Espanha, também foi relatado o caso de uma barragem, construída em 1971, que apresentou expansão por reação álcali agregado e ataque interno por sulfatos (CAMPOS *et al.*, 2018).

Além das barragens, o dano em concreto combinado das reações expansivas também é encontrado em pontes. Em Portugal, sete pontes localizadas sobre o reservatório da barragem da Aguieira foram diagnosticadas com as duas reações (SANTOS; XU; SILVA, 2022).

As reações expansivas não afetam as propriedades mecânicas do concreto da mesma forma. Estruturas de concreto que desenvolvem reações deletérias por RAA e DEF mostram que as expansões se comportam de maneira anisotrópica e que a cinética delas desempenha um papel importante na deterioração e no comprometimento estrutural (HAYES *et al.*, 2020). Por isso, estudos em laboratório, os quais consideram o cenário mais acelerado, podem servir como referência para quantificar o progresso dos danos gerados pelas expansões deletérias (SANCHEZ *et al.*, 2018).

Ao considerar danos estruturais causados por DEF e RAA, as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade são afetadas negativamente. O desempenho das estruturas de concreto e seu estado limite último é mais afetado pelas mudanças da resistência à tração e módulo de elasticidade que influenciam de maneira contundente na proporção das fissurações e deformações (JOSHI *et al.*, 2022; MOHAMMADI; GHIASVAND; NILI, 2020).

A garantia da durabilidade das edificações envolve a combinação de materiais e detalhes estruturais adequados (ALEXANDER; BEUSHAUSEN, 2019). Visando a redução da emissão de CO<sub>2</sub>, o aumento da durabilidade das edificações é uma das formas encontradas para atingir uma maior vida útil e, conseqüentemente, os objetivos de sustentabilidade (HOOTON; BICKLEY, 2014).

Também associado à busca pelo desenvolvimento sustentável, diversos são os estudos com a incorporação de materiais alternativos na produção do concreto, principalmente aqueles descartados por outros setores da indústria. Os materiais alternativos, quando em substituição aos agregados naturais, também diminuem os impactos ambientais causados pela exploração desses recursos (AHMAD *et al.*, 2021).

Dentre os materiais que vêm sendo utilizados em substituição total ou parcial de agregados miúdos no concreto, são destacados: a escória de ferro-níquel, o agregado miúdo reciclado, os restos de borracha moída, as limalhas de aço, os resíduos de vidro triturado, entre outros (BU *et al.*, 2022; GARG; SATYAPRAKASH, 2022; LIU *et al.*, 2020; REN *et al.*, 2022; SRIKANTH; LALITHA, 2022). Associados a estes citados, os resíduos produzidos na extração e beneficiamento de minério de ferro também estão sendo cada vez mais estudados como substituto ao agregado em concretos (PROTASIO *et al.*, 2021).

A utilização de subprodutos de minério de ferro como agregado, em substituição a areia natural, já foi estudada em concretos de alta resistência, ultra alto desempenho, concretos de

barragens e concretos convencionais em diferentes teores de incorporação (JAYASIMHA; SUJINI; ANNAPURNA, 2022; LV *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2021; ZHAO; FAN; SUN, 2014).

Uma vez que a vida útil e a durabilidade do concreto estão relacionadas com os materiais utilizados na sua confecção, existe a necessidade de avaliação da aplicabilidade da areia de minério de ferro (ALEXANDER; BEUSHAUSEN, 2019). Por ser um material desenvolvido recentemente, análises quanto às características dessa areia como agregado e sua influência nas propriedades do concreto devem ser realizadas.

A partir do exposto, surge a proposta do presente trabalho, sendo apresentados a seguir os objetivos almejados.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 *Objetivo Geral*

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a interação dos mecanismos expansivos de origem interna em concretos produzidos com areia proveniente do processo de extração de minério de ferro, como agregado miúdo.

### 1.1.2 *Objetivos específicos*

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, foram pautados os seguintes objetivos específicos:

- Investigar as características físicas e químicas da areia de minério de ferro;
- Desenvolver mecanismos expansivos atuando separadamente e conjuntamente em concretos produzidos com areia de rejeito;
- Avaliar a influência das reações expansivas nas propriedades químicas, físicas e mecânicas do concreto;
- Validar, possivelmente, a utilização do coproduto de minério de ferro como agregado miúdo no concreto.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi dividido em seis capítulos, sendo:

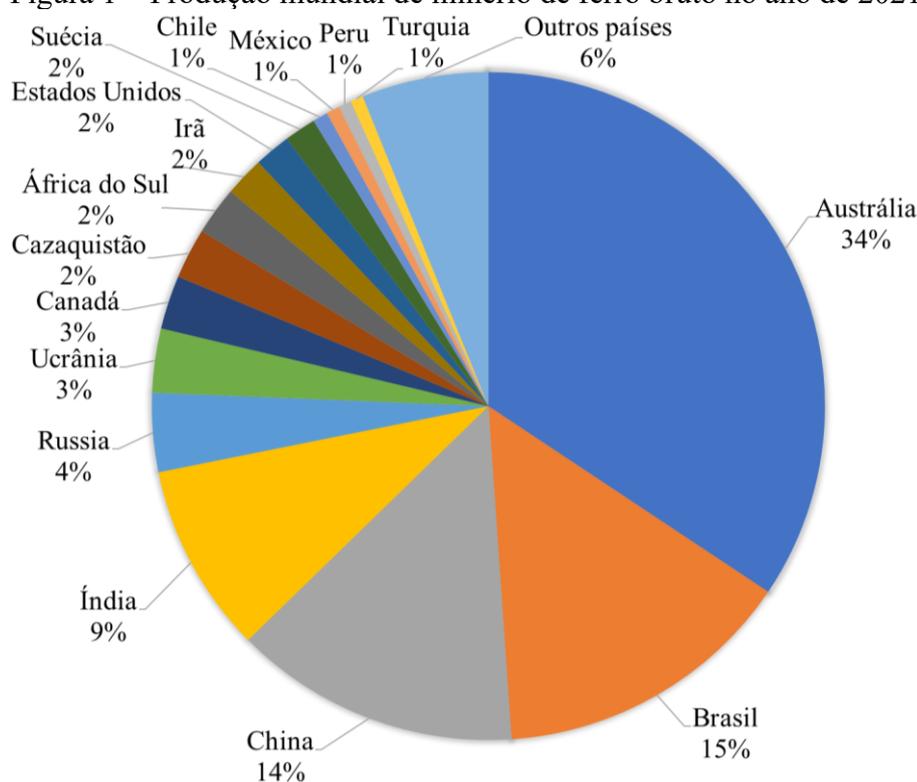
- Capítulo 1 (Introdução): Contempla a relevância do tema selecionado para o estudo, além da delimitação do problema de pesquisa, seus objetivos e estrutura do trabalho;
- Capítulo 2 (Minério de ferro): Apresenta informações sobre o minério de ferro, os dados mundiais da extração de minérios e produção de resíduos, e a aplicabilidade dos coprodutos de minério de ferro no setor da construção civil;
- Capítulo 3 (Mecanismos expansivos): Aborda conceitos referentes aos mecanismos expansivos de origem interna no concreto, sendo apresentadas as reações álcali-agregado, etringita tardia e interação entre essas reações. São compreendidas as reações químicas dos processos e os fatores influentes.
- Capítulo 4 (Programa experimental): Contém a apresentação do programa experimental desta pesquisa, incluindo as variáveis analisadas, os materiais e os métodos empregados.
- Capítulo 5 (Resultados e discussões): Engloba a apresentação dos resultados, bem como o tratamento estatístico para sua validação, a análise e discussão, correlacionando-os com os dados existentes na literatura.
- Capítulo 6 (Conclusão): Contempla as considerações finais e as conclusões, juntamente com sugestões para trabalhos futuros.

## 2 MINÉRIO DE FERRO

As *commodities*, produtos que servem como matéria-prima para a produção de outras mercadorias, estão inseridas em um mercado que movimentava bilhões de dólares anualmente (FERNANDES *et al.*, 2022). O Brasil contém consideráveis reservas minerais, abrigando o segundo maior depósito de ferro do mundo, o quarto maior depósito de bauxita, e o sexto maior recurso de ouro, sendo a exploração mineral significativamente importante dentro da economia (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2022).

O ferro é o quarto elemento mais abundante e responde por cerca de 5% da crosta terrestre, sendo encontrado na forma de minério. As maiores quantidades de minério de ferro são extraídas na Austrália, Brasil, China e Índia, conforme mostrado na Figura 1. Apesar de ser um material essencial para a fabricação de outros produtos, como o aço, a extração desse minério gera bilhões de toneladas por ano de resíduos de minério de ferro (CARMIGNANO *et al.*, 2021; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2022).

Figura 1 – Produção mundial de minério de ferro bruto no ano de 2021

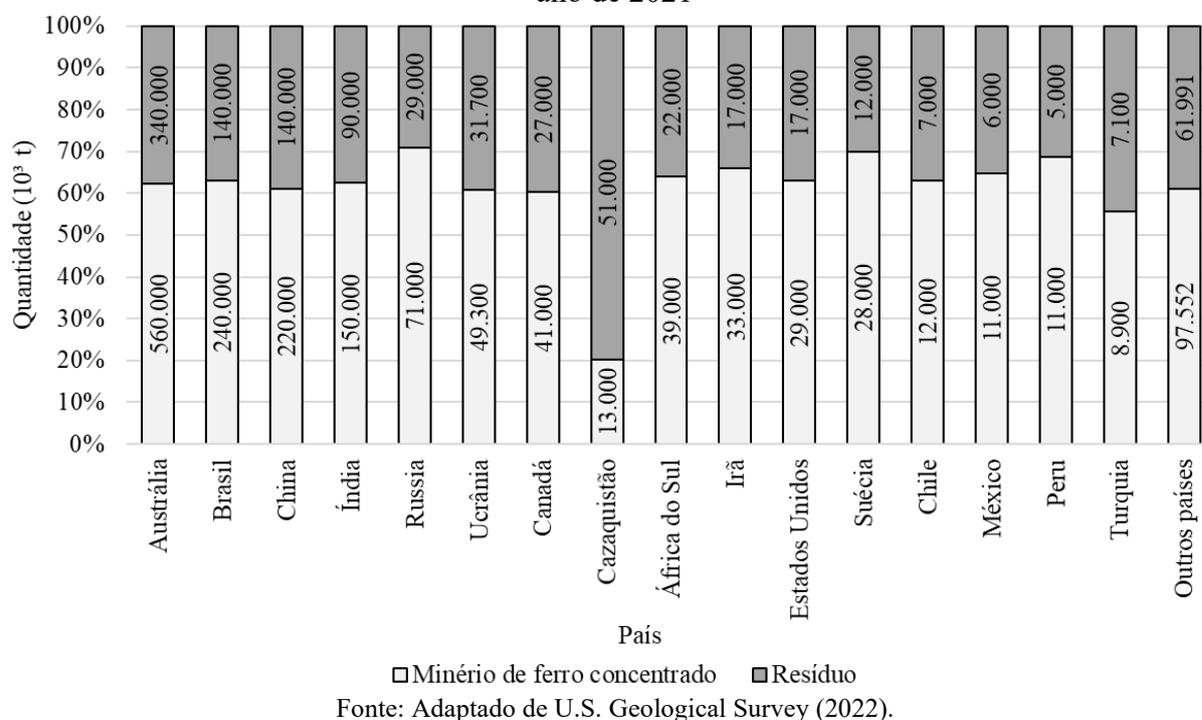


Fonte: Adaptado de U.S. Geological Survey (2022).

Conforme os dados apresentados na Figura 2, a geração de resíduos de minério de ferro representa cerca de 40% do total extraído, com exceção de alguns países, como no Cazaquistão.

No ano de 2021 foram extraídos, mundialmente, aproximadamente 2,7 bilhões de toneladas de minério de ferro, sendo 1 bilhão de resíduos.

Figura 2 – Gráfico representando a quantidade de minério concentrado e de resíduo gerado no ano de 2021



No Brasil, de acordo com o Anuário Mineral Brasileiro de 2021, os estados de Minas Gerais e Pará se destacam na extração de minério de ferro, sendo o quadrilátero ferrífero e a serra de Carajás as principais regiões de extração. A produção nesses estados representa cerca de 90% da total brasileira (BRASIL, 2021).

Conforme apresentado, a partir da extração do minério bruto, diferentes teores de resíduos são gerados. A diferença de porcentagem é influenciada pela pureza do minério, devido às diferentes formações geológicas, e forma de beneficiamento (ALMADA *et al.*, 2023). O processamento do minério pode ser realizado utilizando água ou a seco, sendo o primeiro mais utilizado pelas indústrias brasileiras por necessitar de menos energia e ter um menor custo. No entanto, em ambos os métodos são gerados subprodutos (CHELGANI *et al.*, 2019).

As etapas do beneficiamento consistem em fragmentar e reduzir o tamanho das partículas do minério bruto, seguida da separação e classificação das partículas por peneiramento. O produto destas etapas é submetido à flotação, consistindo na fase de concentração, uma vez que o minério é separado dos subprodutos (HALDAR, 2018).

A partir do beneficiamento são obtidos três tamanhos de partículas de rejeito de minério de ferro: rochas produzidas por trituração mecânica, com granulometria acima de 4,75 mm e utilizados como agregados graúdos; areias produzidas pela moagem e filtragem do minério de ferro, com granulometria entre 0,16 e 4,75 mm e utilizadas com agregado miúdo; e resíduos em pó, com partículas inferiores a 0,16 mm e empregados como adições mineral no concreto (SÁ *et al.*, 2022).

Por se tratar de um material de reduzido valor econômico, composto por areia e finas partículas de metais, e produzido em grandes volumes, estes devem ser armazenados de forma a evitar maiores danos ambientais, sendo as barragens a forma encontrada como sendo a mais apropriada para fazer a estocagem desses produtos (PICIULLO *et al.*, 2022).

Aliadas às consequências primárias da extração de minérios, estão as implicações do acúmulo dos subprodutos em barragens de contenção. A deposição desses materiais provoca mudanças de declividade da terra, gera maiores riscos de erosão e de poluição da água, afeta a biodiversidade e causa impactos na produção agrícola local e saúde da população (JAYASIMHA; SUJINI; ANNAPURNA, 2022).

Uma possibilidade encontrada por alguns pesquisadores é o processamento desses materiais e sua caracterização, pretendendo sua posterior reutilização.

## 2.1 COPRODUTOS DE MINÉRIO DE FERRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os coprodutos de minério de ferro, além de serem usados na indústria cerâmica, também são inseridos na indústria da construção civil como substituto do cimento e do agregado miúdo (DUARTE *et al.*, 2022; FONTES *et al.*, 2019; MAGALHÃES *et al.*, 2018; SHETTIMA *et al.*, 2016). Já existem estudos da utilização desse material na fabricação de argamassas, concretos, concretos de ultra alto desempenho, tintas e ainda como camadas de pavimentação (FONTES *et al.*, 2016; GALVÃO *et al.*, 2018; LING *et al.*, 2021; SÁ *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2021).

Mendes *et al.* (2019) estudaram a utilização de uma mistura ternária para a produção de tijolos de alvenaria, com até 40% de coproduto de minério de ferro em relação à massa total da mistura, associado a dois tipos de argilas: cinza e amarela. Entre as misturas produzidas, os resultados mais satisfatórios foram das amostras com 29,1% de coproduto, 40,9% de argila cinza e 30% de argila amarela, a qual apresentou 20,94% de absorção de água e 4,27 MPa de resistência à compressão.

Apesar da utilização do coproduto de minério de ferro na produção cerâmica contribuir para o desenvolvimento de um produto sustentável, o método tradicional de produção, através de fornos a altas temperaturas, ainda é uma fonte de elevada emissão de CO<sub>2</sub>. Com isso, a produção de cerâmicas álcali ativadas com resíduos de minério de ferro, sem a necessidade de queima, foi uma alternativa desenvolvida (THEJAS; HOSSINEY, 2022).

Além da produção cerâmica, os coprodutos de minérios de ferro também foram estudados para a produção de tintas, as quais apresentaram cor avermelhada, opacidade adequada, resultados satisfatórios em relação à durabilidade a um custo significativamente menor quando comparado com as tintas convencionais (GALVÃO *et al.*, 2018).

Outra forma estudada por pesquisadores é a incorporação dos resíduos em obras de pavimentação. Sá *et al.* (2022) estudaram misturas solo-cimento com coprodutos de minério de ferro e os resultados mostraram propriedades mecânicas satisfatórias. Cao *et al.* (2022) avaliaram a viabilidade dos coprodutos como agregados graúdos na mistura asfáltica e concluíram que as propriedades físicas convencionais dos resíduos podem atender aos requisitos técnicos para aplicação em pavimentos.

Também existem estudos da incorporação do subproduto de minério de ferro na produção de argamassas de assentamento e revestimento em substituição ao agregado e à cal, argamassas de revestimento coloridas com substituição do cimento Portland e argamassas estruturais com adição de rejeito (ALMADA *et al.*, 2023; FONTES *et al.*, 2016; MORAIS *et al.*, 2021).

Apesar das diversas aplicações, a incorporação desses materiais em concreto, seja por meio de substituição do cimento ou do agregado, é o que representa maior número de estudos. Quando em substituição ao cimento, os resíduos ainda apresentam aplicabilidade limitada, uma vez que estes apresentam baixa atividade pozolânica, necessitando de ativação (ZHAO *et al.*, 2021).

Conforme Zhang, Tang e Liu (2021), os resíduos de minério de ferro possuem uma composição majoritariamente de minerais inertes, como o quartzo e a hematita. Com isso, a sua utilização como um material cimentício suplementar (MCS) reduz a resistência devido à baixa propriedade cimentante. Todavia, o autor cita a possibilidade de ativação da característica cimentante por meio de ativação mecânica, térmica e hidrotérmica.

Já a substituição, parcial ou total, dos agregados miúdos é favorecida pela composição do material, semelhante à do agregado natural que, principalmente, contém sílica, alumina, ferro, magnésio e cálcio (ZHANG, W. *et al.*, 2020).

Esta utilização, além de impactar de forma positiva na redução de resíduos de mineração acumulados em barragens, também contribui para a produção de um material alternativo, já que o consumo de agregados naturais pela indústria da construção civil tende à escassez das reservas (JAYASIMHA; SUJINI; ANNAPURNA, 2022).

A seguir, são apresentados estudos que utilizaram os coprodutos de minério de ferro como um substituto para o agregado miúdo no concreto.

### 2.1.1 Coproduto de minério de ferro como agregado miúdo no concreto

Para a produção do aço, é necessária a extração de minérios de ferro, gerando quantidades significativas de subprodutos. O concreto, por sua vez, é majoritariamente composto por agregados, derivados de exploração de leitos de rios e britagem de rochas. A partir da disponibilidade de material arenoso proveniente da produção de minério de ferro, a tendência de escassez das areias naturais e os problemas causados por sua exploração, surgiu a possibilidade de incorporação do coproduto de mineração como substituto ao agregado miúdo (JAYASIMHA; SUJINI; ANNAPURNA, 2022; PROTASIO *et al.*, 2021).

Liu, K. *et al.* (2022) estudaram as propriedades mecânicas, o ataque por sulfato e a resistência a ciclos de secagem e molhagem em concretos com 0, 20, 40, 60, 80 e 100% de substituição da areia por coproduto de minério de ferro. Como resultado, foi observado o melhor desempenho da amostra com 40% nos ensaios realizados, uma vez que apresentou menor porosidade e maior densidade microestrutural.

Segundo Zhao *et al.* (2021), um concreto produzido com um teor apropriado de areia de minério de ferro resulta em propriedades mecânicas e de durabilidade satisfatórias. No entanto, os autores atentam para o volume de areia incorporado, já que quanto maior a incorporação, menor é a trabalhabilidade. O efeito negativo no estado fresco pode ser explicado pela menor dimensão das partículas de areia de minério de ferro e sua forma mais angular e irregular quando comparada com areia natural (LV *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2021).

A pesquisa de Protasio *et al.* (2020), com substituição de 10, 20 e 30% de areia natural por areia de minério de ferro, também corrobora quanto à redução da trabalhabilidade e aumento de resistência mecânica, e acrescenta que a utilização deste resíduo tem influência na redução do diâmetro dos poros do concreto.

O estudo de Zhang, Z. *et al.* (2020) contradiz as pesquisas citadas anteriormente, afirmando que a areia de minério de ferro possui granulometria e o módulo de finura semelhantes à areia natural, podendo ser utilizada como uma substituição completa para

produzir concreto com trabalhabilidade equivalente e maiores resistência mecânica e módulo de elasticidade. Todavia, os autores citam uma retração de 13,3% maior no concreto produzido com o resíduo.

No estudo de Lv *et al.* (2021) sobre concreto de barragens é discutida a utilização de agregados de minério de ferro como um substituto para os agregados naturais. Os resultados mostram que o concreto preparado com o agregado de minério de ferro tem maior durabilidade do que o concreto com agregado convencional em termos de permeabilidade ao íon cloreto, corrosão por sulfato e resistência à abrasão-erosão.

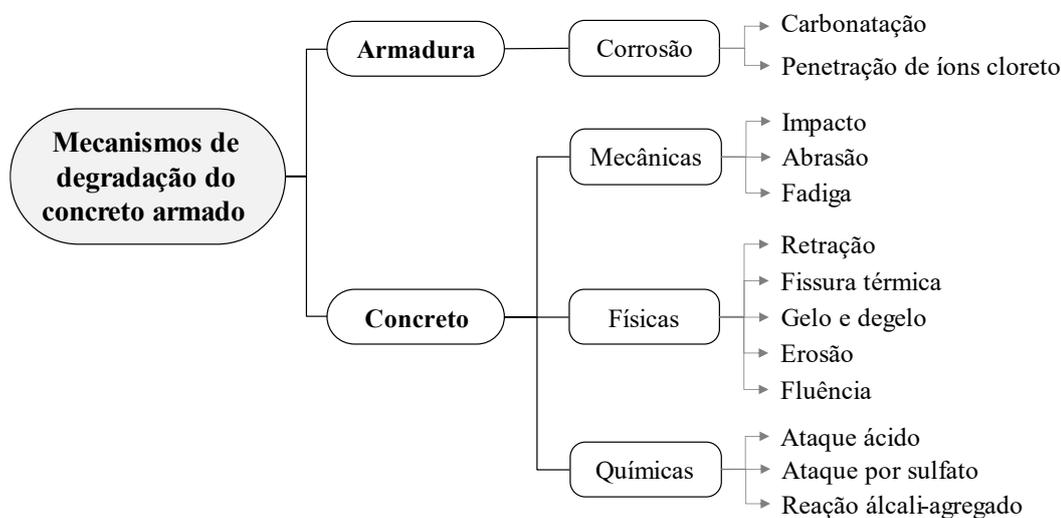
A partir dos estudos já existentes sobre a utilização de areia de minério de ferro como agregado miúdo na produção de concreto, surge a necessidade de avaliação deste material quanto a sua influência nas reações deletérias de origem interna.

### 3 MECANISMOS EXPANSIVOS

A constante busca por sustentabilidade visando a conservação de recursos naturais, em especial no setor da construção civil, conforme abordado no capítulo anterior, está relacionada com o aumento da vida útil das estruturas de concreto (FIGUEIRA *et al.*, 2019). As interações ambientais com as propriedades físico-químicas do concreto resultam na redução da durabilidade deste material por meio de reações álcali-agregado, ataques por sulfato, gelo e degelo, corrosão de armaduras nos concretos armados, dentre outros mecanismos de degradação (LI, J. *et al.*, 2020).

Os mecanismos de degradação das estruturas de concreto são divididos entre aqueles que acometem as armaduras ou o concreto, conforme Figura 3. As principais causas de deterioração das armaduras estão relacionadas ao ingresso de agentes externos agressivos, como CO<sub>2</sub> e cloretos, provocando as reações de carbonatação e cloreto (MARTÍN *et al.*, 2022). Já o concreto pode ser acometido por processos mecânicos, físicos e/ou químicos.

Figura 3 – Principais mecanismos de degradação do concreto armado



Fonte: Adaptado de Dyer (2014) e Medeiros, Andrade e Helene (2022).

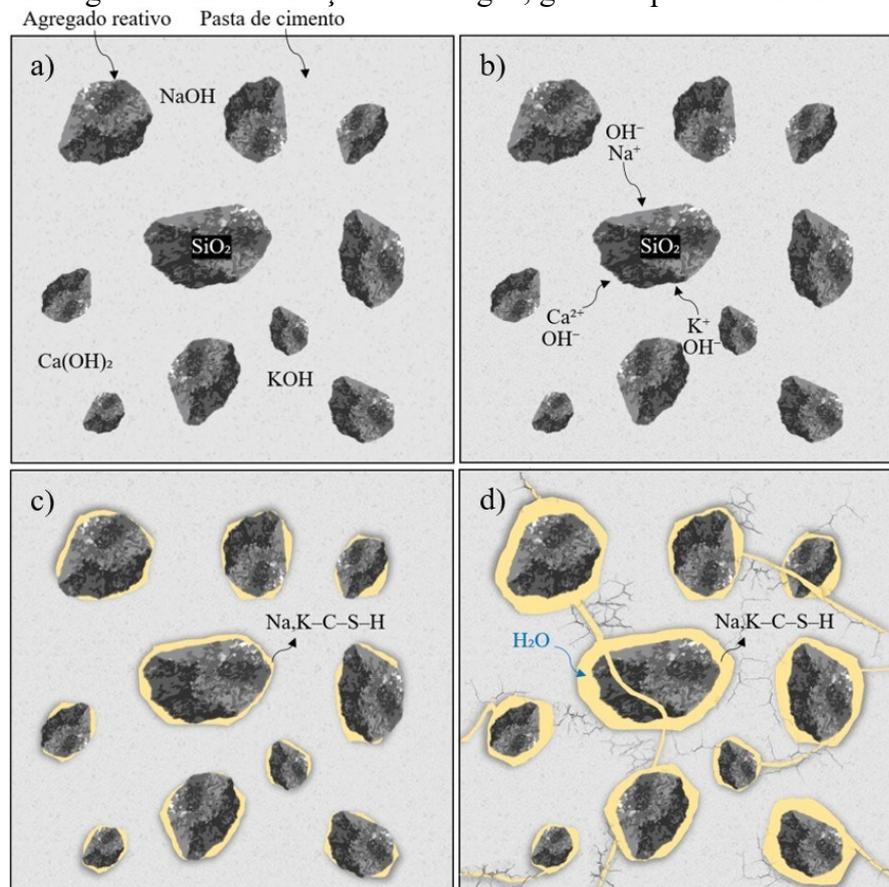
Os mecanismos expansivos são caracterizados como processos químicos de degradação, podendo favorecer outros processos de deterioração por meio da entrada de agentes agressivos pelas fissuras geradas (FIGUEIRA *et al.*, 2019). Dentre eles, destacam-se as reações álcali-agregado e etringita tardia, que em determinadas condições de temperatura e umidade levam à expansão, formação de microfissuras e mudanças nas propriedades mecânicas dos elementos afetados (LACOMBE *et al.*, 2022; NOËL; SANCHEZ; TAWIL, 2018; RAMU *et al.*, 2021).

### 3.1 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação química entre determinadas fases minerais dos agregados considerados reativos e os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto, gerando reações deletérias (NOËL; SANCHEZ; TAWIL, 2018). As expansões associadas à RAA têm provocado a degradação de barragens, estruturas hidráulicas, pavimentos, pontes e barreiras, reduzindo a vida útil de serviço, a capacidade de carga e a segurança das estruturas de concreto (MATOS *et al.*, 2022). As reações entre os agregados e a pasta de cimento hidratada do cimento podem ser álcali-sílica ou álcali-carbonato, sendo a primeira mais frequente (LU *et al.*, 2022).

A reação álcali-sílica (RAS) ocorre entre os materiais silicosos dos agregados, em especial, a sílica reativa, o cálcio e álcalis disponíveis na solução dos poros do concreto advindos do cimento, formando o gel álcali silicato de cálcio hidratado (Na,K-C-S-H), conforme ilustrado na Figura 4 (TAPAS *et al.*, 2023).

Figura 4 – Processo de formação da RAS: a) compostos presentes na reação; b) dissolução dos álcalis, liberação de hidroxilas e interação com a sílica dos agregados; c) formação do gel; d) expansão do gel devido à interação com a água, gerando pressões internas e fissuração



Fonte: Autora (2023).

De acordo com Mohammadi, Ghiasvand e Nili (2020), as principais características do gel formado, as quais provocam o efeito deletério, são a hidrofiliabilidade e a expansibilidade. No entanto, os autores ainda citam a influência das propriedades reológicas do gel na geração de pressões nos vazios, sendo que quanto maior a tensão de escoamento e a viscosidade, maior é a tensão de tração sobre o concreto.

Como resultado, a pressão hidráulica desenvolvida pode ser suficiente para causar expansão e fissuração do agregado e da pasta de cimento que o envolve quando a tensão de tração produzida pelo gel é superior à suportada pelo concreto (LU *et al.*, 2022).

Já a reação álcali-carbonato (RAC) ocorre entre a dolomita dos agregados carbonatados e os álcalis do cimento, sendo que o efeito patológico desta reação está na “desdolomitização” do agregado e formação de brucita ( $Mg(OH)_2$ ), calcita ( $CaCO_3$ ) e carbonato alcalino, conforme Equação 1 (GRAZIA *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2022).



Sendo:

$CaMg(CO_3)_2$ : Carbonato de cálcio e magnésio (dolomita);

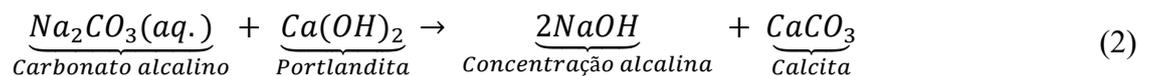
$NaOH(aq.)$ : Hidróxido de sódio aquoso (soda cáustica);

$Mg(OH)_2$ : Hidróxido de magnésio (brucita);

$CaCO_3$ : Carbonato de cálcio (calcita);

$Na_2CO_3(aq.)$ : Carbonato de sódio aquoso (carbonato alcalino).

Conforme os autores supracitados, o carbonato alcalino gerado pode continuar a reagir com a portlandita ( $Ca(OH)_2$ ) das pastas de cimento e formar calcita secundária, permitindo que a reação continue até que toda a dolomita reaja completamente, conforme Equação 2.



Sendo:

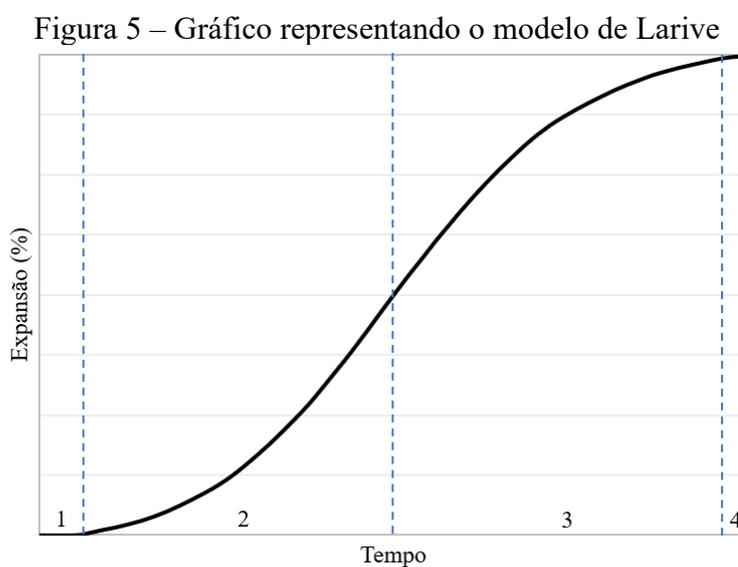
$Na_2CO_3(aq.)$ : Carbonato de sódio aquoso;

$Ca(OH)_2$ : Hidróxido de cálcio (cal hidratada);

$NaOH$ : Hidróxido de sódio (soda cáustica);

$CaCO_3$ : Carbonato de cálcio.

De acordo com o modelo de Larive desenvolvido em 1997, apresentado na Figura 5, a expansão induzida por RAA pode ser dividida e explicada em quatro fases. A primeira representa a formação de produtos secundários e sua acomodação no interior do concreto, com pouca ou nenhuma expansão. A segunda representa o processo de expansão, com pouca ou limitada fissuração, induzido por RAA com a absorção de umidade. A terceira fase, iniciada no ponto de inflexão da curva, representa a maior deterioração do material, tendendo a diminuir a taxa de expansão por RAA, já que as fissuras garantem um maior espaço para que os produtos da reação sejam formados. Por fim, a quarta fase mostra o consumo total dos reagentes do sistema (GRAZIA et al., 2021).



Segundo Noël, Sanchez e Tawil (2018), o desgaste significativo do concreto devido a estas reações pode variar de dois a mais de 25 anos, a depender dos fatores influentes na reação. As três principais condições que induzem a formação de RAA são a presença de agregado reativo, teor de álcalis suficiente e condições de exposição do concreto, principalmente temperatura e umidade, os quais são apresentados a seguir (KAWABATA *et al.*, 2019; LACOMBE *et al.*, 2022).

### 3.1.1 Agregados

A reação álcali-agregado reduz significativamente as propriedades do concreto, em diferentes proporções, a depender da natureza e potencial de reatividade do agregado (MOHAMMADI; GHIASVAND; NILI, 2020). Conforme apresentado anteriormente, as

reações álcali-silica e álcali-carbonato ocorrem pela reação da sílica e dolomita contidas nos agregados. Essas fases reativas podem existir em numerosas rochas, como basalto, opala, calcário dolomítico, chert, andesito, dacito, quartzito, riolito, granito, gnaiss, siltito, entre outras (CARLES-GIBERGUES; HORNAIN, 2014; FANIJO; KOLAWOLE; ALMAKRAB, 2021).

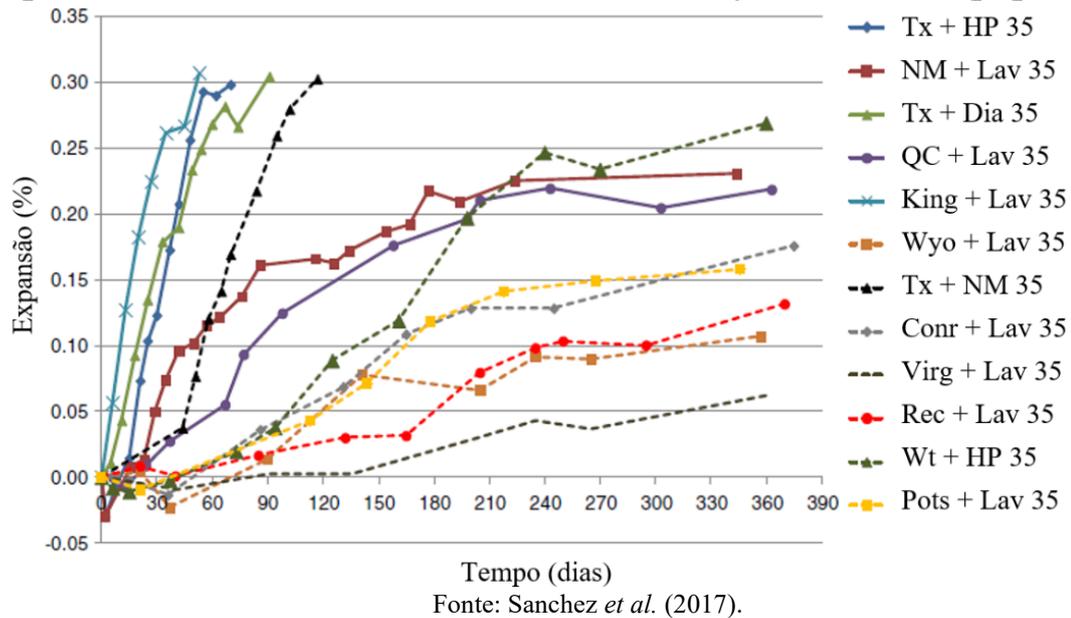
No estudo de Sanchez *et al.* (2017) foram testados 20 tipos diferentes de concretos com oito agregados graúdos e dois miúdos reativos, de procedências distintas, misturados a um agregado graúdo e dois miúdos não reativos. No Quadro 1 estão apresentadas as informações sobre os agregados estudados e na Figura 6 são mostrados os resultados de expansão, em função do tempo, obtidos para um concreto de 35 MPa.

Quadro 1 – Procedência e tipos de rochas estudadas

<b>Agregado</b>	<b>Reatividade</b>	<b>Procedência</b>	<b>Tipo de rocha</b>	
Graúdo	NM	R (RAS)	Novo México (EUA)	Cascalho polimítico (vulcânicos mistos, quartzito, chert)
	QC	R (RAS)	Quebec (CAN)	Calcário silicoso e argiloso
	Wyo	R (RAS)	Wyoming (EUA)	Granito, anfíbolito, vulcânicos mistos
	Conr	R (RAS)	Halifax (CAN)	Metagrauvacas, xisto, siltito
	King	R (RAS)	Kingstone (CAN)	Calcário dolomítico argiloso
	Virg	R (RAS)	Virginia (EUA)	Metagranito
	Rec	R (RAS)	Recife (BRA)	Granito, gnaiss, milonito
	Pots	R (RAS)	Montreal (CAN)	Arenito silicoso (ortoquartzito)
	Dia	NR	Quebec (CAN)	Diabásio (rocha plutônica)
	HP	NR	Terra Nova (CAN)	Calcário de alta pureza de granulação fina
Miúdo	Tx	R (RAS)	El Paso (EUA)	Areia polimítica (granito, vulcânicos mistos, quartzito, chert, quartzo)
	Wt	R (RAS)	Corpus Cristhi (EUA)	Areia polimítica (chert, quartzo, feldspato)
	Lav	NR	Quebec (CAN)	Areia natural derivada de granito

Fonte: Adaptado de Sanchez *et al.* (2017).

Figura 6 – Resultado do estudo de RAA com diferentes tipos/naturezas de agregados



Além da influência do potencial de reatividade, a proporção de agregado reativo pelo total de agregados no concreto, bem como sua dimensão, são fatores influentes na reação álcali-agregado. Esses aspectos do agregado geram, conforme abordado pela literatura, o “efeito péssimo”. Quando os valores são superiores ou inferiores ao teor péssimo, ocorre a diminuição da expansão (BINAL, 2015; JOO; TAKAHASHI, 2021; PEDERSEN; WIGUM; LINDGÅRD, 2016).

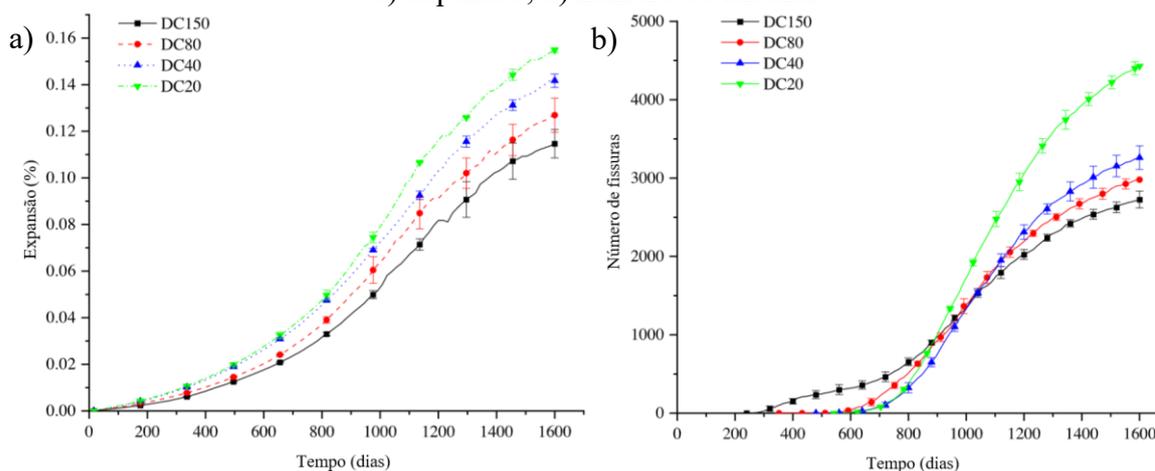
Binal (2015) estudou a expansão de seis agregados reativos (opala, chert, calcedônia, andesitos, ignimbrito e dolomita) em diferentes proporções no concreto, sendo opala, chert e calcedônia, no teor péssimo, com dimensões entre 0,074 e 4,76 mm. Os teores péssimos encontrados para os agregados citados são dependentes do teor de sílica reativa na composição, e foram respectivamente: 20, 40, 50, 80 e 50%, sendo a dolomita caracterizada como inócua. O efeito péssimo com base na dimensão do agregado foi obtido entre os valores de 0,15 e 0,30 mm.

O tamanho dos agregados também pode afetar a formação de fissuras, as quais se propagam entre ou através dos agregados, na zona de transição e/ou na pasta de cimento (DUNANT; SCRIVENER, 2012; NOËL; SANCHEZ; TAWIL, 2018). Em agregados maiores, a penetração de álcalis é menor, fazendo com que a reação demore mais para ocorrer, no entanto, a formação de fissuras ocorre mais rápido e essas são maiores, favorecendo a redução de pressão causada pelos produtos formados (JOO; TAKAHASHI, 2021).

No estudo de Pan *et al.* (2022) foram confeccionados concretos de barragens com diferentes granulometrias de agregados graúdos, sendo: 5 - 20 mm (DC20), 20 - 40 mm (DC40),

40 - 80 mm (DC80) e 80 - 150 mm (DC150). Os resultados, conforme apresentado na Figura 7 (a-b), mostraram que o concreto com agregado de maior dimensão possuiu a menor expansão após 1600 dias, mas apresentou fissuras em estágios anteriores aos demais concreto. Isso denota a significativa influência do tamanho dos agregados na expansão e na formação de fissuras.

Figura 7 – Resultados do estudo de RAA com diferentes granulometrias de agregado graúdo: a) expansão; b) número de fissuras



Fonte: Pan *et al.* (2022).

Para que a reação álcali-agregado ocorra, além da presença do agregado reativo, é necessária a presença de álcalis. Alguns agregados, apesar de considerados não reativos, contribuem para a RAA por meio da liberação de álcalis na solução dos poros em algumas fases minerais, como feldspatos alcalinos, micas, zeólitos e minerais argilosos (FIGUEIRA *et al.*, 2019; RAJABIPOUR *et al.*, 2015).

### 3.1.2 Álcalis

Os álcalis, presentes na solução dos poros do concreto, provêm principalmente do cimento Portland, mas também podem ser advindos de outras fontes, como aditivos (retardadores, redutores de água e incorporadores de ar), adições (pozolanas, microssílica e cinza volante), agregados (micas e feldspatos) e água de amassamento (FANIJO; KOLAWOLE; ALMAKRAB, 2021; FIGUEIRA *et al.*, 2019).

Visando mitigar a reação, os valores-limite dos álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$ ) contidos no cimento Portland (expressos em termos de conteúdo equivalente a  $\text{Na}_2\text{O}$ ) foram limitados a valores inferiores a 0,6% por massa (KRIVENKO *et al.*, 2014). No entanto, por conta das demais fontes de álcalis, somente essa limitação não é efetiva na atenuação das expansões por

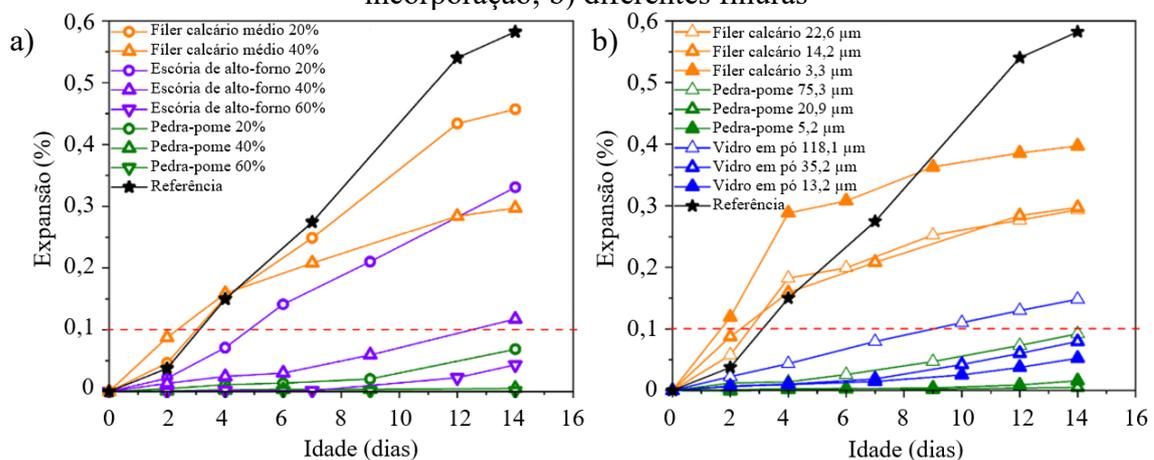
RAA (FIGUEIRA *et al.*, 2019). A partir disso, a ASTM C 1778:2022d apresenta especificações quanto ao uso de adições para prevenir as expansões por RAA e valores máximos de álcalis no concreto. O limite de quantidade total de álcalis é fixado em 3,5 kg/m<sup>3</sup> de concreto, de acordo com as recomendações francesas (LACOMBE *et al.*, 2022).

Uma das formas de diminuir a concentração de álcalis na solução dos poros e reduzir o potencial de formação de RAA é por meio da incorporação de adições em substituição parcial do cimento Portland, como cinzas volantes, metacaulim altamente reativo, resíduos de pó de vidro, sílica ativa, cinza de casca de arroz e escória de alto forno (SALIM; MOSABERPAHAH, 2021). Essa redução dos álcalis ocorre pela capacidade dos materiais cimentícios suplementares (MCSs) de ligar os álcalis aos produtos hidratados, como o C-S-H (KASANIYA; THOMAS, 2022).

Essa qualidade dos MCSs está relacionada com a relação CaO/SiO<sub>2</sub>, uma vez que esses são ricos em sílica e pobres em álcalis e cálcio (FIGUEIRA *et al.*, 2019). Conforme Rajabipour *et al.* (2015), as cinzas volantes com baixo teor de cálcio são mais eficazes para aumentar a capacidade de ligação alcalina no C-S-H do que as com alto teor de cálcio. Isso ocorre pela maior capacidade de ligação de íons alcalinos pelo C-S-H com menor relação Ca/Si (SHI *et al.*, 2015).

No estudo de Wang *et al.* (2022), foram incorporados pedra-pome, vidro em pó e escória de alto-forno como MCSs, em diferentes finuras e proporções, sendo as argamassas com cimento e filer calcário utilizadas como controle. À medida que a finura ou nível de substituição aumentou, a expansão por reação álcali-sílica diminuiu, conforme apresentado na Figura 8 (a-b).

Figura 8 – Resultados de expansão com diferentes MCSs: a) diferentes teores de incorporação; b) diferentes finuras



Fonte: Wang *et al.* (2022).

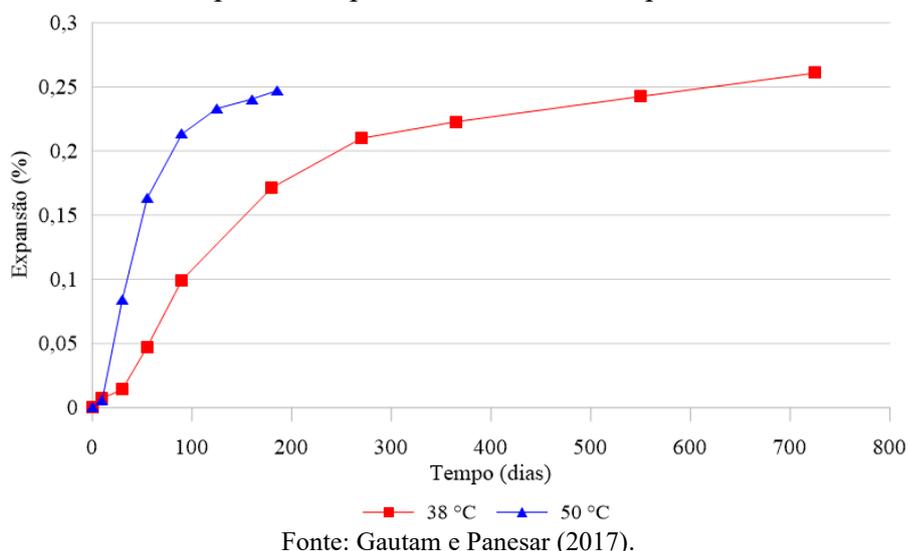
O uso de materiais cimentícios suplementares (MCSs) também contribui na mitigação de RAA por meio da sua capacidade de reduzir a permeabilidade e o transporte de massa no concreto, já que a exposição à água do mar, água subterrânea ou água das indústrias que utilizam solução de sódio e potássio pode aumentar o teor de álcali do concreto (FANIJO; KOLAWOLE; ALMAKRAB, 2021; RAJABIPOUR *et al.*, 2015).

### 3.1.3 Condições ambientais

As condições de exposição do concreto também são fatores influentes na reação álcali-agregado, em especial a temperatura e a umidade. A cinética de RAA é reduzida com a diminuição da temperatura e da saturação, influenciando na expansão do concreto (LACOMBE *et al.*, 2022). De acordo com Kawabata *et al.* (2019), a temperatura interfere de forma significativa na expansão em estágios iniciais de RAA, mais do que em estágios avançados.

Gautam e Panesar (2017) avaliaram a expansão de prismas de concreto submetidos a temperaturas de cura de 38 e 50 °C. Os resultados, conforme apresentados na Figura 9, mostraram que o aumento da temperatura acelerou a expansão das amostras em torno de três vezes.

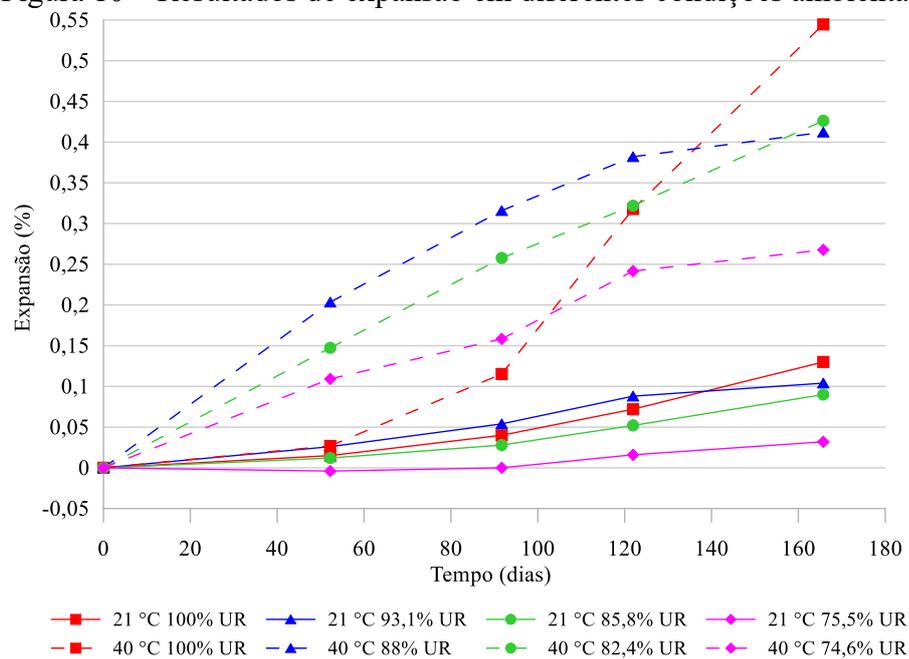
Figura 9 – Resultados da expansão de prismas de concreto expostos a diferentes temperaturas



De acordo com o estudo de Deschenes Junior *et al.* (2018), no qual foi avaliada a influência das condições ambientais sobre a reação álcali-silica, é confirmada a relação entre a expansão e as condições ambientais. A Figura 10 mostra os resultados do estudo em que foram avaliadas a influência da temperatura e umidade na expansão por RAA, mostrando que a

umidade do ambiente influencia o desenvolvimento das reações de forma mais significativa quando combinada com temperaturas mais elevadas. As amostras armazenadas a 40 °C apresentaram um comportamento de expansão similar, com exceção dos exemplares expostos a 100% de umidade. Diferente das amostras expostas a umidades relativas de 93,1, 85,8 e 75,5%, que apresentaram expansões mais rápidas e intensas até os 120 dias, à 100% houve um atraso na expansão. A expansão apresentou aumento significativo após aproximadamente 90 dias, fato que pode ter ocorrido devido ao processo de equilíbrio hídrico nas amostras.

Figura 10 – Resultados de expansão em diferentes condições ambientais



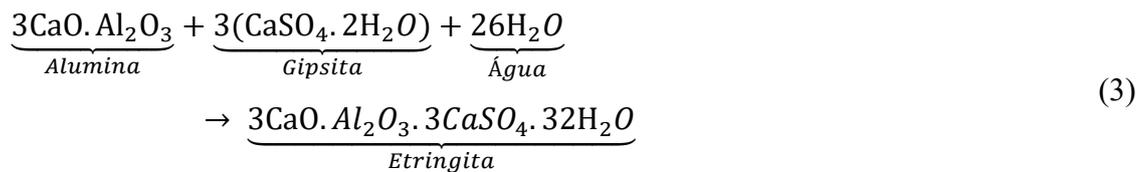
Fonte: Deschenes Junior *et al.* (2018).

Ao se tratar da influência da umidade, essa apresenta um duplo efeito na reação álcali-silica: como agente de transporte e na expansão dos produtos formados (FIGUEIRA *et al.*, 2019). Com isso, conforme Fanijo, Kolawole e Almakrab (2021), a presença de agregado reativo e um alto teor de álcalis resultará em pouca ou nenhuma expansão quando não existir a presença considerável de água.

No entanto, uma vez que o concreto retenha umidade após a formação do gel, no caso da reação álcali-silica, a expansão se desenvolverá em um ritmo acelerado. Por isso, os ciclos de secagem e molhagem são prejudiciais às estruturas de concreto (FIGUEIRA *et al.*, 2019).

### 3.2 ETRINGITA TARDIA

A etringita é identificada sob três formas distintas: a primária, a secundária e a tardia. A primária é resultante da reação ocorrida durante a hidratação do cimento entre o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), presente na composição do clínquer e o regulador de pega ( $CaSO_4$ ), o qual pode estar na forma de gipsita, hemidrato ou anidrita (ANDRADE NETO; LA TORRE; KIRCHHEIM, 2021). Esta reação pode ser dividida em dois estágios, sendo o primeiro ocorrido na presença do sulfato de cálcio, resultando na formação de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt ou etringita), conforme Equação 3. Já o segundo estágio acontece quanto a quantidade de sulfato disponível é exaurida, sendo iniciada a formação de monossulfoaluminato de cálcio (AFm), a forma solúvel da etringita, de acordo com a Equação 4 (DORN; BLASK; STEPHAN, 2022; ZHANG; PAN; ZHANG, 2021).



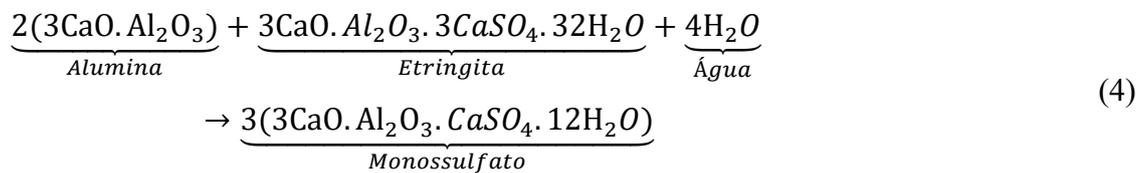
Sendo:

$3CaO \cdot Al_2O_3$ : Aluminato de cálcio ( $C_3A$ );

$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ : Sulfato de cálcio dihidratado;

$H_2O$ : Óxido de hidrogênio;

$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ : Trissulfoaluminato de cálcio hidratado.



Sendo:

$3CaO \cdot Al_2O_3$ : Aluminato de cálcio ( $C_3A$ );

$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ : Trissulfoaluminato de cálcio hidratado;

$H_2O$ : Óxido de hidrogênio;

$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ : Monossulfoaluminato de cálcio hidratado.

A etringita na forma primária não representa danos ao concreto, já que se trata de um produto normal de hidratação dos cimentos, formado enquanto o concreto se encontra na fase plástica. Contudo, quando há presença de sulfatos e sulfetos internos, provenientes de cimento, adições minerais, agregado, água ou aditivos, ou externos, presentes no solo e água, estes podem reagir com o monossulfoaluminato de cálcio, formando a etringita secundária interna (ISA – *Internal Sulfate Attack*) ou externa (ESA – *External Sulfate Attack*), respectivamente (COLLEPARDI, 2003; HASPARYK; KUPERMAN, 2019).

Distintamente das formas supracitadas, a etringita tardia (DEF – *Delayed Ettringite Formation*) é uma reação que ocorre no interior do concreto endurecido, caracterizada por uma reação sulfática de origem interna a partir da dissolução e recristalização da etringita primária. Quando há a formação de cristais de etringita tardiamente, os espaços já endurecidos do concreto são ocupados, fazendo com que o concreto apresente alta taxa de fissuração, perda de resistência e tenha seu módulo de elasticidade diminuído (JEBLI *et al.*, 2021; JOSHI *et al.*, 2022).

Os danos nos concretos devido ao DEF tem sido um problema de durabilidade proeminente devido à sua ocorrência generalizada e impacto econômico adverso (KOTHARI; TAKAHASHI, 2022). Esta forma de etringita, por provocar a degradação das estruturas de concreto após alguns anos da sua construção e ter sido reportada em inúmeras estruturas degradadas desde a década de 1980, será abordada no presente trabalho (HIME, 1996; RIDA; ALAOUI, 2022).

Vários fatores contribuem para o desenvolvimento da etringita tardia no concreto, sendo, na maioria das vezes, a combinação desses fatores que resulta na reação. Para que a etringita tardia ocorra, algumas condições específicas são determinantes, tais como o aquecimento do concreto durante o período de cura, a presença de sulfatos internos e a exposição à umidade. Ademais, fatores como a dosagem, a composição química do concreto e do cimento e o ambiente de exposição têm influência na DEF (HIME, 1996; KOTHARI; TAKAHASHI, 2022).

### 3.2.1 *Aquecimento do concreto*

Conforme abordado na literatura, destaca-se o aumento de temperatura como um parâmetro primordial para a formação de DEF. Por meio dessa elevação, e dependendo do tempo de permanência em alta temperatura, ocorre a inibição da formação da etringita primária

(AFt) ou sua decomposição durante o processo de cura do concreto (JOSHI *et al.*, 2021; TAYLOR; FAMY; SCRIVENER, 2001).

Através das altas temperaturas, ocorrem as reações de dissolução e fixação no concreto. Durante o tratamento térmico, a etringita (primária) e o monossulfato se dissolvem em sulfatos e aluminatos se a temperatura da amostra for superior à temperatura necessária para a dissolução (KOTHARI; TAKAHASHI, 2022).

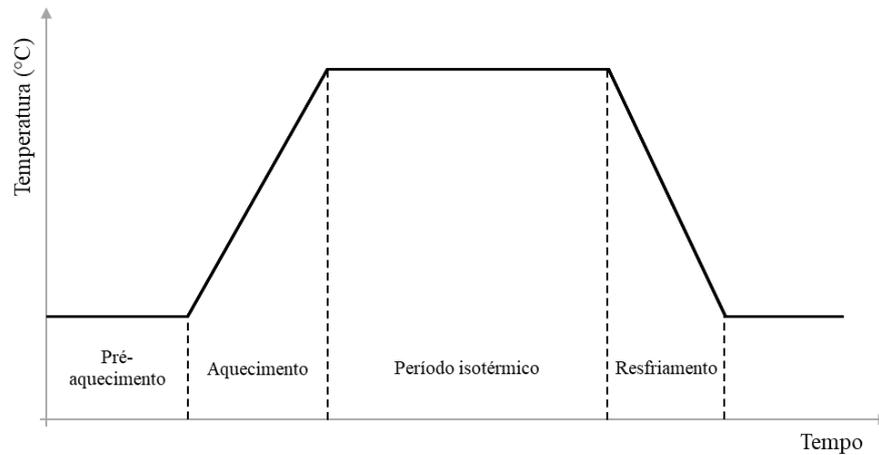
A etringita é instável e perde água em temperaturas superiores a 70 °C, resultando na mudança da estrutura cristalina. Em condições normais de pressão e umidade, a maior parte da água é perdida em aproximadamente 70 °C, passando de 32 para dez moléculas de água (GU *et al.*, 2020).

No estudo de Ogorodova *et al.* (2021) são evidenciadas as perdas de massa relacionadas à desidratação e desidroxilação da etringita em três etapas do processo: perda de 24 moléculas de água entre 50 e 200 °C, sendo a maior perda até 115 °C; perda de sete moléculas entre 200 e 330 °C; perda da água residual nas temperaturas superiores. Os autores ainda citam a transformação da etringita cristalina a uma forma amorfa, a partir da perda de 20 moléculas de água.

Os íons sulfatos e aluminatos, liberados na decomposição, são adsorvidos fisicamente pelo C-S-H e hidrogranada, respectivamente. Após a redução da temperatura, e na presença de umidade, os íons adsorvidos são liberados e, ao reagirem com a fase AFm, se recristalizam no interior da pasta de cimento e formam a etringita, gerando pressões de expansão (KOTHARI; TAKAHASHI, 2022).

O aumento da temperatura durante o processo de cura foi uma das formas encontradas pelas indústrias de pré-moldados para acelerar a hidratação do cimento. Apesar dos benefícios de desenvolvimento mais rápido da resistência e, conseqüentemente, maior produtividade, esse processo favorece a formação de etringita tardia (DORN; BLASK; STEPHAN, 2022). De acordo com o manual da IFSTTAR (2018), os ciclos térmicos compreendem quatro fases, conforme Figura 11.

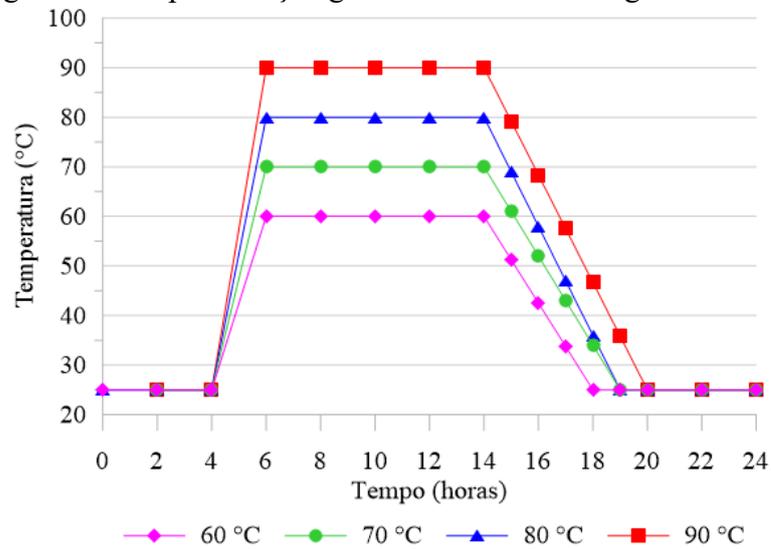
Figura 11 – Fases de um ciclo térmico padrão



Fonte: Adaptado de IFSTTAR (2018).

Diferentes ciclos de cura influenciam na cinética de reação de hidratação. Ramu *et al.* (2021), utilizando espectroscopia eletroquímica de impedância (EIS) para avaliar as alterações físicas devido ao DEF em sistemas cimentícios, compararam as resistividades elétricas com a expansão linear e a variação de massa de argamassas submetidas a diferentes regimes de cura, conforme Figura 12.

Figura 12 – Representação gráfica de diferentes regimes de cura



Fonte: Ramu *et al.* (2021).

Os resultados do estudo mostraram a redução da resistividade elétrica com o aumento na temperatura de cura. Além disso, o ganho de massa e expansão aumentaram com a elevação da temperatura. Para as amostras curadas a 60 e 70 °C, não houve expansão e ganho de massa

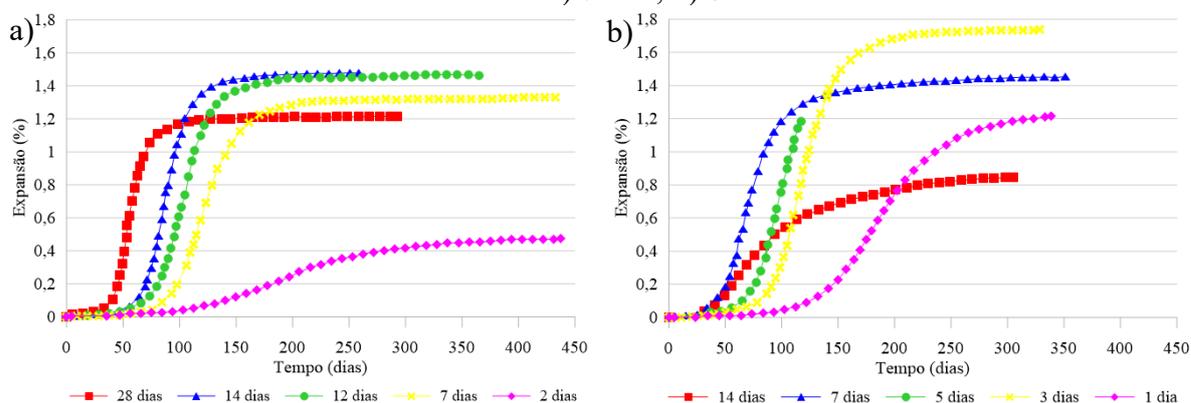
significantes. Já para as amostras curadas a 80 e 90 °C, houve significativo ganho de massa e expansão. Os autores ainda citam a decomposição da etringita a 90 °C (RAMU *et al.*, 2021).

De acordo com Aqel e Panesar (2018), a temperatura de cura a vapor tem um efeito significativo na expansão do concreto, independentemente do tipo de cimento ou da presença de adição. O aumento na expansão das misturas de concreto curadas a vapor a 70 e 82 °C foi de 156 e 166%, respectivamente, em comparação com as misturas de concreto curadas a vapor a 55 °C. Comparando a expansão do concreto com a alteração da temperatura de 70 para 82 °C, não houve aumento significativo.

O aumento da taxa de precipitação da etringita tardia também é influenciado por uma maior duração do tratamento térmico quando mantidas as demais condições iguais. Uma maior energia térmica pode afetar a microestrutura de tal forma que pode alterar a liberação de sulfatos do gel C-S-H e a lixiviação dos álcalis (KOTHARI; TAKAHASHI, 2022).

No estudo de Kchakech *et al.* (2015) foi avaliada a influência da duração do tratamento térmico em amostras de concreto nas expansões por DEF. As temperaturas de 71 e 81 °C foram aplicadas com durações variadas para as diferentes temperaturas. As conclusões apontam que, para o mesmo patamar de temperatura do tratamento térmico, as expansões têm um tempo de latência menor quando a duração do aquecimento é maior. Também, para uma determinada temperatura de tratamento térmico e acima de um certo limite de duração, a magnitude da expansão diminui, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Resultado do estudo sobre a influência do tempo de duração do tratamento térmico: a) 71 °C; b) 81 °C



Fonte: Kchakech *et al.* (2015).

Associado ao tratamento térmico durante a cura do concreto, a dosagem deste relaciona-se com o parâmetro da temperatura, principalmente ao se tratar do consumo de cimento no traço, uma vez que há interferência na liberação de calor durante a hidratação (DORN; BLASK;

STEPHAN, 2022). Assim, o t3pico a seguir tratar3 da influ3ncia da dosagem do concreto nas reaq3es de expans3o por DEF.

### 3.2.2 Dosagem

#### 3.2.2.1 Consumo de cimento

No Brasil n3o existe um m3todo de dosagem padronizado. Apesar da exist3ncia de diversos m3todos de dosagem, com diferentes procedimentos e par3metros, a resist3ncia do concreto e o consumo de cimento s3o fatores considerados nos m3todos (LONDERO; KLEIN; MAZER, 2021). Os valores de resist3ncia, especificados ainda na fase de projeto, usualmente situam-se nas faixas entre 30 e 70 MPa. Visando atender esses n3meros, o consumo de cimento do traq3o 3 alterado, uma vez que o aumento das resist3ncias est3 diretamente relacionado com o consumo de cimento (FUNAHASHI J3NIOR *et al.*, 2022).

A hidrataq3o do cimento 3 caracterizada como uma reaq3o exot3rmica, j3 que ocorre liberaq3o de calor durante o processo. A elevaq3o adiab3tica da temperatura do concreto pode ser estimada atrav3s da Equaq3o 5, proposta por Rastrup (1954). A equaq3o mostra que a variaq3o da temperatura 3 diretamente proporcional ao consumo e calor de hidrataq3o do cimento. No Ap3ndice A, a Equaq3o 5 3 aplicada para diferentes tipos e consumos de cimento.

$$\Delta\theta = \frac{C_c \cdot Q_t}{c_p \cdot \rho_c} \quad (5)$$

Onde:

$\Delta\theta$ = Variaq3o de temperatura do concreto (3C);

$C_c$ = Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>);

$Q_t$ = Calor de hidrataq3o do cimento (J/g);

$c_p$ = Calor espec3fico do concreto (kJ/kg.3C);

$\rho_c$ = Massa espec3fica do concreto (kg/m<sup>3</sup>).

Segundo Funahashi J3nior *et al.* (2022), a partir de dois estudos de caso em obras com grande volume de concreto utilizando cimento pozol3nico e incorporaq3o de metacaulim, os estudos t3rmicos servem como base para a execuq3o das obras. O aumento do consumo de cimento ou a utilizaq3o de cimentos com calor de hidrataq3o maior podem resultar em

temperaturas internas superiores às previstas e acarretar maiores riscos de desenvolvimento de DEF.

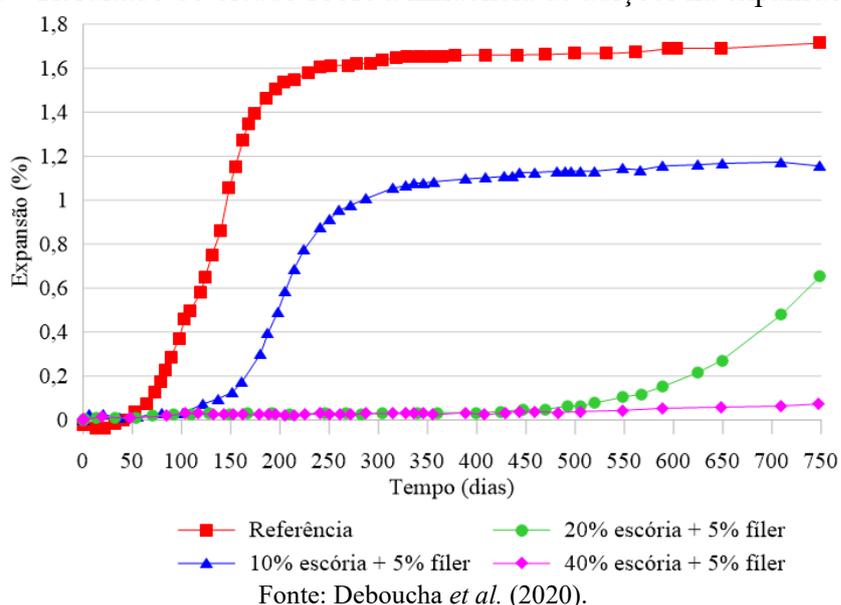
Além disso, as variações térmicas também podem gerar microfissuração do concreto e, como consequência, o aumento da permeabilidade e facilidade de ingresso de agentes externos, inclusive sulfatos responsáveis pela formação de etringita secundária (ELAHI *et al.*, 2021; SOGBOSSI; VERDIER; MULTON, 2020).

### 3.2.2.2 Adições minerais

Como uma maneira de reduzir o calor de hidratação, são incorporadas adições minerais, formando misturas binárias, ternárias e quaternárias. Dependendo do tipo e teor de adição, outras propriedades do concreto, como a microestrutura, propriedades mecânicas e durabilidade, também são afetadas (LI; LU; GAO, 2020).

O efeito da combinação de escória e filer calcário sobre a redução da expansão causada pela formação de etringita tardia (DEF) em sistemas de cimento misto ternário é considerada benéfica. Testes durante mais de 750 dias, em argamassas com substituição de cimento por 5% de filer calcário e 10, 20 e 40% de escória e curadas termicamente, constataram que o uso de 10 e 20% de cimentos ternários de escória com 5% de filer de calcário atrasou o início da expansão e causou uma diminuição na expansão a longo prazo, conforme ilustrado na Figura 14. Enquanto isso, o uso de 40% de escória com 5% de filer de calcário suprimiu a expansão causada por DEF (DEBOUCHA *et al.*, 2020).

Figura 14 – Resultado do estudo sobre a influência de adições na expansão por DEF



Conforme Kawabata, Takahashi e Watanabe (2021), estudando expansão durante 10 anos em argamassas com diferentes teores de cinza volante e escória, essas adições suprimem efetivamente a expansão da DEF a longo prazo, em teores de 20 e 40% de substituição, respectivamente. Os resultados indicaram que a cinza volante e a escória foram eficazes na supressão da expansão da DEF, mesmo com o excesso de teor de  $SO_3$  no cimento. Ademais, a incorporação das adições densificou a microestrutura da pasta.

### 3.2.2.3 Relação água/ligante

A porosidade e permeabilidade do concreto, influenciadas pela relação água/ligante e pelas propriedades do agregado, afetam o comportamento da geração de etringita tardia e expansão (COSTA; HASELBACH; SILVA FILHO, 2021). A menor permeabilidade restringe a mobilidade de íons no interior do concreto e, assim, dificulta a regeneração do monossulfato em etringita tardia (AQEL; PANESAR, 2018).

Contudo, uma maior densidade microestrutural, quando ocorre a presença de DEF, contribui para uma maior degradação devido às expansões. A etringita precipita inicialmente nos poros maiores e depois penetra nos poros capilares e poros de gel. A pressão cristalina é menor nos vazios maiores, não contribuindo para a expansão, diferentemente dos pequenos vazios do sistema, que sofrem grande pressão de cristalização, levando a uma expansão acelerada (GU *et al.*, 2019; ZHANG; PAN; ZHANG, 2021).

### 3.2.2.4 Agregados

Os agregados, além de contribuírem para a compactação e, conseqüentemente, para as características microestruturais, podem influenciar na formação de etringita tardia, dependendo da sua natureza mineralógica e granulometria (PICHELIN *et al.*, 2020).

Segundo Malbois *et al.* (2021) e Jebli *et al.* (2021), o efeito da mineralogia do agregado em concretos com elevação de temperatura durante a cura ocorre pela sua influência na modificação da zona de transição entre agregado e pasta de cimento. A utilização de agregados silicosos, em comparação com agregados calcários, tem efeitos mais visíveis de DEF, resultando em danos mais rápidos e significativos, uma vez que a ligação pasta e agregado é mais fraca.

A composição dos agregados também está sujeita a conter sulfato e sulfeto, prejudiciais à durabilidade do concreto por meio ataques internos por sulfatos, ataques por taumasita e

oxidação dos agregados sulfurados. A utilização desses agregados pode promover uma fonte adicional de sulfatos, favorecendo também a formação de etringita tardia (PAUL *et al.*, 2022).

Conforme apresentado, a expansão gerada depende fortemente da quantidade de água adicionada, natureza e tamanho dos agregados e natureza do aglomerante e, em especial, nos teores de sulfato, alumina e álcalis (PICHELIN *et al.*, 2020). A partir disso, o tópico a seguir trata da influência da composição do cimento e do concreto na formação de etringita tardia.

### 3.2.3 Composição química e mineralógica

O efeito da elevação da temperatura, seja pela reação de hidratação ou por cura térmica, interfere de forma direta na formação de etringita tardia. O calor de hidratação depende da composição química do cimento e é equivalente à soma do calor de hidratação dos compostos individuais quando hidratados separadamente, conforme Tabela 1 (KOTHARI; TAKAHASHI, 2022).

Tabela 1 – Calor de hidratação dos compostos minerais do clínquer

<b>Mineral do clínquer</b>	<b>Calor de hidratação (kJ/kg)</b>
C <sub>3</sub> S	500
C <sub>2</sub> S	250
C <sub>3</sub> A	910
C <sub>4</sub> AF	420

Fonte: Davidová e Reiterman (2020).

A composição química e mineralógica do cimento não apenas contribui para a elevação da temperatura por meio das reações de hidratação, mas também desempenha um papel direto na reação de formação da etringita tardia. Aspectos como o teor de álcalis equivalentes do concreto, os teores de sulfatos, de alumina (C<sub>3</sub>A) e de silicatos (C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S) do cimento, bem como a composição e quantidade de C-S-H formada, influenciam nas reações de DEF (ZHANG; PAN; ZHANG, 2021).

A utilização de adições, como cinzas volantes, metacaulim, pozolanas e escória, alteram a composição química dos cimentos e concretos. A reação pozolânica consome o hidróxido de cálcio disponível e reduz a concentração de sulfatos na solução dos poros, reduzindo a DEF e suprimindo a expansão (ZHANG; PAN; ZHANG, 2021).

Os diferentes tipos de cimentos produzidos no Brasil apresentam em sua composição tipos e teores distintos de adições, fato que influencia no comportamento desses cimentos frente

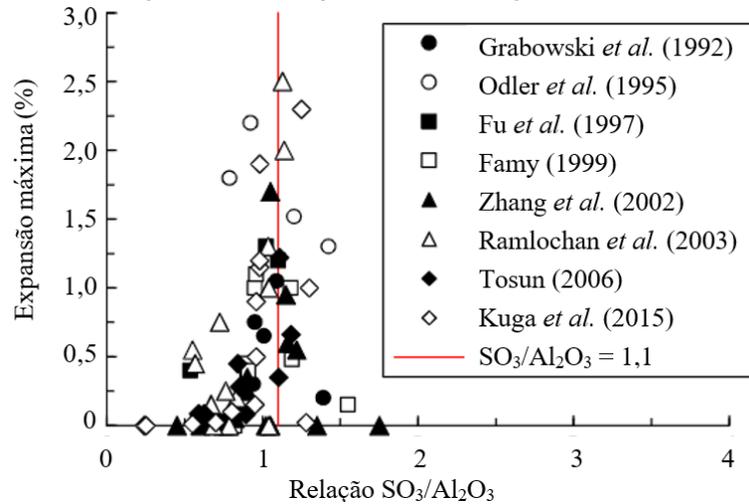
às reações expansivas. De acordo com o estudo de Tiecher, Langoski e Hasparyk (2021), em argamassas produzidas com diferentes tipos de cimentos, cimentos com cinza volante (CP II – Z e CP IV) são menos sujeitos a DEF quando comparados a cimentos de alta resistência inicial (CP V – ARI) e com adição de fíler calcário (CP II-F). Ainda, segundo os autores, com o aumento das expansões, observa-se uma diminuição das resistências para os cimentos CP V e CP II-F.

Nos cimentos Portland, independentemente do tipo, são incorporados teores de sulfato de cálcio para controlar a reação de hidratação do  $C_3A$ . No entanto, a quantidade de sulfato de cálcio no cimento Portland influencia na hidratação, reologia, configuração, conjunto de fase, distribuição de porosidade e resistência em materiais cimentícios (ANDRADE NETO; LA TORRE; KIRCHHEIM, 2021).

Quando todo o sulfato de cálcio é consumido, há uma tentativa de reestabelecimento do equilíbrio dinâmico entre os elementos adsorvidos e a solução, provocando uma dessorção dos íons sulfato da superfície do  $C_3A$ . Além disso, a quantidade de etringita decresce em favor da fase mais estável de monossulfato (ANDRADE NETO; LA TORRE; KIRCHHEIM, 2021; BULLARD *et al.*, 2011).

O teor de sulfato deve ser suficiente para retardar a reação de hidratação do  $C_3A$  até depois do pico principal de hidratação do  $C_3S$ , caso contrário, esta é prejudicada. Ademais, quando a quantidade de sulfato é superior ao conteúdo ótimo, o risco de desenvolvimento da etringita tardia aumenta, principalmente em porcentagens superiores a 3,5% (HORKOSS *et al.*, 2016; ZHOU *et al.*, 2023). Todavia, de acordo com Zhang, Pan e Zhang (2021), mesmo para altos teores de sulfato, a expansão por DEF pode ser pequena, já que a expansão é mais afetada pela relação  $SO_3/Al_2O_3$ .

De acordo com diversos autores na literatura, uma expansão significativa ocorre quando a relação  $SO_3/Al_2O_3$  apresenta valores entre 0,8 e 1,4. Além disso, os resultados indicam a existência de maiores expansões relacionadas à relação  $SO_3/Al_2O_3$ , quando essa apresenta valores próximo de 1,1, conforme Figura 15 (TOSUN, 2006; ZHANG; PAN; ZHANG, 2021; ZHOU *et al.*, 2022).

Figura 15 – Relação entre a expansão e a relação  $SO_3/Al_2O_3$  do cimento

Conforme Zhang *et al.* (2022) e corroborado por Zhou *et al.* (2023), a incorporação de adições ricas em  $Al_2O_3$  pode competir com o  $C_3A$  para consumir a gipsita durante a hidratação, o que resulta em sub-sulfatação, embora o cimento Portland seja adequadamente sulfatado.

Através da Equação 6, proposta por Paul *et al.* (2022), é possível prever a expansão final de barras de argamassa, curadas entre 85 e 90 °C, por meio dos compostos presentes na mistura. A equação considera a soma dos compostos do cimento, agregados e adições. Além disso, é possível verificar a relação direta entre o índice final de expansão e a relação  $SO_3/Al_2O_3$ .

$$DEF_{index} = \left( \frac{SO_3}{Al_2O_3} \right) \cdot \left[ \frac{(SO_3 + C_3A)_w}{10} \right] \cdot \sqrt{(Na_2O)_e} \quad (6)$$

Onde:

$DEF_{index}$ : Índice final de expansão por etringita tardia;

$\frac{SO_3}{Al_2O_3}$ : Relação de massa molar entre os óxidos sulfúrico e de alumínio;

$(SO_3 + C_3A)_w$ : Soma do peso percentual do óxido sulfúrico e aluminato tricálcico;

$(Na_2O)_e$ : Peso percentual de álcalis equivalentes do cimento.

De acordo com a equação anterior, e afirmado por Taylor, Famy e Scrivener (2001), a quantidade de álcalis também é um fator influente na expansão por etringita tardia, mas apenas quando associada a altos teores de  $SO_3$ . A quantidade de álcalis influencia a cinética de dissolução dos sulfoaluminatos e a cinética de fixação dos aluminatos a alta temperatura (SELLIER; MULTON, 2018). Os teores elevados de álcalis, durante a cura em altas

temperaturas, aumentam a concentração de sulfatos na solução dos poros e, conseqüentemente, a quantidade adsorvida pelo C-S-H (KELHAM, 1996; PAUL *et al.*, 2022).

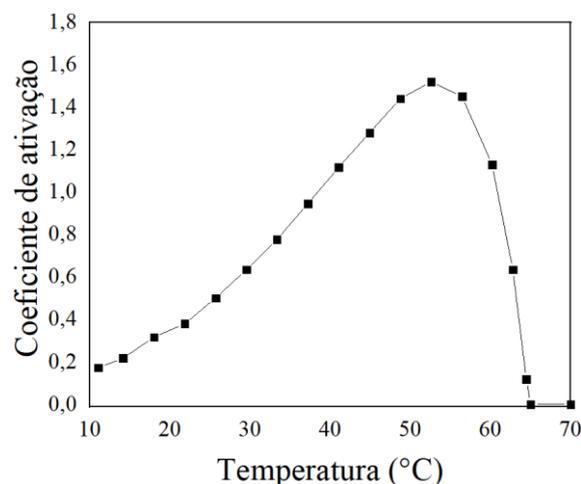
No entanto, em baixas temperaturas, a presença de álcalis pode retardar ou prevenir a DEF (SELLIER; MULTON, 2018). O conteúdo alcalino predominantemente afeta a reação de precipitação ao controlar a liberação de sulfato no sistema. O aumento do teor de álcalis aumenta a taxa de dissolução da etringita e do monossulfato, ao mesmo tempo em que reduz a taxa de fixação do aluminato e a precipitação da etringita tardia (KOTHARI; TAKAHASHI, 2022).

Para que ocorra a formação da etringita tardia, os compostos do material devem interagir com o ambiente de exposição, especialmente com a presença de umidade. A partir disso, o próximo tópico tratará da influência da condição de exposição no desenvolvimento da DEF.

#### 3.2.4 Condição de exposição

Assim como na reação álcali-agregado, para a precipitação da etringita tardia é necessária a presença de umidade, além de um padrão de temperatura favorável (KOTHARI; TAKAHASHI, 2022). Conforme apresentado no gráfico da Figura 16, a elevação da temperatura gera o aumento do coeficiente de ativação térmica responsável pela precipitação da etringita secundária e tardia, atingindo o patamar máximo em aproximadamente 52 °C. A partir desse valor, o coeficiente tende a diminuir até atingir a temperatura de decomposição da etringita, que, de acordo com a literatura, pode iniciar em 60 °C, a depender da composição química da amostra (HASPARYK *et al.*, 2022; SELLIER; MULTON, 2018).

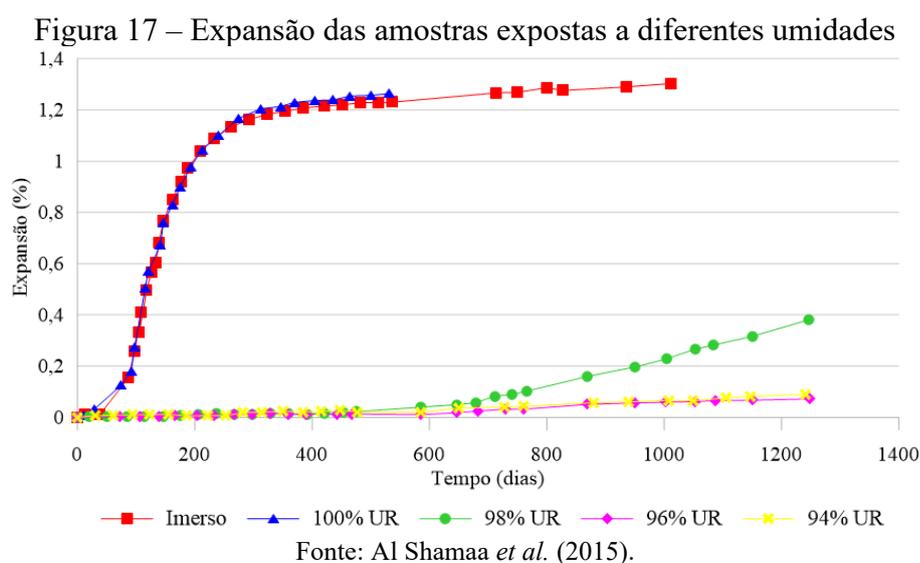
Figura 16 – Coeficiente de ativação térmica para a precipitação de etringita



Fonte: Adaptado de Sellier e Multon (2018).

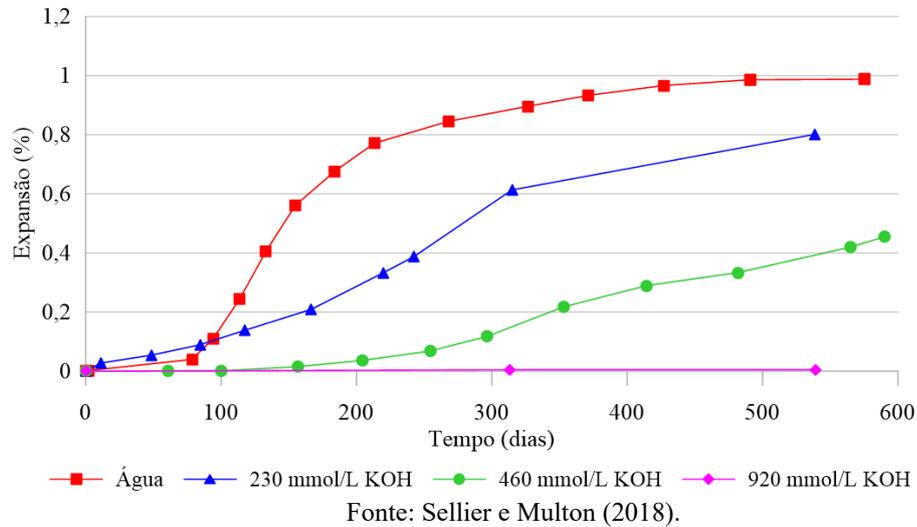
Em relação a umidade, no caso de DEF, a condição de saturação não afeta significativamente os processos químicos, mas sim a difusão dos íons nos poros (KOTHARI; TAKAHASHI, 2022).

No estudo sobre a influência da umidade relativa do ambiente no desenvolvimento de DEF, de Al Shamaa *et al.* (2015), as amostras foram submetidas a um tratamento térmico durante 3 dias a 80 °C, e posteriormente armazenadas a 20 °C, em diferentes condições de umidade. Como resultado, foi verificado que as amostras imersas em água e armazenadas a 100% UR expandiram de forma semelhante, de forma mais rápida e com maior intensidade que as demais amostras, atingindo cerca de 1,3% de expansão em 1000 dias. Para os testes com 98% UR, a expansão teve início em aproximadamente 600 dias e expandiu 0,32% em 1250 dias. Já as amostras armazenadas a 94 e 96% UR não apresentaram expansão significativa, sendo estas menores que 0,08%. A Figura 17 apresenta o gráfico com os resultados do estudo.



Os autores supracitados citam a influência da umidade do ambiente na capacidade de lixiviação dos álcalis, ou seja, a lixiviação é mais lenta para concretos armazenados a 98% de UR do que para aqueles imersos ou armazenados a 100% de UR. Quando os álcalis estão presentes tanto na composição do cimento quanto na água do ambiente de exposição, ocorre uma modificação na cinética de formação de DEF. Quanto maior a concentração de álcalis na água, mais lento é o desenvolvimento de DEF. Por isso, a presença de diferentes concentrações de álcalis na água de armazenamento do concreto pode retardar ou inibir a formação de etringita tardia, de acordo com o ilustrado na Figura 18 (SELLIER; MULTON, 2018).

Figura 18 – Influência da concentração de KOH da água de armazenamento na cinética de DEF



Os autores também mencionam sobre a interferência da lixiviação dos álcalis quando o concreto fica exposto à água corrente ou goteiras. Kothari e Takahashi (2022) corroboram com isso, citando que, nesses casos, a precipitação será mais rápida perto da superfície do concreto, onde o conteúdo alcalino será menor devido à lixiviação. Devido a esse fator interveniente, mesmo para uma mesma quantidade de água disponível, o efeito expansivo por DEF pode ser diferente, já que há a dependência de como a água afeta na lixiviação dos álcalis (AL SHAMAA *et al.*, 2015).

As principais características de um concreto acometido pela formação de etringita tardia é a fissuração por expansão. Eventualmente, a DEF é equivocadamente diagnosticada como reação álcali-agregado, mas ao contrário desta, tem efeitos mais severos na degradação do concreto (KAWABATA; TAKAHASHI; WATANABE, 2021; NOËL; SANCHEZ; TAWIL, 2018). Ainda, ambas as reações podem ocorrer simultaneamente.

### 3.3 INTERAÇÃO ENTRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E ETRINGITA TARDIA

As reações álcali-agregado e etringita tardia apresentam efeitos semelhantes nos materiais cimentícios, como expansões, fissurações e redução nas propriedades mecânicas, apesar dos diferentes fatores reativos, tempos de indução, causas e graus de degradação (PORTELLA *et al.*, 2021).

Apesar dos estudos de reações expansivas referentes à reação álcali-agregado e ataques por sulfato, em especial a etringita tardia, existirem desde as décadas de 1940 e 1960, a interação entre esses mecanismos expansivos e seus efeitos nos materiais cimentícios começaram a ser descobertos e estudados a partir da década de 1980 (FANIJO; KOLAWOLE; ALMAKRAB, 2021; KENNERLEY, 1965 *apud* CEARY, 2007; PETTIFER; NIXON, 1980).

Um dos primeiros estudos que citam etringita tardia e reação álcali-agregado em um mesmo elemento foi o de Shayan e Quick (1992). Ao investigarem dormentes de concreto protendido fissurados e não fissurados, descobriram a presença de reações álcali-agregado em ambos. Além disso, foi verificada a existência de etringita tardia nos dormentes fissurados, indicando que microfissuras foram iniciadas pelos esforços de carregamento e por RAA. Com a penetração de umidade, houve a formação de etringita.

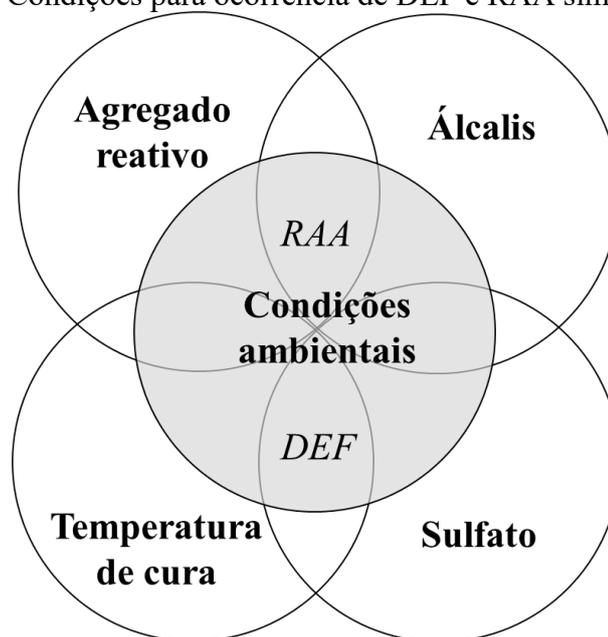
A partir de então, outras estruturas com esses mecanismos expansivos de origem interna foram descobertas, como a represa de gravidade construída em 1955, no Uruguai. A formação dos produtos expansivos possivelmente ocorreu pela utilização de um agregado potencialmente reativo e a inexistência de cimentos de baixo calor de hidratação no país na época da construção, além da presença abundante de umidade (BLANCO *et al.*, 2018).

Em Portugal foram descobertas sete pontes localizadas no reservatório da represa Agueira, construídas entre 1976 e 1979, com severos danos nos pilares e fundações devido à DEF e RAA. As análises em testemunhos extraídos indicam a presença de agregado reativo, ausência de MCSs, consumo de cimento superior a 400 kg/m<sup>3</sup> e altos teores de sulfato (entre 1,48 e 4,44%), além da presença de umidade. Devido aos danos existentes, as estruturas afetadas pelas reações expansivas foram submetidas a reparos com custos expressivos (SANTOS; XU; SILVA, 2022).

No Brasil, de acordo com Ferreira *et al.* (2023), foram descobertos dormentes de concreto protendido, com aproximadamente 10 anos de uso, degradados pela coexistência de mecanismos expansivos, sendo eles a reação álcali-sílica, a reação álcali-carbonato e a formação de etringita tardia.

Segundo Godart e Wood (2021), tanto a formação de etringita tardia quanto a reação álcali-agregado podem ocorrer desde que haja a combinação adequada de condições, como a presença de um agregado reativo e uma quantidade suficiente de álcalis, conforme Figura 19. A determinação de qual reação ocorre primeiro está relacionada à velocidade de desenvolvimento das reações. Quando uma das reações é iniciada, a formação de microfissuras favorece o transporte de água e íons para o interior do material, acelerando assim ambos os mecanismos.

Figura 19 – Condições para ocorrência de DEF e RAA simultaneamente



Fonte: Autora (2022).

Conforme Martin, Metalssi e Toutlemonde (2013), corroborado por Sanchez *et al.* (2018) e por Portella *et al.* (2021), os mecanismos expansivos de RAA e DEF apresentam características microscópicas significativamente diferentes, mas induzem a impactos macroscópicos semelhantes. Dentre os danos gerados, os principais são a presença de fissuras e perda das propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Na região metropolitana de Recife, foram estudadas amostras retiradas de blocos de fundação de aproximadamente 10 anos. Através de ensaios físico-químicos, foram identificados produtos formados por etringita tardia e reação álcali-agregado. Contudo, os ensaios de resistência à compressão não mostraram perda de resistência (DELGADO *et al.*, 2021).

Na mesma região, Silva *et al.* (2021) realizaram testes em amostras extraídas de um bloco de fundação de 19 anos, também identificando ambas as reações expansivas. Assim como Delgado *et al.* (2021), os autores também afirmam não haver perdas de resistência à compressão. Entretanto, é citada a perda de aproximadamente 45% do módulo de elasticidade dinâmico, mostrando ser um bom indicador dos danos causados pelas expansões.

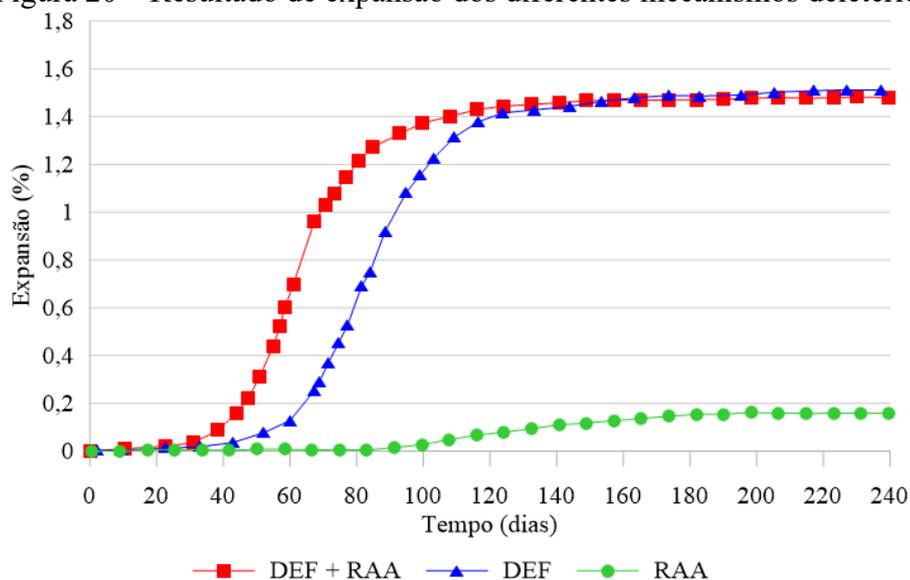
Segundo o estudo de Sriprasong, Asamoto e Raj (2020), a expansão devido a uma combinação de RAS e DEF causa maiores danos do que os mecanismos ocorrendo individualmente. Os autores também citam que primeiro ocorre a RAS e depois a formação de etringita, ocasionando a expansão e danos subsequentes após o endurecimento. Gu *et al.* (2019)

afirmam que a etringita tende a se precipitar em vazios já existentes, como microfissuras, atestando que a formação dos produtos nas fissuras não é o motivo da expansão, mas pode gerar um nível maior de degradação.

Embora a comunidade científica esteja de acordo quanto aos fatores causadores das reações e os expressivos danos causados quando os mecanismos coexistem, ainda não existe consenso sobre qual reação inicia primeiro. Quando ocorre o desenvolvimento de ambas as reações, o consumo dos álcalis presentes na solução dos poros do concreto pela RAA pode favorecer a formação do DEF. Isso ocorre porque a redução da solubilidade da etringita é favorecida, o que leva à sua precipitação (DIAMOND, 1996; KOTHARI; TAKAHASHI, 2022).

No estudo de Martin, Renaud e Toutlemonde (2010), conforme Figura 20, foram estudados os mecanismos ocorrendo separadamente e conjuntamente em amostras submersas em água. Como conclusão, no caso dos mecanismos acoplados, a expansão foi iniciada por RAA, sendo que durante o tratamento térmico foi formado o gel de RAA, resultando em microfissuras e redução do teor de álcalis, fato que favoreceu o início da formação de etringita tardia. Conforme o estudo, os mecanismos simultâneos são mais prejudiciais às estruturas que o mecanismo de DEF e este, mais prejudicial que a RAA.

Figura 20 – Resultado de expansão dos diferentes mecanismos deletérios



Fonte: Adaptado de Martin, Renaud e Toutlemonde (2013).

Diferente do que foi exposto pelos autores citados anteriormente, Blanco *et al.* (2018) citam como conclusão do estudo a existência de produtos de RAA em volta da etringita, indicando que inicialmente ocorreu o DEF, seguido da formação de RAS.

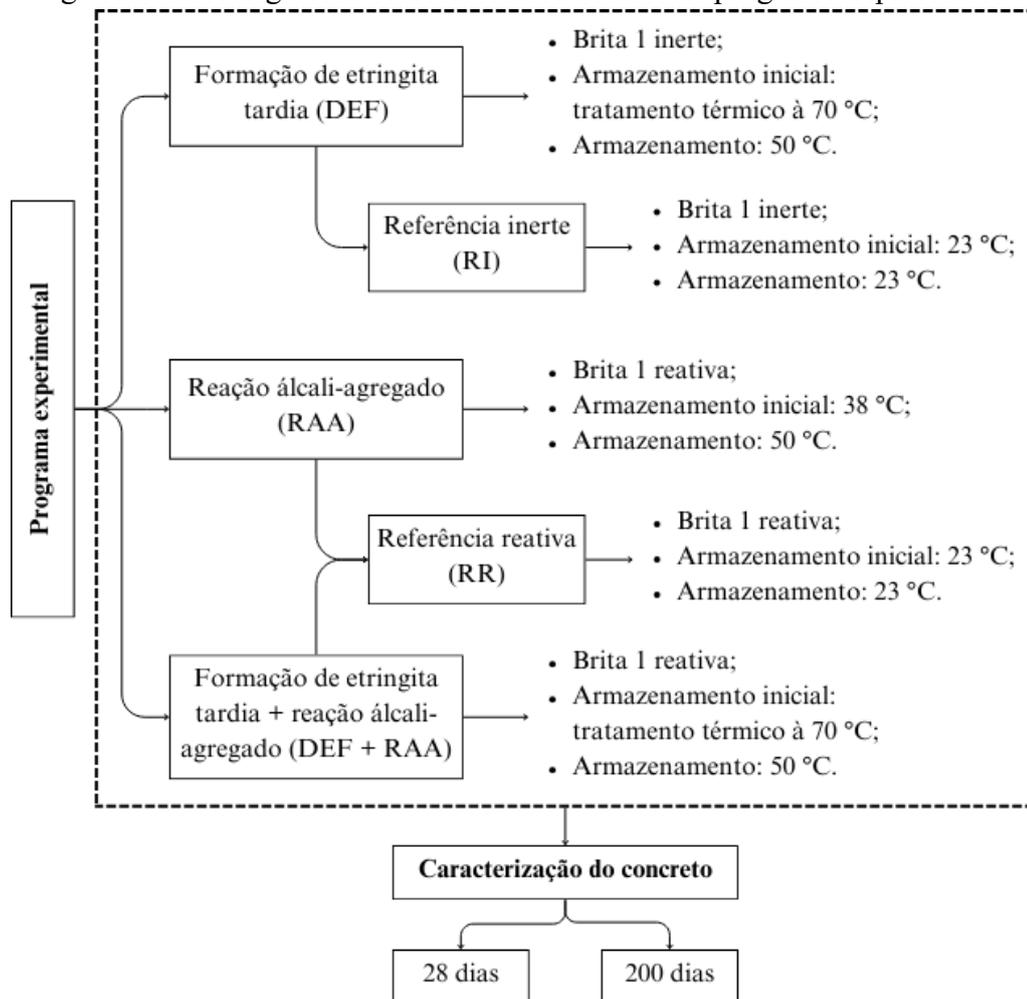
Independentemente de qual reação seja iniciada primeiro, as fissuras resultantes, ao permitirem a entrada de umidade, também promovem a corrosão das armaduras, impactando a capacidade de carga das estruturas (KARTHIK; MANDER; HURLEBAUS, 2022).

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consistiu em utilizar um concreto com classe de resistência de 60 MPa, teor de substituição de 65% de agregado miúdo por areia de minério de ferro e dois mecanismos expansivos: reação álcali agregado e etringita tardia, além da interação entre ambos e concretos de referência, conforme apresentado no fluxograma da Figura 21.

Os parâmetros de classe de resistência e teor de substituição foram definidos juntamente com a agência financiadora da pesquisa. A classe de resistência foi definida visando a posterior utilização do traço na fabricação de elementos pré-moldados. Já o teor de substituição, foi definido a partir de estudos preliminares realizados pela agência financiadora da pesquisa, onde foram estudados diferentes teores de substituição de agregado miúdo por areia de minério de ferro, sendo que o traço com 65% apresentou os melhores resultados no estado fresco e nas propriedades mecânicas do concreto.

Figura 21 – Fluxograma das variáveis em análise do programa experimental



Fonte: Autora (2023).

Para obter cada mecanismo expansivo e estudar a interação entre eles, foram combinadas as variáveis de reatividade do agregado graúdo e as condições de armazenamento, dependendo do mecanismo desejado. Foram empregados dois tipos de brita 1: inerte e reativa; também foram empregadas diferentes condições de armazenamento, sendo todas as amostras armazenadas em umidade superior a 95%:

- Tratamento térmico com rampa de aquecimento até a temperatura de 70 °C e posterior armazenamento a 50 °C até as idades de ensaio;
- Armazenamento inicial a 38 °C e posterior armazenamento a 50 °C até as idades de ensaio; e
- Armazenamento a 23 °C desde a moldagem até as idades de ensaio.

As amostras de todos os mecanismos expansivos e as referências foram ensaiadas em duas idades distintas: 28 e 200 dias.

## 4.1 MATERIAIS

Neste item, são apresentados os materiais utilizados no programa experimental desta pesquisa, juntamente com suas propriedades físico-químicas e sua origem. As propriedades de alguns materiais foram obtidas junto ao fornecedor, enquanto outras foram avaliadas por meio de ensaios, que estão descritos na sequência.

### 4.1.1 *Cimento*

Para o estudo do desenvolvimento das reações expansivas endógenas, foi utilizado um cimento CP V-ARI, por ser um cimento sem adições em sua composição e por favorecer o ganho de resistência inicial. As características químicas e físicas do cimento foram obtidas por meio dos ensaios apresentados no Quadro 2, seguindo as referidas normas citadas.

Quadro 2 – Ensaios de caracterização do cimento e respectivas normas técnicas utilizadas

Ensaio		Norma internacional	Norma brasileira equivalente
Caracterização química	Óxidos principais	ASTM C114:2022a	ABNT NBR 14656:2023a
	Resíduo insolúvel		ABNT NBR 17086-4:2023b
	Perda ao fogo		ABNT NBR 17086-6:2023c
	Calor de hidratação	ASTM C1702:2023	ABNT NBR 8809:2013
Caracterização física	Finura pelo método de Blaine	ASTM C204:2018a	ABNT NBR 16372:2015
	Consistência normal	ASTM C187:2016	ABNT NBR 16606:2018d
	Massa específica	ASTM C188:2017c	ABNT NBR 16605:2017
	Expansibilidade à quente	-	ABNT NBR 11582:2016
	Tempo de início de pega	ASTM C191:2021b	ABNT NBR 16607:2018b
	Tempo de fim de pega		
	Resistência à compressão (1, 3, 7 e 28 dias)	ASTM C109/C109M:2021a	ABNT NBR 7215:2019a

Fonte: Autora (2023).

#### 4.1.1.1 Composição química

A caracterização química da amostra seguiu o proposto pela ASTM C114:2022a, sendo que a determinação da composição química da amostra foi realizada com pastilhas fundidas e utilizando os métodos *GeoQuant M* (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) em um equipamento *S8 Tiger*, operando a 4 kW.

Tabela 2 – Características químicas do cimento

Composto	Concentração (%)
CaO	62,18
SiO <sub>2</sub>	16,76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,37
MgO	2,79
SO <sub>3</sub>	2,59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,75
K <sub>2</sub> O	0,99
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17
SrO	0,15
Na <sub>2</sub> O	0,09
Outros	0,45
Equivalente alcalino (Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )	0,741
Resíduo insolúvel	0,836
Perda ao fogo (LOI)	6,178

Fonte: Autora (2023).

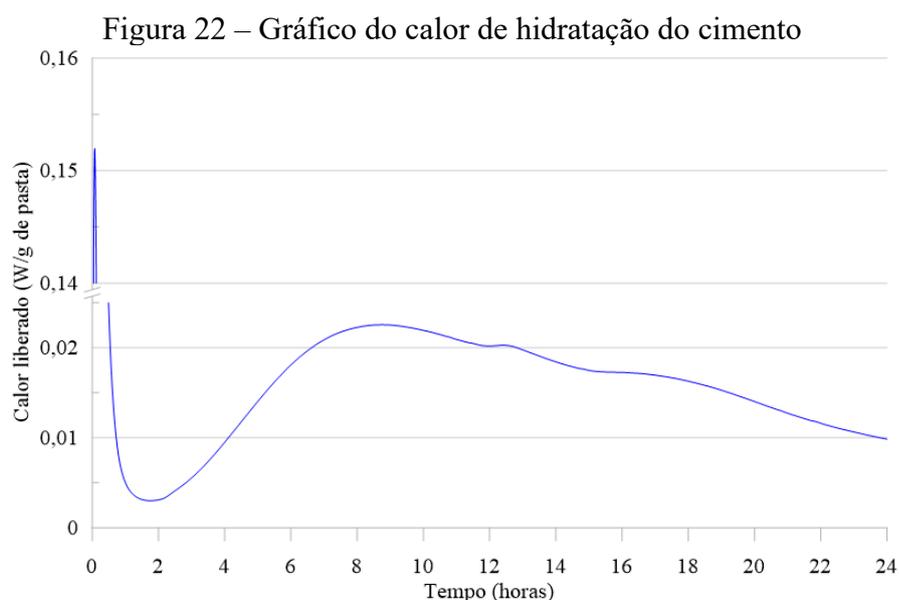
Conforme apresentado na revisão de literatura, a composição do cimento afeta diretamente a formação dos produtos expansivos em questão, principalmente o equivalente alcalino ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ), teor de sulfato ( $\text{SO}_3$ ), e relação entre sulfatos e aluminatos ( $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Analisando a Tabela 2, observa-se que o equivalente alcalino é superior ao valor de 0,6%, recomendado pela literatura para mitigar a RAA. Contudo, com o objetivo de formar a reação álcali-agregado, foi adicionado hidróxido de sódio 96% ( $\text{NaOH}$ ) na água de amassamento para a obtenção de um equivalente alcalino de 1,25%, conforme ASTM C1293:2020a.

Com relação ao teor de sulfato, este apresenta um valor inferior ao recomendado pela literatura para favorecer a DEF (3,5%), mas a relação  $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ , considerada mais significativa para esse mecanismo expansivo, é de 0,6. Ou seja, é uma relação favorável para a formação de etringita tardia.

#### 4.1.1.2 Calor de hidratação

Para a realização do ensaio de calorimetria isotérmica, foi produzida uma pasta, por meio de mistura externa e manual, com 25 gramas de cimento e relação água/cimento de 0,35. O equipamento utilizado para o ensaio foi o calorímetro isotérmico *ICal 8000H*, e todo o procedimento foi realizado em um ambiente com temperatura controlada a 23 °C. O resultado de fluxo de calor liberado por grama de pasta é apresentado na Figura 22.



Fonte: Autora (2024).

Conforme Figura 22, na primeira hora ocorreu o pico inicial decorrente da reação entre o cimento e a água, seguido da queda e estabilização da liberação de calor (estágio de dormência). Então, houve o aumento gradual da taxa de liberação de calor (início de pega) a partir de 2 horas, até atingir o pico em torno de 8 horas. O pico de conversão de etringita em monossulfato acontece entre 12 e 13 horas. Por fim, ocorre a redução gradual do calor liberado, indicando que a maior parte das reações de hidratação já ocorreu.

#### 4.1.1.3 Caracterização física

Com relação aos ensaios de caracterização física do cimento, os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Características físicas do cimento

<b>Propriedade</b>		<b>Unidade</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Consistência normal		%	35	-
Massa específica		g/cm <sup>3</sup>	3,05	-
Expansibilidade à quente		mm	0,00	-
Tempo de pega	Início	min	145	7
	Fim	min	204	9
Finura	Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4751	118
	75 µm	%	0,01	0,03
	42 µm	%	1,17	0,22
Resistência à compressão	1 dia	MPa	25,6	0,7
	3 dias	MPa	36,9	1,6
	7 dias	MPa	41,1	1,2
	28 dias	MPa	46,2	0,6

Fonte: Cimento Nacional (2023).

O cimento utilizado estava dentro dos parâmetros estabelecidos pela ASTM C150/C150M:2022c, equivalente à ABNT NBR 16697: 2018c, que trata das especificações de cimento para concreto.

#### 4.1.2 Agregados

Os agregados empregados neste trabalho foram: areia natural quartzosa e brita 1 inertes, da região de Uberlândia/MG; brita 1 potencialmente reativa, da região de Vitória de Santo Antão/PE; areia fina proveniente do processo de extração de minério de ferro, proveniente da

região de Ouro Preto/MG. A Figura 23 (a-d) ilustra, respectivamente, a areia de minério de ferro, a areia natural quartzosa, a brita 1 inerte e a brita 1 potencialmente reativa.

Figura 23 – Agregados utilizados na pesquisa: a) areia de minério de ferro; b) areia natural quartzosa; c) brita 1 inerte; d) brita 1 potencialmente reativa



Fonte: Autora (2023).

Todos os agregados foram submetidos às análises por microscopia, caracterização química e índices físicos, conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Ensaios de caracterização dos agregados e respectivas normas técnicas utilizadas

Ensaio		Norma internacional	Norma brasileira equivalente
Microscopia	MEV	-	-
	Petrografia	ASTM C295/C295M:2019b	ABNT NBR 15577-3:2018a
			ABNT NBR 7389-1:2009b
Caracterização química	FRX	-	-
	DRX	-	-
Índices físicos	Granulometria	ASTM C136/C136M:2019a	ABNT NBR 17054:2022
	Massa específica e absorção	ASTM C128:2022b	ABNT NBR 16916:2021a
		ASTM C127:2015	ABNT NBR 16917:2021b
	Teor de argila	ASTM C142/C142M:2017b	ABNT NBR 7218:2010b
Teor de material pulverulento	ASTM C117:2017a	ABNT NBR 16973:2021c	

Fonte: Autora (2023).

#### 4.1.2.1 Análise por microscopia

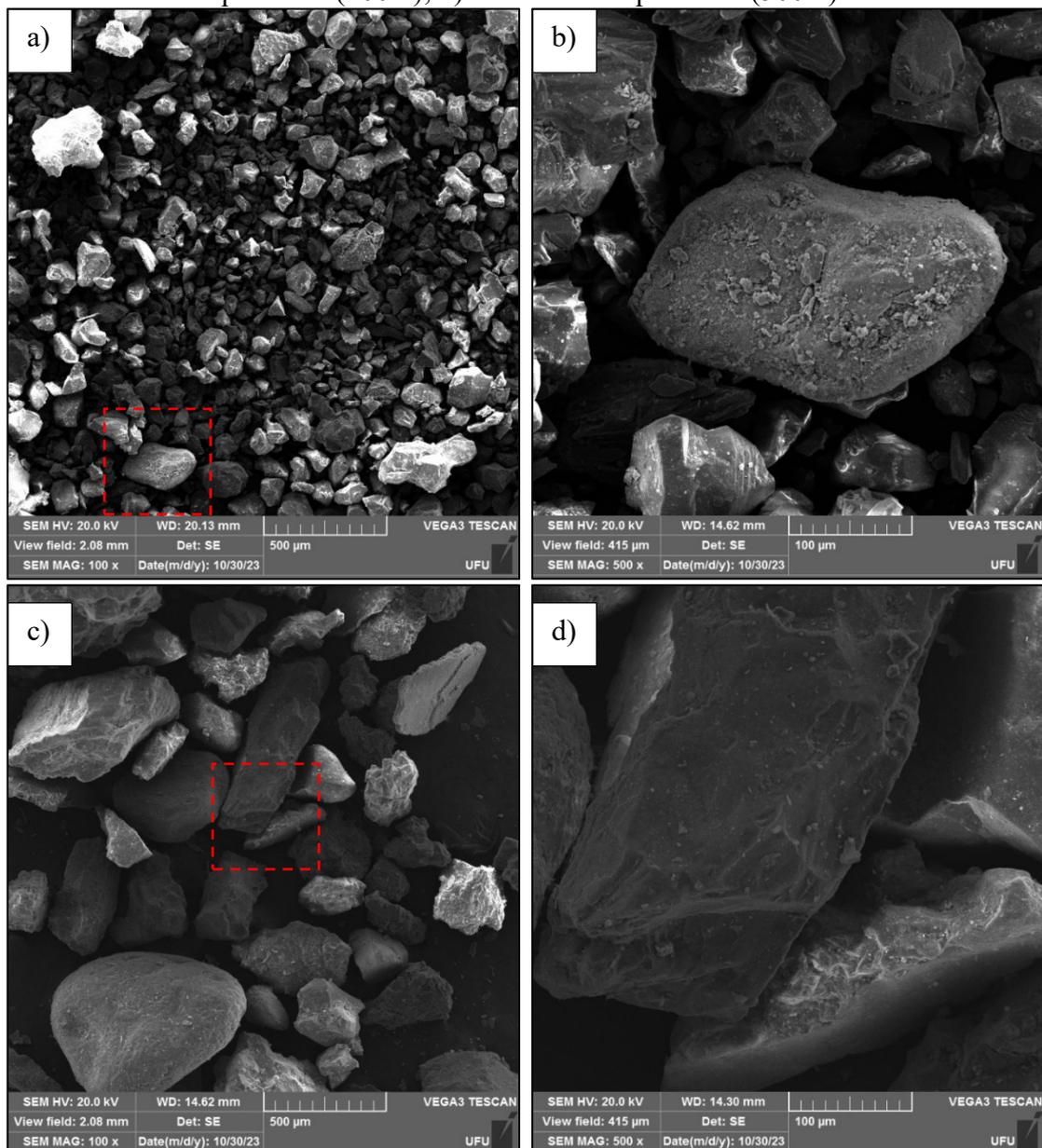
Visando o estudo da microestrutura e morfologia dos agregados, as areias foram submetidas à análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e petrografia, enquanto as britas foram ensaiadas somente por petrografia, conforme ASTM C295/C295M:2019b.

O preparo de todas as amostras consistiu em secá-las em estufa a 50 °C até a constância de massa.

a. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), as amostras foram espalhadas sobre uma fita de carbono, recobertas com ouro e fixadas no suporte metálico da câmara de vácuo do microscópio eletrônico. Esse equipamento possui um detector de espectroscopia de energia dispersiva por Raio-X (EDS). A Figura 24 apresenta as imagens obtidas.

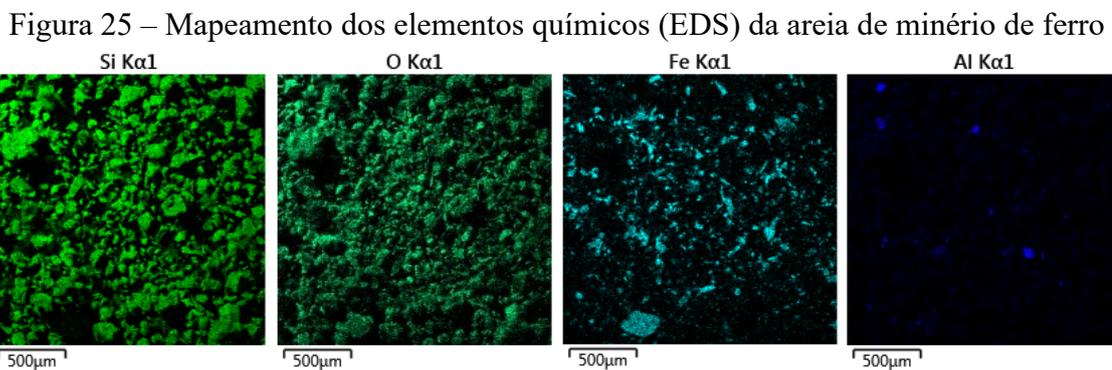
Figura 24 – Análise por microscopia eletrônica de varredura nas amostras de agregado miúdo: a) areia de minério de ferro (100 x); b) areia de minério de ferro (500 x); c) areia natural quartzosa (100 x); d) areia natural quartzosa (500 x)



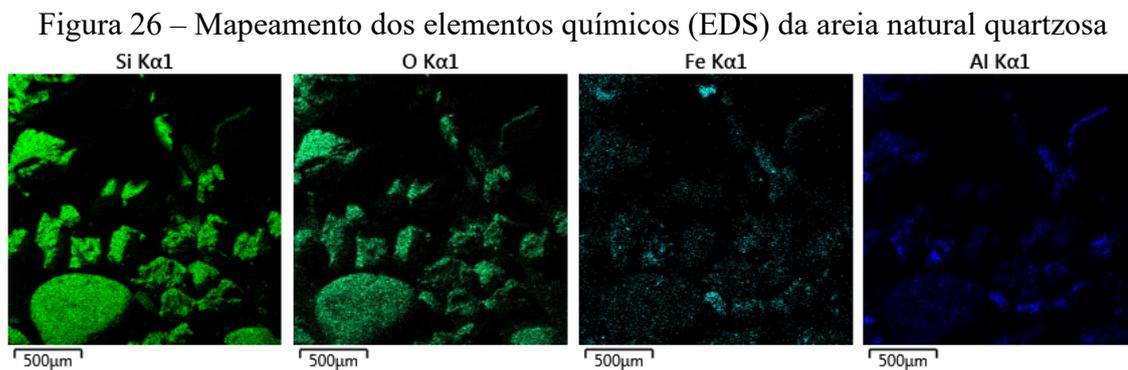
Fonte: Autora (2023).

A partir da Figura 24, comparando as amostras analisadas em uma mesma amplitude, é possível observar a diferença granulométrica entre elas. Com relação ao formato e superfície das partículas, a areia de minério de ferro apresenta partículas com formatos irregulares semelhantes e superfícies com e sem rugosidade. Já a areia natural quartzosa, apresenta grão com formatos irregulares e distintos entre si, mas também com superfícies com e sem rugosidade.

De acordo com as Figuras 25 e 26, onde são apresentados os mapeamentos dos elementos químicos das amostras, é possível observar a presença de silício, oxigênio, ferro e alumínio como elementos químicos constituintes de ambas as amostras.



Fonte: Autora (2023).



Fonte: Autora (2023).

## b. Petrografia

A análise de composição mineralógica dos agregados miúdos foi realizada a partir da contagem visual com auxílio de estereomicroscópio visando a observação de 618 grãos para a areia natural quartzosa e 726 grãos para a areia de minério de ferro. Os valores obtidos foram recalculados para a quantidade de 500 grãos.

Para a análise da natureza e morfologia dos minerais constituintes dos agregados graúdos, foram utilizadas lâminas de concreto de 45 x 25 x 2 mm e 30 µm de espessura, analisadas por meio do método de observação à luz transmitida em um microscópio petrográfico.

A Tabela 4 apresenta os resultados da composição mineralógica e classificação das amostras quanto ao grau de arredondamento, grau de esfericidade e superfície predominantes

Tabela 4 – Composição mineralógica (% em número de grãos) e classificação das amostras de agregados miúdos

	<b>Mineral</b>	<b>Areia de minério de ferro</b>	<b>Areia natural quartzosa</b>
Inócuos	Quartzo	85	91
	Feldspato	-	2
	Magnetita/ Hematita	8	-
	Turmalina	-	5
	Granada	-	1
	Goethita	7	-
Friáveis	Muscovita	<1	<1
Deletério	Matéria orgânica	-	<1
	Potencialmente deletérios	-	-
	<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
	Arredondamento predominate	Sub-anguloso	Sub-anguloso
	Esfericidade predominante	Alta	Baixa
	Superfície predominante	Rugosa	Rugosa

Fonte: Autora (2023).

De acordo com a análise petrográfica, foi observada na areia de minério de ferro a seguinte composição mineralógica: quartzo (cor translúcida), magnetita/hematita (cor preto opaco), goethita (cor marrom) e muscovita (cor branca). Na areia natural quartzosa, foi observado a presença dos minerais: quartzo (translúcidos), feldspatos (vermelho translúcido), muscovita (verde), granada (vermelho opaco) e turmalina (pretos opacos).

A areia natural quartzosa distingue-se pela maior diversidade mineralógica, demonstrando também formatos sub-angulares associados a superfícies mais rugosas. Já a areia de minério de ferro sobressai-se pela presença de hematita/magnetita, que possuem formatos mais esféricos e grau de seleção mais elevado.

Em relação ao potencial reativo desses agregados miúdos em concretos, esses provavelmente possuem um baixo potencial reativo, pois apesar de apresentar materiais deletérios, esses estão em volume inferior a 1%.

Em relação à análise petrográfica dos agregados graúdos, a brita 1 potencialmente reativa apresentou elevada heterogeneidade, de tal modo que foram observadas rochas félsicas, composta essencialmente por quartzo-e feldspatos, com diferentes estruturas e mineralogias; rochas máficas, constituído por silicatos ferro-magnesianos; mica xistos; cristais de feldspatos; e cristais de quartzo. Esses agregados exibiram tamanhos entre 1 cm e 2 cm, com formas predominantemente alongadas.

Como confirmação do potencial de reatividade do agregado, foi observado a presença de quartzo deformado com extinção ondulante e recuperação de contatos, em teores variando entre 5% e 75%. Conforme Tiecher *et al.* (2018) o quartzo com intensa extinção ondulante e bandas de deformação é particularmente favorável ao desenvolvimento da RAA, por três motivos: primeiramente, a extinção ondulante cria zonas frágeis onde as ligações entre o silício (Si) e o oxigênio (O) são mais suscetíveis à quebra, aumentando a reatividade do quartzo na presença de hidróxidos alcalinos; além disso, as bandas de deformação desenvolvidas no quartzo durante a deformação concentram tensões internas, tornando o mineral mais vulnerável ao ataque químico; por fim, o quartzo deformado frequentemente contém inclusões fluidas dentro das bandas de deformação, o que permite a penetração de fluidos reativos e facilita as reações álcali-sílica (RAA).

A brita 1 inerte, é composta predominantemente por basaltos, com dimensões entre 1 e 3 cm e formas cúbicas a alongadas. Foi observada uma variedade de cor nos basaltos: rochas de coloração mais claras, devido à uma maior dimensão dos cristais de piroxênio; e rochas de coloração mais escura, formada por cristais de piroxênio com dimensões inferiores a 0,01 mm.

#### 4.1.2.2 Caracterização química

Para a realização das caracterizações químicas, as amostras foram secas a 50 °C até a constância de massa, seguido da moagem em um moinho de discos oscilantes durante 30 segundos. As amostras moídas foram submetidas ao peneiramento manual na peneira #200 (75 µm), quarteadas até a obtenção de aproximadamente 10 gramas, e então armazenadas em tubos de *Eppendorf*.

##### a. Fluorescência de Raios-X (FRX)

Antes da realização das análises de FRX, foi feita a determinação de perda ao fogo (LOI – *Loss on ignition*) das amostras. Para isso, pesou-se 2,5 g de cada amostra e efetuou-se a

calcinação em forno mufla à  $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 2 h. Então, as amostras foram acondicionadas em dessecador e, posteriormente, pesadas, efetuando-se o cálculo de perda ao fogo, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.

A análise de FRX foi realizado nas amostras em formato de pastilhas fundidas, objetivando reduzir o efeito de matriz e tamanho do grão, e utilizando os métodos *Geo Quant M* (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) em um equipamento *S8 Tiger*, operando a 4 kW. A Tabela 5 apresenta os resultados em óxidos encontrados.

Tabela 5 – Composição química dos agregados

Composto	Concentração (%)			
	Areia de minério de ferro	Areia natural quartzosa	Brita 1 inerte	Brita 1 reativa
SiO <sub>2</sub>	85,14	82,55	46,86	69,32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,93	2,25	14,64	2,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,37	7,60	12,67	14,02
K <sub>2</sub> O	0,01	3,03	0,73	4,01
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,62	3,57	0,53
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,52	2,33	3,77
MgO	-	0,29	5,15	1,63
CaO	0,04	0,23	9,18	1,99
CO <sub>2</sub>	-	1,84	3,30	0,84
Outros	0,31	0,43	0,79	0,41
Perda ao fogo (LOI)	0,971	1,838	3,304	0,841

Fonte: Autora (2023)

As principais composições encontradas na areia de minério de ferro foram o óxido de silício (SiO<sub>2</sub>) e o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), e concentrações menores que 1% foram observadas para alumínio, cálcio, sódio e potássio. Quanto à areia natural quartzosa, os principais óxidos encontrados foram o de silício (SiO<sub>2</sub>), de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de potássio (K<sub>2</sub>O) e de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Com relação aos agregados graúdos, observa-se uma diferença significativa entre a composição das duas britas utilizadas. A brita 1 inerte, quando em comparação à brita 1 potencialmente reativa, apresentou maiores teores de cálcio e ferro. Contudo, a brita 1 potencialmente reativa apresentou um maior teor de óxido de silício, composto associado a uma maior suscetibilidade a reação álcali-agregado.

A perda ao fogo (LOI) dos agregados indica a presença de materiais voláteis e orgânicos, como argilas, carbonatos e matéria orgânica. Logo, quanto maior a perda ao fogo (LOI), maior é a concentração desses compostos nos agregados.

## b. Difração de Raios-X (DRX)

As análises foram realizadas no equipamento *XRD6000*, com os parâmetros: voltagem de 40 kV; corrente de 30 mA; radiação  $\text{CuK}\alpha$  (1,540 Å); passo angular de  $0,016^\circ$  em  $2\theta$ , entre  $7$  e  $70^\circ$ ; modo *Continuous Scan*; velocidade de varredura de  $2^\circ/\text{min}$ ; fenda de divergência e de dispersão de  $1^\circ$  e fenda receptora de 0,3 mm. Os difratogramas obtidos foram comparados com os do banco de dados *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) e possibilitaram uma análise qualitativa dos picos referentes aos elementos presentes nas amostras.

Figura 27 – Difratograma de raios X (DRX) da amostra de areia de minério de ferro

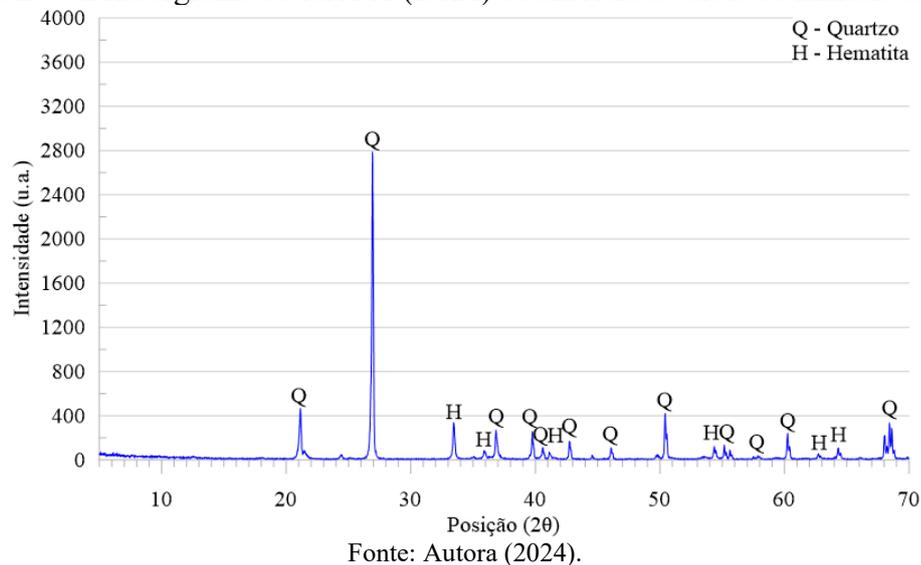
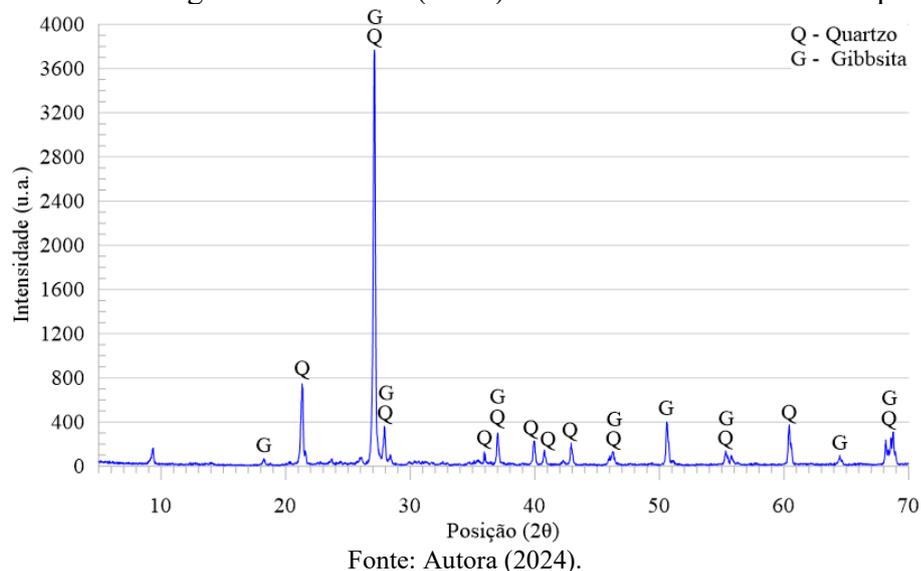


Figura 28 – Difratograma de raios X (DRX) da amostra de areia natural quartzosa



Assim como obtido na análise de fluorescência de raios X (FRX), identificou-se, somente, as fases com maiores concentrações, como quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) no difratograma de raios-X da areia de minério de ferro (Figura 27), e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) no difratograma da areia natural quartzosa (Figura 28).

Figura 29 – Difratograma de raios X (DRX) da amostra de brita 1 reativa

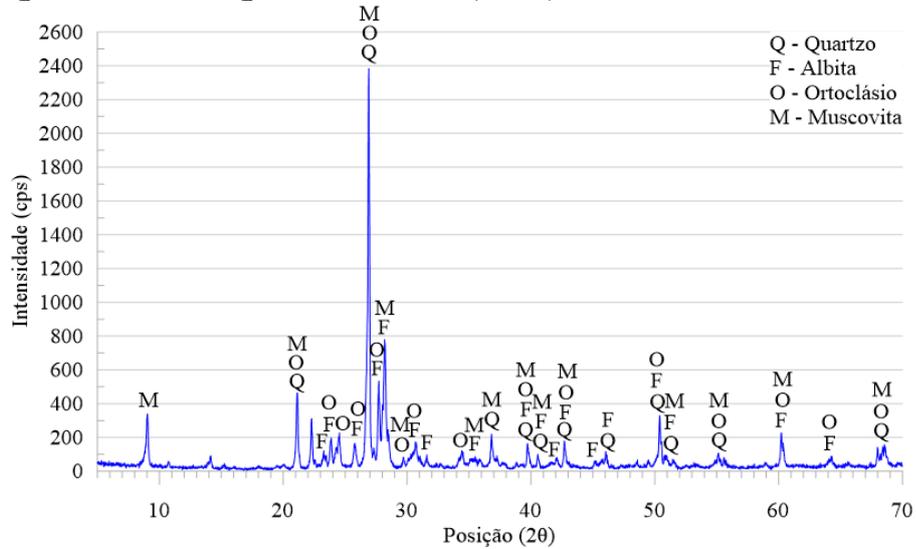
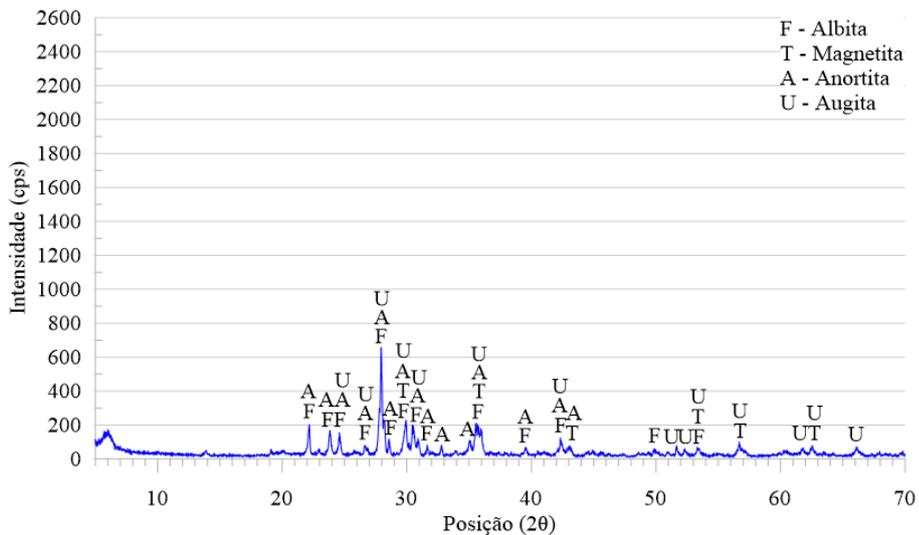


Figura 30 – Difratograma de raios X (DRX) da amostra de brita 1 inerte



Como resultado de DRX da brita 1 reativa (Figura 29), foram identificados como minerais presentes o quartzo, feldspatos (albita –  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ; e ortoclásio –  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) e mica (muscovita –  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ). A brita 1 inerte (Figura 30), foram identificados como

minerais o feldspato (albita –  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ; e anortita –  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), piroxênio (augita –  $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al},\text{Ti})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

#### 4.1.2.3 Índices físicos

Para a caracterização dos índices físicos dos agregados, foram realizados os seguintes ensaios:

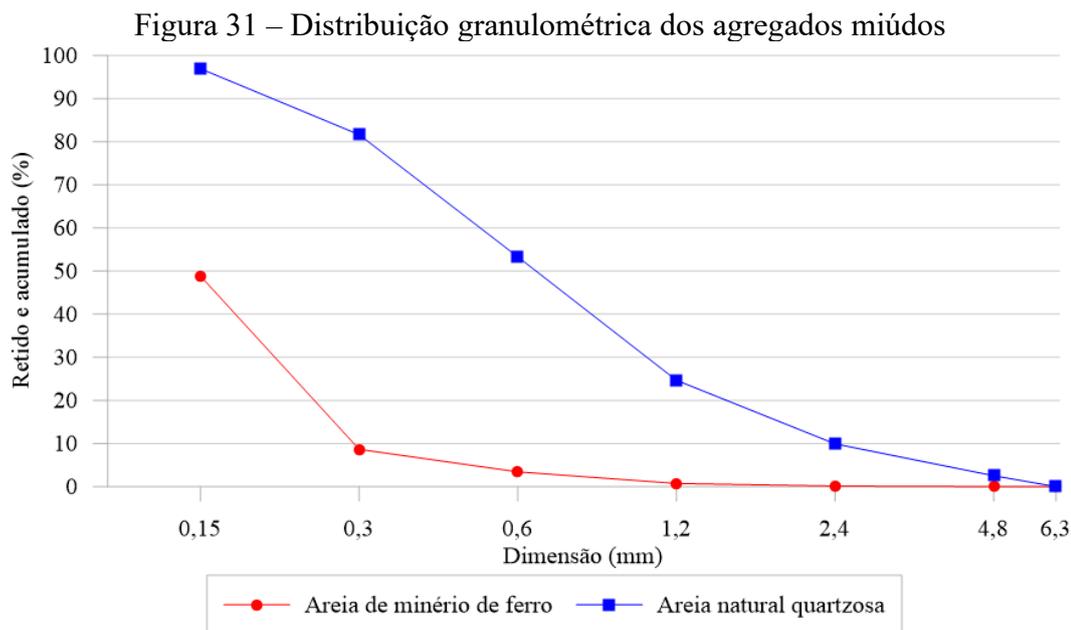
- Composição granulométrica, conforme ASTM C136/C136M:2019a.
- Massa específica e absorção de água, conforme ASTM C128:2022b para os agregados miúdos e ASTM C127:2015 para os agregados graúdos.
- Teor de argila, conforme a ASTM C142/C142M:2017b.
- Teor de material pulverulento, conforme ASTM C117:2017a.

As características físicas dos agregados foram determinadas em laboratório. A Tabela 6 apresenta os índices físicos obtidos, enquanto a Figura 31 apresenta o gráfico da distribuição granulométrica dos agregados miúdos.

Tabela 6 – Índices físicos dos agregados miúdos

<b>Propriedades</b>	<b>Areia de minério de ferro</b>	<b>Areia natural quartzosa</b>	<b>Parâmetros da ASTM C33/C33M:2018b</b>
Módulo de finura	0,62	2,69	2,3 - 3,1
Dimensão máxima (mm)	0,3	2,4	Não especificado
Teor de material pulverulento (%)	27,28	1,52	$\leq 3$
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	-	0,07	$\leq 3$
Massa específica aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,85	2,63	Não especificado

Fonte: Autora (2023).



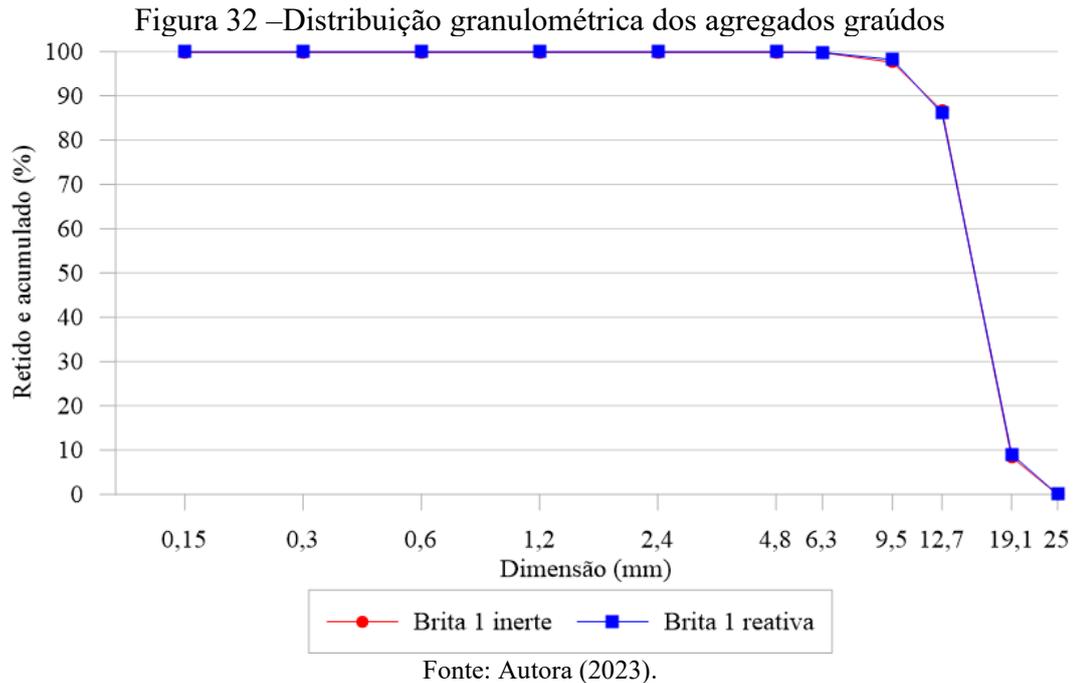
Observando os resultados dos ensaios referentes à areia de minério de ferro, um ponto de destaque foi a finura e elevado teor de material pulverulento. Por conta desta característica, foi realizado o ensaio de Chapelle modificado, conforme ABNT NBR 15895:2010a visando avaliar o índice de atividade pozolânica do material. Como resultado, obteve-se que o valor de índice de atividade pozolânica Chapelle ( $\text{ICa(OH)}_2$ ) foi de 11,71 mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  amostra, sendo inferior ao valor mínimo estabelecido por Raverdy *et al.* (1980) (436 mg  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de amostra) para classificação do material como pozolânico.

Com relação aos índices físicos dos agregados graúdos, esses são apresentados na Tabela 7, enquanto a Figura 32 mostra o gráfico da distribuição granulométrica correspondente.

Tabela 7 – Índices físicos dos agregados graúdos

Propriedades	Brita 1 inerte	Brita 1 reativa	Parâmetros da ASTM C33/C33M:2018b
Módulo de finura	6,97	6,97	2,3 - 3,1
Dimensão máxima (mm)	19,1	19,1	Não especificado
Teor de material pulverulento (%)	0,73	0,52	$\leq 1$
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	1,18	0,3	$\leq 10$
Massa específica aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,79	2,62	Não especificado

Fonte: Autora (2023).



A partir da análise dos resultados das duas britas, observa-se uma característica granulométrica muito similar entre elas. Comparando ambas as britas, a inerte apresentou uma maior massa específica, fato que influenciou na quantidade em massa utilizada no traço, conforme apresentado no tópico 4.2.1.

#### 4.1.3 Água

A água utilizada foi proveniente do abastecimento público da cidade de Uberlândia/MG, onde está localizado o Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Essa água é fornecida pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE). De acordo com as recomendações da ABNT NBR 15900-1:2009a, a água proveniente de abastecimento público "[...] é considerada adequada para uso em concreto e não requer ensaios."

#### 4.1.4 Aditivos e adições

Visando melhorar a trabalhabilidade do concreto, foi adicionado à mistura um aditivo superplastificante à base de polímero éter-policarboxilato. As especificações deste aditivo, fornecidas pelo fabricante, se encontram na Tabela 8.

Tabela 8 – Especificações do aditivo *Glenium 51*

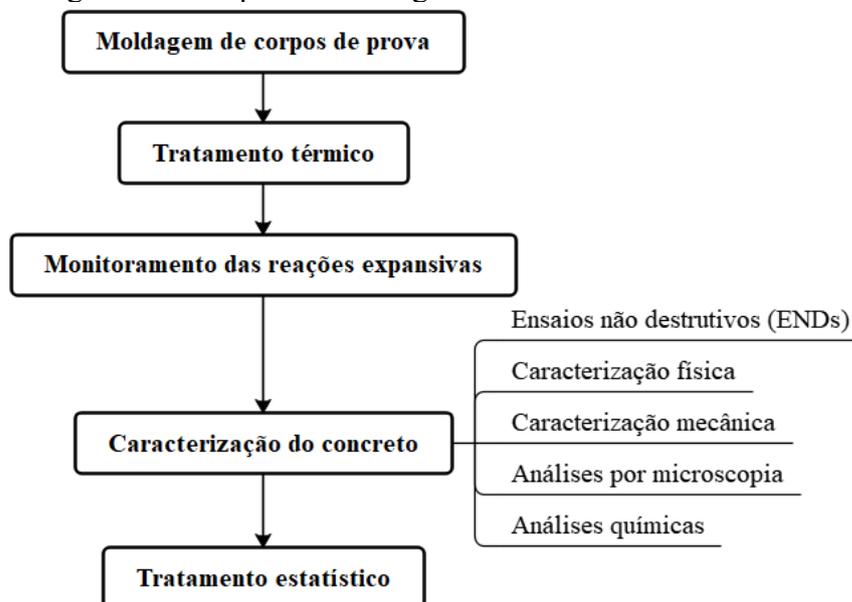
<b>Propriedade</b>	<b>Especificação</b>
Aparência	Líquido branco turvo
pH	5 – 7
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,067 – 1,107
Sólidos (%)	28,5 – 31,5
Viscosidade (cps)	< 150
Dosagem recomendada (%)	0,2 a 1

Fonte: *BASF The Chemical Company* (2022).

## 4.2 MÉTODOS

Os métodos empregados no presente trabalho foram realizados em etapas distintas, conforme Figura 33. Essas etapas incluíram a moldagem de corpos de prova, o processo de tratamento térmico, o monitoramento das reações expansivas, a caracterização do concreto e o tratamento estatístico dos dados. A seguir, serão descritas cada uma dessas etapas.

Figura 33 – Etapas metodológicas utilizadas no trabalho



Fonte: Autora (2023).

### 4.2.1 *Moldagem de corpos de prova*

A confecção dos concretos foi conforme os traços apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Quantidade de materiais dos traços

Material	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )	
	Inerte <sup>1</sup>	Reativo <sup>2</sup>
Cimento	481,58	481,58
Areia de minério de ferro	496,14	496,14
Areia natural quartzosa	267,15	267,15
Brita 1 inerte	1084,62	-
Brita 1 reativa	-	1018,53
Aditivo superplastificante	5,78	5,78
Água	168,55	168,55
NaOH	3,23	3,23

<sup>1</sup> Materiais para a confecção do concreto para estudar o mecanismo de formação de etringita tardia (DEF) e o concreto de referência inerte (RI); <sup>2</sup> Materiais para a confecção do concreto para estudar os mecanismos de reação álcali-agregado (RAA), reação álcali-agregado e formação da etringita tardia conjuntamente (DEF + RAA) e o concreto de referência reativa (RR).

Fonte: Autora (2023).

Para a confecção do concreto, inicialmente foi realizado o processo de imprimação de uma betoneira de 400 L, utilizando um traço de 1:2:3 e 1 L de água. O processo de mistura consistiu em adicionar os materiais na seguinte ordem: 50% da brita 1, cimento, o restante da brita 1, 70% da água com o aditivo superplastificante diluído, areia de minério de ferro e areia natural quartzosa. Os 30% restantes de água foram utilizados para diluir o NaOH, de forma manual, e a solução foi adicionada após 2 minutos do início da mistura. Após aproximadamente 4 minutos do início da mistura, foi realizado o processo de retirada do material fino aderido nas paredes da betoneira, com o auxílio de uma colher de pedreiro. O processo de mistura foi realizado por  $7 \pm 2$  minutos. A Figura 34 (a-i) ilustra todos os processos realizados.

Figura 34 – Processo de produção do concreto: a) separação de materiais; b) imprimação da betoneira; c) colocação dos materiais na betoneira; d) diluição de aditivo superplastificante em 70% da água de amassamento; e) mistura inicial dos materiais; f) diluição de NaOH em 30% água de amassamento; g) adição da solução de NaOH; h) retirada do material fino aderido na superfície da betoneira; i) fim do processo de mistura



Fonte: Autora (2023).

Após a confecção do concreto, foi realizado o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*), mostrado na Figura 35, conforme ASTM C143/C143M:2020b (equivalente à ABNT NBR 16889:2020), e o abatimento obtido para todos os concretos foi de  $220 \pm 20$  mm.

Figura 35 – *Slump test*

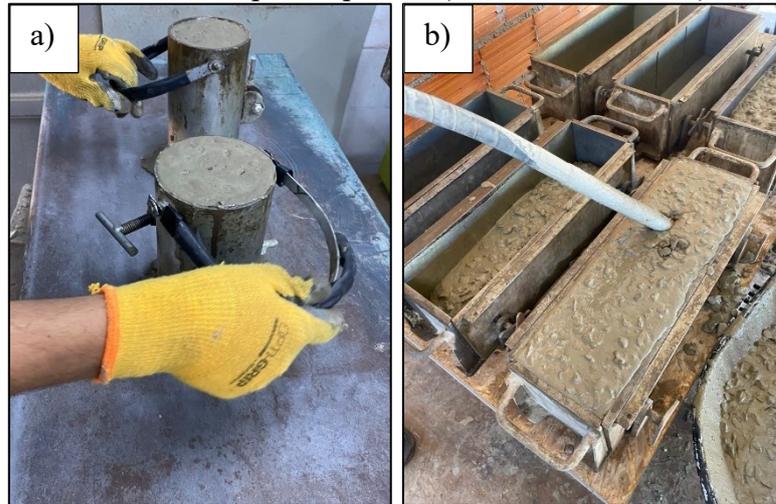


Fonte: Autora (2023).

Para os ensaios descritos no tópico 4.2.3, foram moldados corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm e prismáticos 15 cm x 15 cm x 50 cm. Devido à quantidade necessária de corpos de prova, a moldagem destes foi realizada em dez dias de concretagem, sendo dois dias de concretagens para cada mecanismo expansivo, dois para os concretos de referência utilizando brita 1 inerte e dois para os concretos de referência utilizando brita 1 reativa. Além disso, por conta do volume de concreto, em cada dia de concretagem, foram realizadas três misturas/betonadas. No Apêndice B são apresentados os controles feitos em cada mistura, constando o abatimento, os tempos de mistura e as condições climáticas de temperatura e umidade no momento de realização das betonadas.

O processo de adensamento dos corpos de prova consistiu no uso de mesa vibratória e vibrador de imersão. As amostras cilíndricas foram adensadas em mesa vibratória durante 35 segundos (Figura 36a) e os prismas foram adensados com um vibrador de imersão durante 10 segundos (Figura 36b).

Figura 36 – Adensamento dos corpos de prova: a) mesa vibratória; b) vibrador de imersão



Fonte: Autora (2023).

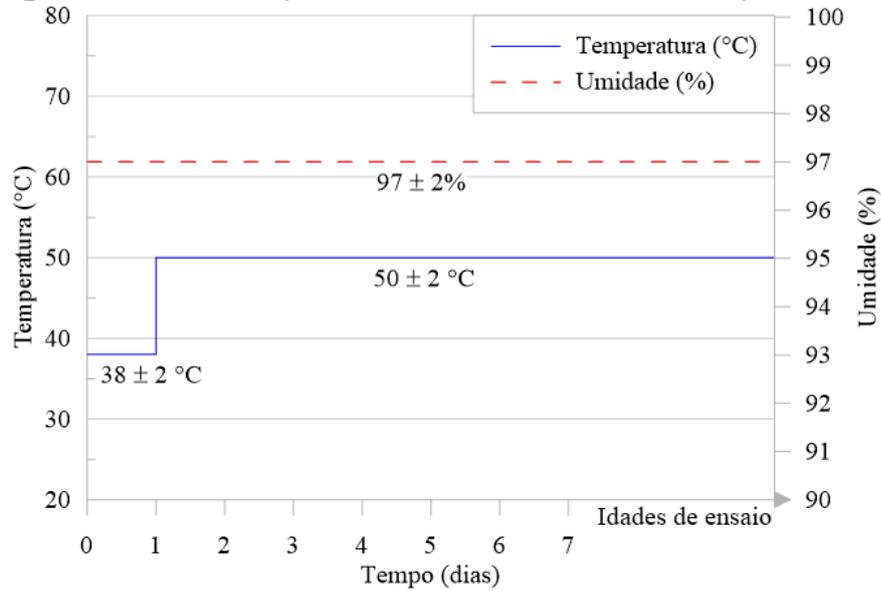
#### 4.2.2 Tratamento térmico e cura

Após a moldagem, as amostras foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos e tipos de cura, de acordo com cada mecanismo expansivo a ser gerado.

##### 4.2.2.1 Reação álcali-agregado (RAA)

Conforme ilustrado pela Figura 37, o tratamento térmico para reação álcali-agregado consistiu em armazenar os corpos de prova em uma câmara úmida a  $38 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $97 \pm 2\%$  imediatamente após a moldagem. As amostras foram retiradas desse ambiente apenas para a desmoldagem após 6 horas e retornadas para a câmara, sendo mantidos nessa condição durante as primeiras 24 horas. Posteriormente, os corpos de prova foram transferidos para uma câmara a  $50 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $97 \pm 2\%$  (Figura 38), sendo armazenadas nessa condição até as idades de ensaio.

Figura 37 – Gráfico representativo do tratamento térmico para a RAA



Fonte: Autora (2023).

Figura 38 – Armazenamento de corpos de prova em câmara úmida à 50 °C



Fonte: Autora (2023).

#### 4.2.2.2 Formação de etringita tardia (DEF)

De acordo com o apresentado na revisão bibliográfica, para que a formação de etringita tardia ocorra, deve haver a elevação da temperatura durante o processo de cura do concreto. Por isso, a cura para este mecanismo expansivo foi realizada por meio de tratamento térmico em um tanque de aquecimento, mostrado na Figura 39.

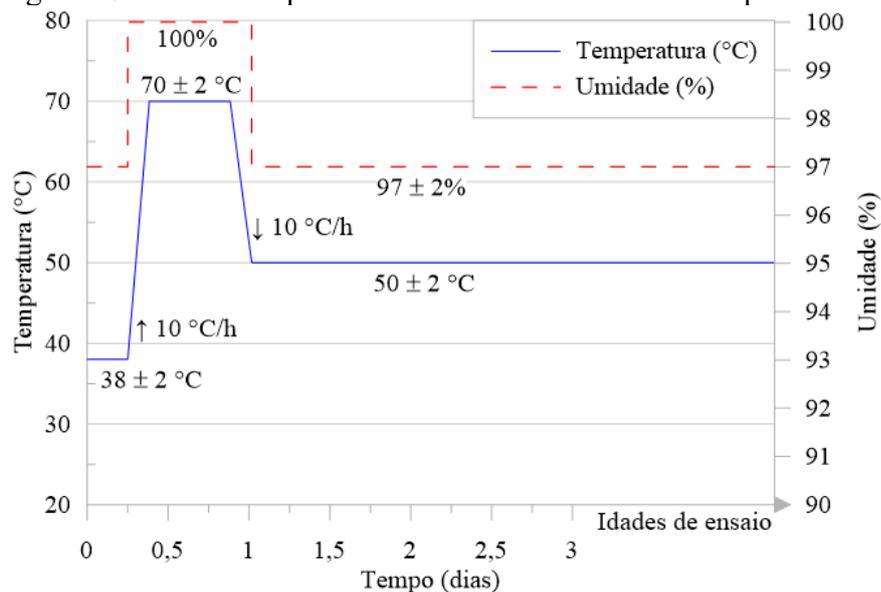
Figura 39 – Tanque de aquecimento utilizado no tratamento térmico das amostras



Fonte: Autora (2023).

Após a moldagem, os corpos de prova foram armazenados em uma câmara úmida a  $38 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $97 \pm 2\%$  por um período de 6 horas. Após esse intervalo, foi realizada a desmoldagem e as amostras foram transferidas para um tanque de aquecimento com 100% de umidade relativa. O tanque foi aquecido a uma taxa de  $10$  °C/h, até atingir  $70$  °C. Essa condição foi mantida por 12 horas, e em seguida, a temperatura foi reduzida a uma taxa de  $10$  °C/h, até atingir  $50$  °C. As amostras foram então transferidas para uma câmara úmida a  $50 \pm 2$  °C e com umidade relativa de  $97 \pm 2\%$ , onde foram mantidas até as idades de ensaio. Na Figura 40 está representado o gráfico referente ao tratamento térmico realizado.

Figura 40 – Gráfico representativo do tratamento térmico para a DEF



Fonte: Autora (2023).

#### 4.2.2.3 Formação de etringita tardia + reação álcali-agregado (DEF + RAA)

O tratamento térmico utilizado para promover ambas as reações será o mesmo descrito anteriormente, conforme apresentado no item 4.2.2.2, referente à formação de etringita tardia.

#### 4.2.2.4 Referências

A cura para ambas as amostras de referência foi realizada em uma câmara úmida a  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa superior a 95% (Figura 41), sendo armazenadas nesta condição logo após a moldagem e retiradas apenas para a desmoldagem após 6 horas. Essa condição foi mantida até as idades de ensaio.

Figura 41 – Armazenamento dos corpos de prova de referência em câmara úmida



Fonte: Autora (2023).

#### 4.2.3 Monitoramento das reações expansivas

Para acompanhar o desenvolvimento das reações expansivas endógenas, foram realizadas medições quinzenais das variações dimensional a partir dos 7 dias após a moldagem. Foram utilizados doze corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm para cada reação expansiva (RAA, DEF e DEF + RAA). As amostras de referência não foram monitoradas por meio de

variação dimensional, uma vez que foram armazenadas em um ambiente pouco propício ao surgimento de mecanismos expansivos no período de realização do estudo.

A medição foi realizada a partir de pinos de referência. Para a fixação desses pinos, conforme ilustrado na Figura 42 (a-i), os corpos de prova foram inicialmente retificados em uma retífica com disco diamantado. Em seguida, as faces superior e inferior foram perfuradas de forma centralizada, utilizando uma furadeira de bancada e uma broca do tipo serra copo diamantada com diâmetro de 6 mm. Os furos foram limpos em água corrente, e secos com um soprador térmico. Os pinos foram fixados e colados utilizando um adesivo epóxi tixotrópico resistente a altas temperaturas, juntamente com um catalisador para acelerar a secagem do adesivo. A cola foi introduzida nos furos realizados, seguida pela colocação dos parafusos para concreto com a cabeça plana/chata, de dimensão 4,2 mm x 19 mm. Os excessos de cola ao redor dos pinos foram removidos para evitar erros na medição das expansões.

Figura 42 – Processo de inserção dos pinos para medição das expansões: a) retificação do corpo de prova; b) centralização do corpo de prova; c) perfuração; d) limpeza do furo; e) secagem do furo; f) preparação da cola; g) preenchimento do furo com cola; h) introdução do parafuso; i) limpeza do excesso de cola no entorno do parafuso



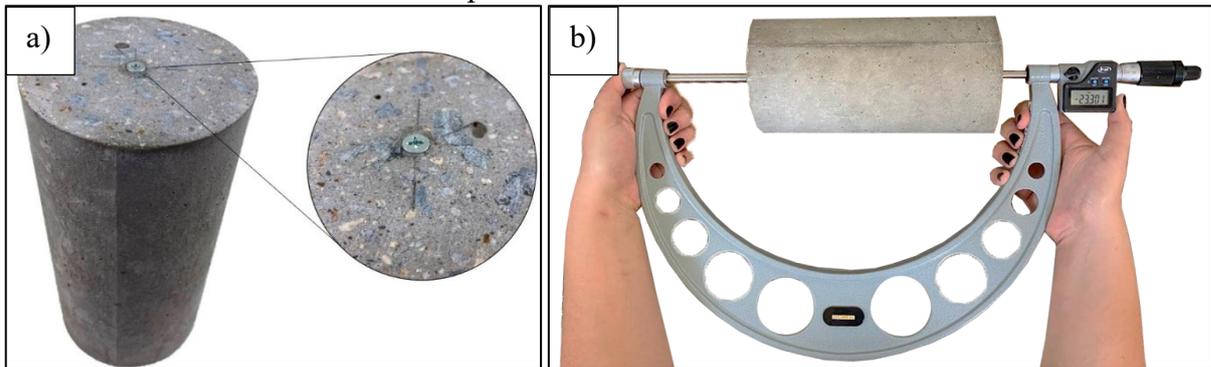
Fonte: Autora (2023).

Antes de cada medição, os corpos de prova foram armazenados durante 24 horas em um ambiente com temperatura controlada a  $23 \pm 2$  °C.

Para a medição, foi utilizado um micrômetro de 30 cm, com precisão de 0,001 mm. O equipamento foi posicionado sobre os pinos e foram realizadas 10 medições em cada corpo de

prova. A cada medição, o corpo de prova foi girado em  $36^\circ$ , sendo que cada um dos 10 pontos de medição foi identificado para que as medições fossem realizadas sempre nos mesmos pontos. A Figura 43 ilustra o processo de medição.

Figura 43 – Acompanhamento da expansão: a) corpo de prova com pino; b) medição da expansão com micrômetro



Fonte: Autora (2023).

Durante a etapa de medição, foi utilizada uma planilha em Excel para o armazenamento dos valores medidos. Essa planilha foi automatizada para identificar valores discrepantes (*outliers*), utilizando o critério de Chauvenet. Após a realização das 10 medições, caso algum dado apresentasse um valor de distribuição normal inferior a 0,05, este era descartado e uma nova medição naquele mesmo ponto era realizada.

#### 4.2.4 Caracterização do concreto

Além do controle das variações dimensionais e de massa, as amostras de todos os mecanismos expansivos foram ensaiadas aos 28 e 200 dias, visando a caracterização do concreto em diferentes estágios de degradação. Os ensaios realizados estão apresentados no Quadro 4 e descritos na sequência.

Quadro 4 – Ensaio de caracterização do concreto e respectivas normas técnicas utilizadas

Ensaio		Norma internacional	Norma brasileira equivalente
Ensaio não destrutivos (ENDs)	Velocidade de ultrassom	ASTM C597:2022f	ABNT NBR 8802:2019b
	Resistividade elétrica	-	ABNT NBR 9204:2012a
Caracterização física	Capilaridade	ASTM C1585:2020c	ABNT NBR 9779:2012b
	Absorção e índice de vazios	ASTM C642:2021d	ABNT NBR 9778:2009d
Caracterização mecânica	Compressão axial	ASTM C39/C39M:2021c	ABNT NBR 5739:2018e
	Tração por compressão na diametral	ASTM C496/C496M:2017d	ABNT NBR 7222:2011
	Módulo de elasticidade estático	ASTM C469/C469M:2022e	ABNT NBR 8522-1:2021d
	Energia de fraturamento (modo G1)	-	-
Microscopia	MEV	-	-
	DRI	-	-
Caracterização química	DRX	-	-

Fonte: Autora (2023).

#### 4.2.4.1 Ensaio não-destrutivos

Os ensaios não destrutivos foram realizados com o intuito de obter respostas qualitativas do concreto e complementar os resultados dos ensaios destrutivos, sendo realizados os seguintes ensaios: velocidade de propagação de ondas por meio de ultrassom e resistividade elétrica superficial.

Para ambos os ensaios, foram ensaiadas 18 amostras cilíndricas para cada mecanismo expansivo, em cada idade de ensaio, antes dessas serem submetidas aos ensaios físicos e mecânicos.

##### a. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

O ensaio de velocidade de propagação de ondas foi realizado conforme ASTM C597:2022f, sendo utilizado um equipamento com transdutor de onda compressiva de frequência de 54 kHz, juntamente com gel para acoplamento dos transdutores (Figura 44).

Figura 44 – Realização de ensaio de velocidade de ultrassom



Fonte: Autora (2023).

A partir do tempo de propagação de onda e da distância entre os transdutores, a velocidade foi calculada através da Equação 8.

$$V = \frac{L}{t} \quad (8)$$

Onde:

V: velocidade de propagação de onda (m/s);

L: distância entre transdutores (m);

t: tempo de percurso das ondas (s).

#### b. Resistividade elétrica

Para avaliar a taxa de corrosão provável da armadura quando em conjunto com o concreto analisado, foi realizado o ensaio de resistividade elétrica superficial, utilizando o método dos quatro pontos em um arranjo Wenner. O ensaio foi conduzido utilizando os corpos de prova recém retirados das câmaras úmidas, enquanto ainda estavam no estado saturado. A Figura 45 ilustra a realização do ensaio.

Figura 45 – Ensaio de resistividade elétrica superficial

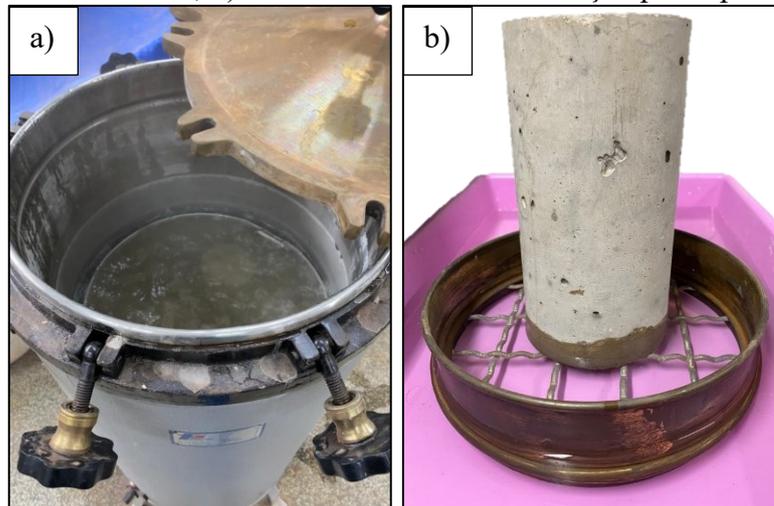


Fonte: Autora (2023).

#### 4.2.4.2 Caracterização física

Os ensaios de caracterização física incluíram a determinação da absorção de água e do índice de vazios, realizados de acordo com a ASTM C642:2021d. Além disso, foi realizado o ensaio de absorção de água por capilaridade, seguindo as diretrizes da ASTM C1585:2020c. A Figura 46 mostra os ensaios em andamento.

Figura 46 – Ensaios de caracterização física: a) amostras submetidas a absorção durante processo de fervura; b) amostra submetida a absorção por capilaridade



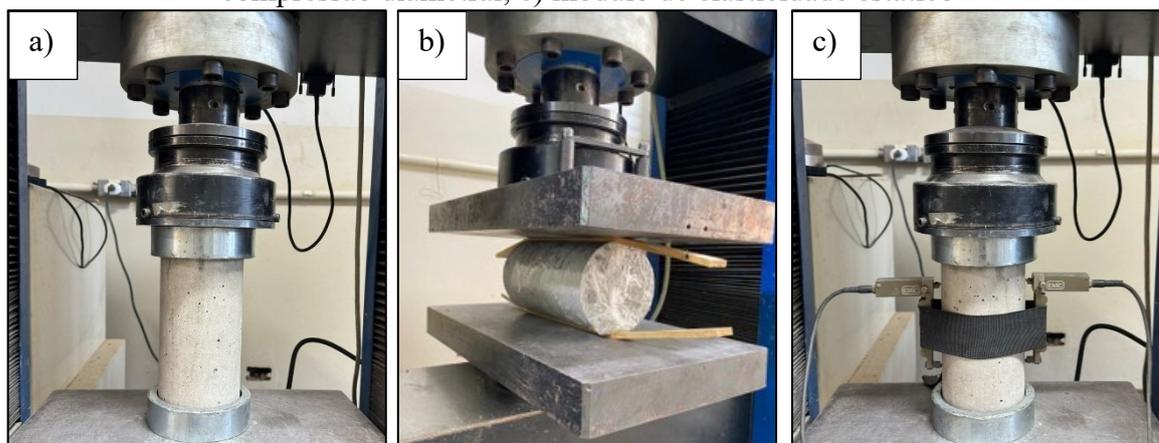
Fonte: Autora (2023).

Para cada mecanismo expansivo, em cada idade de ensaio, foram ensaiadas seis amostras cilíndricas, sendo três para a determinação da absorção de água e do índice de vazios e três para a absorção de água por capilaridade.

#### 4.2.4.3 Caracterização mecânica

Para a caracterização mecânica do material, foram realizados os ensaios de resistência à compressão, conforme ASTM C39/C39M:2021c; resistência à tração por compressão diametral, conforme ASTM C496/C496M:2017d; e módulo de elasticidade estático à compressão, conforme ASTM C469/C469M:2022e. Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina universal de ensaios com capacidade de carga de 600 kN, utilizando discos de neoprene 70 shore confinados em base metálica como sistema de regularização dos topos das amostras. Conforme apresentado no capítulo de resultados, as amostras de resistência à compressão aos 200 dias ultrapassaram a capacidade de carga da máquina e, por isso, foram rompidas em outra máquina, com capacidade de carga de 1000 kN. A Figura 47 (a-c) ilustra a realização dos ensaios.

Figura 47 – Ensaios mecânicos: a) resistência à compressão; b) resistência à tração por compressão diametral; c) módulo de elasticidade estático



Fonte: Autora (2023).

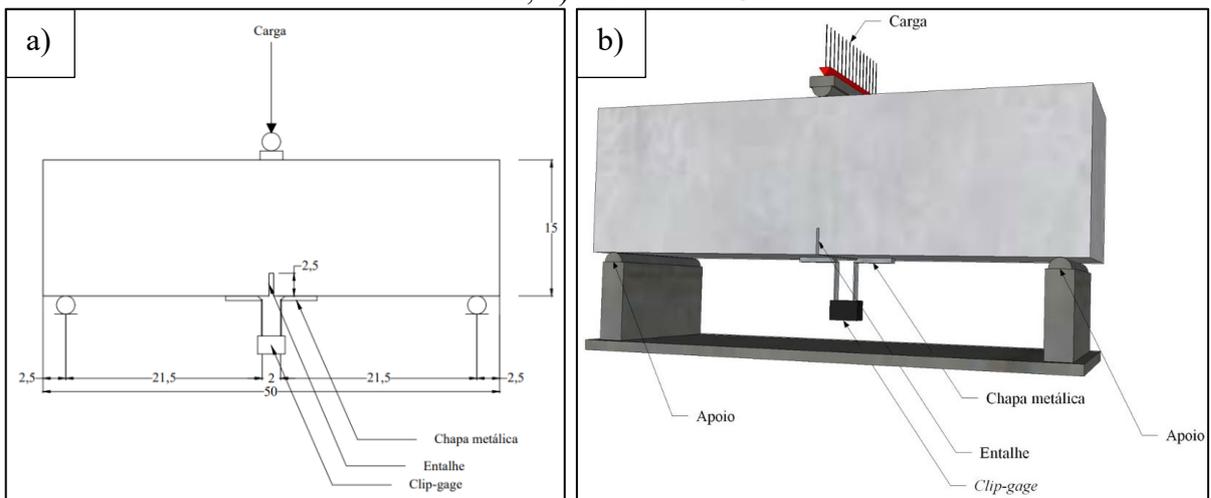
Foram ensaiadas nove amostras cilíndricas para cada mecanismo expansivo, em cada idade de ensaio, sendo três para resistência à compressão, três para resistência à tração por compressão diametral e três para módulo de elasticidade estático.

##### a. Energia de fraturamento pelo modo I (G<sub>I</sub>)

Para finalizar a caracterização mecânica, foi realizado o ensaio de determinação da energia de fraturamento pelo modo I (G<sub>I</sub>), o qual, segundo estudo de Leite (2023), apresenta sensibilidade na avaliação das expansões geradas por mecanismos deletérios do concreto.

O ensaio foi conduzido de acordo a recomendação TC 50-FMC, que envolve o teste de flexão em três pontos em uma viga entalhada (HILLERBORG, 1985). Foram utilizadas amostras prismáticas, com dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm, e foi feito um entalhe central de 2,5 cm de altura utilizando uma serra circular manual, com o objetivo de formar uma fissura preferencialmente nesta posição. A Figura 48 (a-b) ilustra a configuração do ensaio.

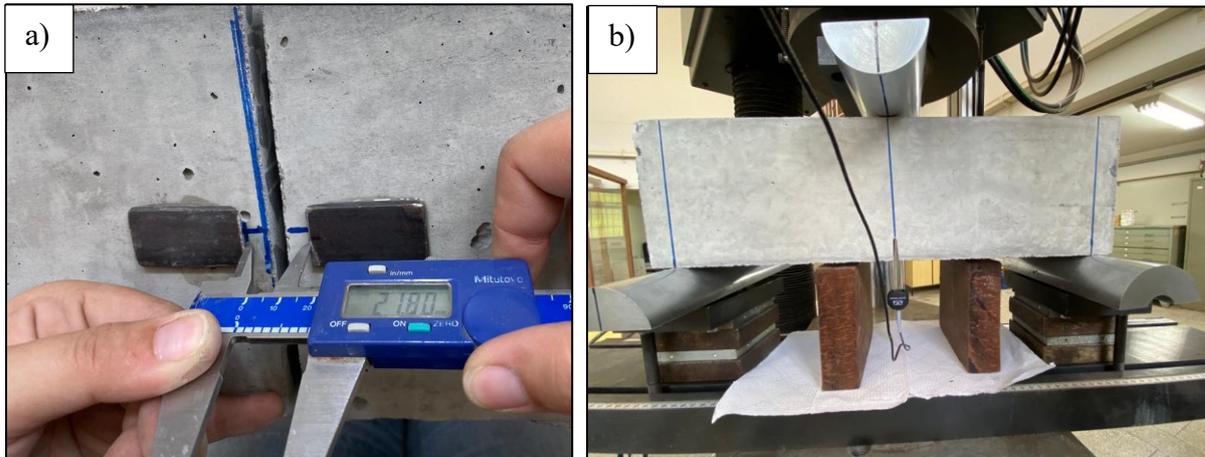
Figura 48 – Configuração do ensaio de energia de fraturamento pelo modo 1 (G1): a) desenho em 2D; b) desenho em 3D



Fonte: Autora (2023).

Para a aquisição dos dados, foi utilizado um *clip-gage* (CG) posicionado entre duas chapas metálicas coladas ao lado do entalhe com cola instantânea, conforme Figura 49a. Inicialmente, o CG foi posicionado com um fechamento máximo de 20 mm, com o objetivo de evitar danos ao equipamento. A amostra foi carregada em uma máquina universal de ensaio, com capacidade de carga de 1000 kN, a uma velocidade de 0,1 mm/min, até atingir 4 mm ou romper. A Figura 49b mostra o ensaio sendo executado.

Figura 49 – Ensaio de energia de fraturamento: a) colagem das chapas metálicas para o posicionamento do *clip-gage*; b) ensaio em andamento



Fonte: Autora (2023)

O resultado do ensaio foi a curva carga *versus* deslocamento da abertura do entalhe, sendo que a energia de fraturamento ( $G_1$ ) foi calculada pela Equação 11.

$$G_1 = \frac{W}{A_{lig}} \quad (11)$$

Onde:

$G_1$ : Energia de fraturamento ( $J.m^2$ );

$W$ : Energia absorvida ( $N/m$ ), obtida da área sob o gráfico carga *versus* deslocamento;

$A_{lig}$ : Área de ligação ( $m^2$ ).

Foram ensaiadas seis amostras prismáticas para cada mecanismo expansivo, em cada idade de ensaio.

#### 4.2.4.4 Análises por microscopia

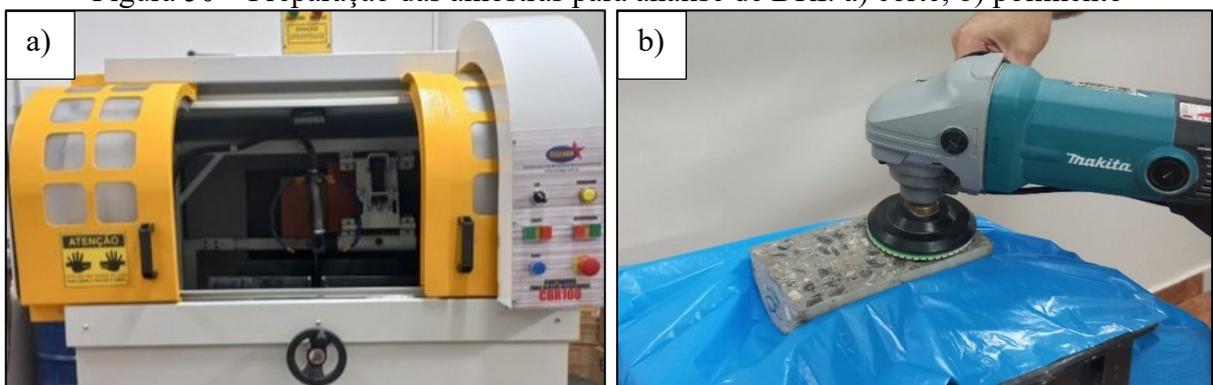
##### a. Damage Rating Index (DRI)

O método de *Damage Rating Index* (DRI) consiste em uma análise microscópica realizada com o uso de um microscópio óptico (ampliação de 15 a 16 vezes), no qual os danos característicos de reações expansivas são contados através de uma grade dividida em quadrados de  $1\text{ cm}^2$  (ou seja,  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ). Para a realização da técnica, a superfície deve ter pelo o

menos 200 cm<sup>2</sup>, porém ao final da análise, o valor de DRI é normalizado para uma área de 100 cm<sup>2</sup> (GRATTAN-BELLEW; MITCHELL, 2006).

Primeiramente os corpos de prova cilíndricos foram cortados perpendiculares a base, utilizando-se uma cortadora de blocos refratários (Figura 50a). Então, foi realizado o polimento com uma lixadeira angular a úmido, conforme Figura 50b, sendo utilizadas lixas diamantadas de granulometrias 50, 200, 400 e 800. Para obter uma superfície reta, lisa e sem irregularidades, foi realizado o polimento durante 5 minutos com cada lixa.

Figura 50 – Preparação das amostras para análise de DRI: a) corte; b) polimento



Fonte: Autora (2024).

Após a preparação dos corpos de prova, foi realizada a marcação dos 200 quadrados de 1 cm<sup>2</sup>, e feita a análise da amostra em um estereomicroscópio *Lumen* com ampliação de 16 vezes (Figura 51).

Figura 51 – Análise de DRI sendo realizada



Fonte: Autora (2024).

Cada dano petrográfico encontrado foi contabilizado e então multiplicado por um fator de ponderação, conforme Quadro 5, utilizado para relativizar a importância do dano quanto ao mecanismo sofrido (VILLENEUVE; FOURNIER; DUCHESNE, 2012).

Quadro 5 – Fatores de ponderação do DRI

<b>Dano petrográfico</b>	<b>Sigla</b>	<b>Fator</b>
Fissuras fechadas em agregados graúdos	CCA ( <i>closed cracks in aggregates</i> )	0,25
Fissuras abertas ou em rede em agregados graúdos	OCA ( <i>opened cracks in aggregates</i> )	2
Fissuras abertas ou em rede com produto de reação em agregados graúdos	OCAG ( <i>opened cracks with reaction product in aggregate</i> )	2
Agregado graúdo descolado	CAD ( <i>coarse aggregate de-bonded</i> )	3
Partícula de agregado desagregada/corroída	DAP ( <i>disaggregate/corroded aggregate particle</i> )	2
Fissuras na pasta de cimento	CCP ( <i>cracks in cement paste</i> )	3
Fissuras com produto de reação na pasta de cimento	CCPG ( <i>cracks with reaction product in cement paste</i> )	3

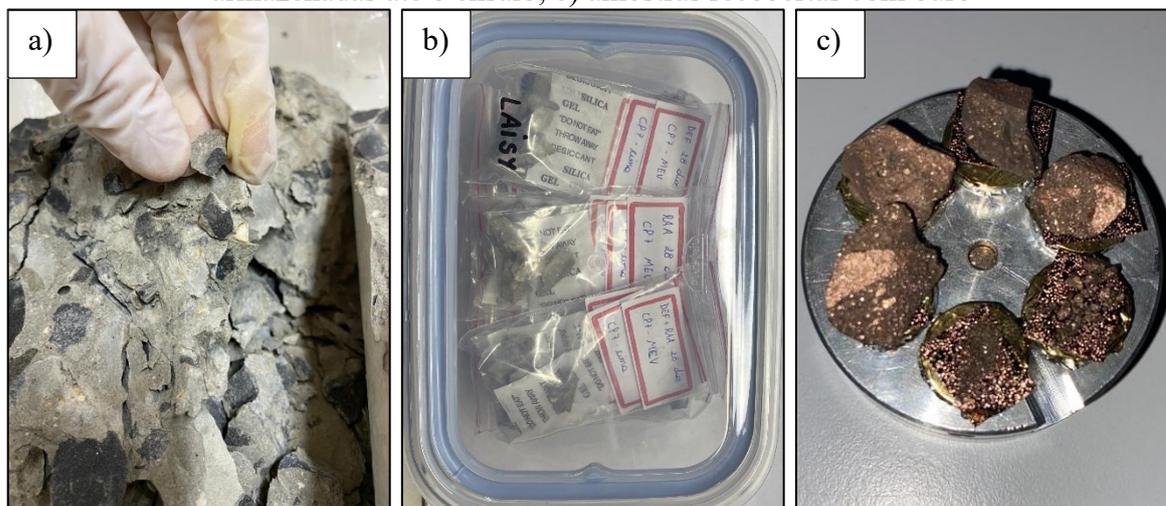
Fonte: Villeneuve, Fournier e Duchesne, 2012.

Ao final da análise realizada na superfície de 200 cm<sup>2</sup>, o valor de DRI foi normalizado para uma área de 100 cm<sup>2</sup>. O número de DRI final foi obtido por meio da média de valores de três corpos de prova de cada mecanismo expansivo, para cada idade. Assim como no monitoramento das variações dimensionais, as amostras de referência não foram analisadas por meio do DRI, já que foram armazenadas em um ambiente pouco propício ao surgimento de danos por mecanismos expansivos.

#### b. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em amostras com dimensões de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup>, retiradas dos corpos de prova após o rompimento à compressão (Figura 52a). Foram retiradas entre quatro a seis amostras de cada corpo de prova rompido à compressão. Contudo, por se tratar de um ensaio exploratório, onde o intuito principal era identificar a presença dos mecanismos expansivos por meio na morfologia dos produtos de reação, nem todas as amostras foram analisadas.

Figura 52 – Amostras para MEV: a) retirada de amostra do corpo de prova; b) amostras armazenadas até o ensaio; c) amostras recobertas com ouro



Fonte: Autora (2023).

Após serem retirados dos corpos de prova, os exemplares foram secos em estufa a 50 °C durante 24 horas. Como as análises não puderam ser realizadas na idade exata de 28 dias, as amostras foram armazenadas em sacos *zip lock*, juntamente com sílica gel, dentro de um pote hermético (Figura 52b). A fim de evitar o avanço das reações expansivas, as amostras ficam dentro de um refrigerador com temperatura de aproximadamente 10 °C.

Antes da realização da análise, as amostras foram recobertas com uma camada de ouro (Figura 52c). Foi utilizada uma fita de carbono para fixar as amostras no suporte metálico da câmara de vácuo do microscópio eletrônico *Zeiss EVO MA10*.

#### 4.2.4.5 Análise química

Após a retirada das amostras de MEV dos corpos de prova rompidos à compressão, foram retiradas as amostras para realização da análise química dos mesmos corpos de prova. Para isso, os agregados graúdos foram removidos e somente a parte referente à argamassa foi utilizada. Foram obtidas aproximadamente 100 gramas de argamassa de cada corpo de prova.

A preparação consistiu na secagem das amostras a 50 °C durante 24 horas, seguida da execução do processo de moagem em um moinho de discos oscilantes e, em seguida, peneiramento manual utilizando a peneira #200 (75 µm). Para cada corpos de prova, foi realizado o processo de quarteamento até que fosse obtido cinco gramas de material. Então, as cinco gramas de cada corpo de prova, de um mesmo mecanismo expansivo e mesma idade,

foram misturados e armazenados em *eppendorfs* de 2 mL. O processo realizado está ilustrado nas imagens da Figura 53.

Figura 53 – Processo de preparação das amostras: a) amostras secas; b) moinho de discos; c) amostras moídas; d) peneiramento; e) quartejamento; f) armazenamento em *Eppendorf*

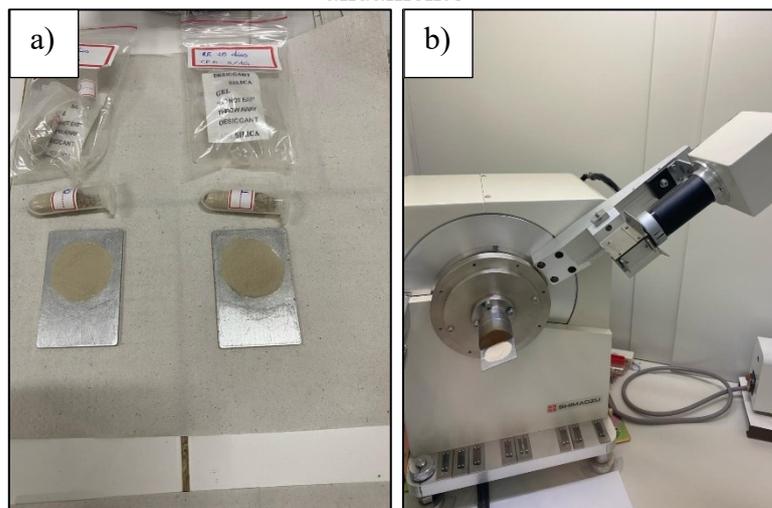


Fonte: Autora (2023).

#### a. Difração de raios-X (DRX)

A análise de difração de raios-X (DRX) foi realizada para a identificação dos compostos presentes nas amostras de concreto. Para isso, foi escolhido um *eppendorf* aleatório dentre os disponíveis de cada mecanismo e de cada idade. As amostras foram prensadas manualmente no porta-amostra do equipamento, conforme Figura 54a.

Figura 54 – Análise de DRX: a) amostras fixadas (prensadas) no porta-amostra; b) análise em andamento



Fonte: Autora (2024).

As análises foram conduzidas no equipamento (Figura 54b) utilizando os seguintes parâmetros: radiação  $\text{CuK}\alpha$  (1,540 Å), tensão elétrica de 40 kV e corrente de 30 mA. Foi utilizado um modo de varredura contínuo, com um passo angular de  $0,016^\circ$  em  $2\theta$ , no intervalo de 7 a  $70^\circ$ . A velocidade de varredura foi de  $2^\circ/\text{min}$ . Os difratogramas obtidos foram comparados com os dados do banco de dados *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) e permitiram uma análise qualitativa dos picos relacionados aos elementos presentes nas amostras.

#### 4.2.5 Tratamento estatístico

A padronização, a formatação e a apresentação dos dados foram realizadas utilizando-se tabelas e gráficos. Para a análise estatística, com um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), foi utilizado o *software* Minitab, seguindo os seguintes passos:

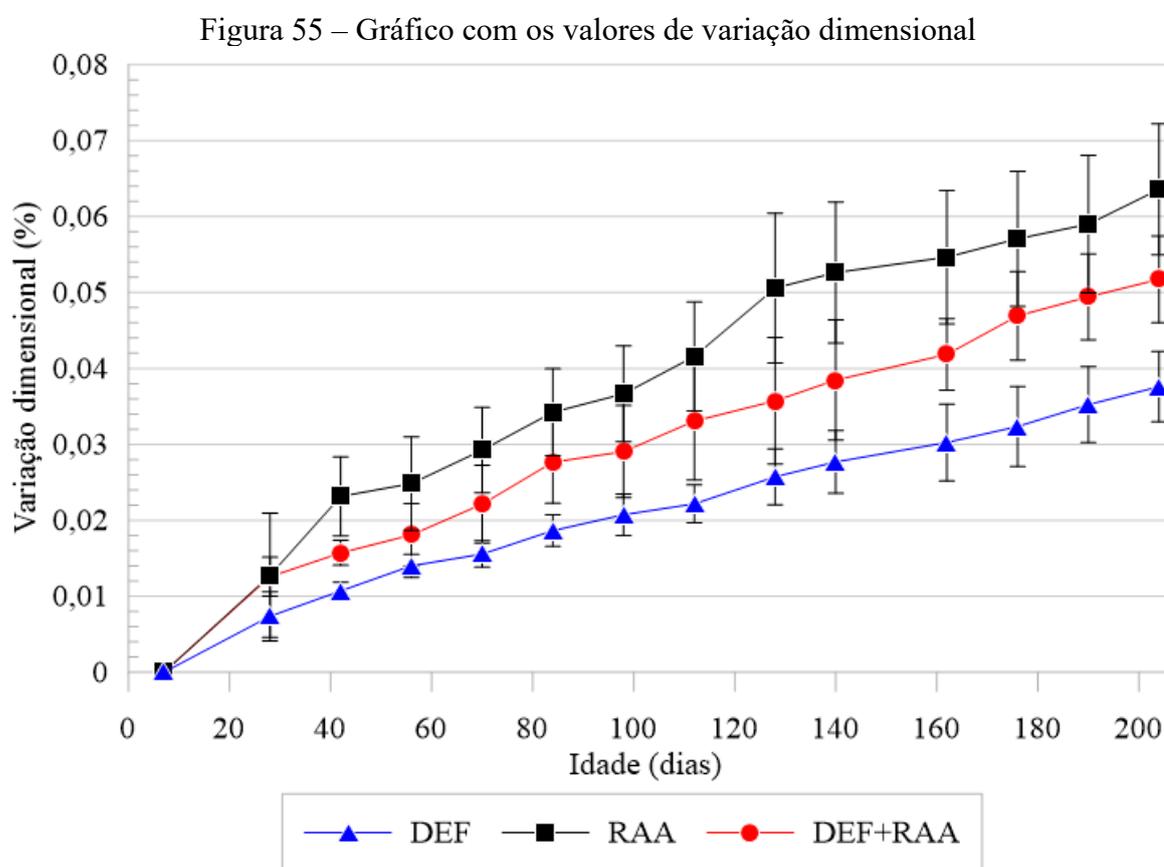
- Foi realizada uma avaliação global dos dados para a identificação de valores discrepantes (*outliers*) utilizando-se uma análise *box-plot*;
- Cálculo das medidas de tendência central de dispersão;
- Assumiu-se independência dos grupos de dados, já que se trata de diferentes ensaios em amostras que foram preparadas com diferentes materiais e condições de cura, conforme apresentado nos tópicos 4.2.1 e 4.2.2;
- Foi feita a verificação do tipo de distribuição dos dados (normalidade) e homogeneidade das variâncias: teste de Anderson-Darling e Levene, respectivamente;

- Para as amostras que não atenderam a hipótese de normalidade, foi realizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis;
- Para as amostras que atenderam a hipótese de normalidade, mas que não apresentaram homogeneidade das variâncias, foi realizada a análise ANOVA com um fator, seguida do teste *post-hoc* de Games-Howell;
- Para as amostras que atenderam ambas as hipóteses de normalidade e homogeneidade das variâncias, foi realizada a análise ANOVA com um fator, seguida do teste *post-hoc* de Tukey. Os dados apresentados nas tabelas são, em sua maioria, derivados desta análise; os dados que foram obtidos pelas demais análises estão identificados com notas de rodapé nas tabelas;
- Interpretação dos resultados: a interpretação dos resultados estatísticos foi complementada por estudos da literatura a respeito do tipo de material utilizado na fabricação dos corpos de prova e dos mecanismos deletérios.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 VARIAÇÃO DIMENSIONAL

A Figura 55 apresenta o gráfico com os resultados obtidos de variação dimensional para os grupos submetidos a reações expansivas (DEF, RAA e DEF+RAA), durante os 200 dias de análise. Durante todo o período da análise, foi observado que o grupo com maiores variações dimensionais foi o RAA, seguido do DEF+RAA, e por fim o DEF.



Ao final da análise, a RAA apresentou uma expansão de 0,0636%, a DEF+RAA expandiu 0,0517% e para o DEF, a expansão foi de 0,0376%. No Apêndice C são apresentados os dados em formato de tabela, bem como os detalhes da análise estatística realizada.

A partir da análise estatística, foi verificado que apenas aos 28 dias as amostras foram estatisticamente não diferentes, para todas as demais idades, houve diferença estatisticamente significativa entre os grupos. De acordo com os resultados obtidos, foi percebido uma tendência de maior expansão das amostras de RAA, seguida de DEF+RAA e, por fim, de DEF.

Conforme apresentado na revisão de literatura, para a RAA, a umidade apresenta a função de agente de transporte e contribui para a expansão dos produtos formados (gel) (FIGUEIRA *et al.*, 2019). Já no DEF, a umidade não atua diretamente nos processos químicos, mas na difusão dos íons nos poros, e para umidades abaixo de 100% a reação ocorre de forma mais lenta (AL SHAMAA *et al.*, 2015; KOTHARI; TAKAHASHI, 2022). Isso possivelmente é o motivo da diferença na cinética da expansão apresentada por essas duas reações ocorrendo separadamente no presente estudo.

Ao analisar a variação dimensional das reações ocorrendo simultaneamente (DEF+RAA), essa se encontra intermediariamente às reações ocorrendo separadamente. Este comportamento é oposto ao apresentado pela literatura, onde, geralmente, a combinação dos mecanismos causa maiores danos do que os mecanismos ocorrendo individualmente (SRIPRASONG; ASAMOTO; RAJ, 2020).

Conforme a Equação 6, apresentada do tópico 3.2.3 da revisão de literatura, a composição química das amostras atua diretamente na precipitação da DEF (PAUL *et al.*, 2022). Com relação a RAA, além da presença do agregado reativo, é essencial a presença dos álcalis na solução dos poros (FIGUEIRA *et al.*, 2019). Conforme Kothari e Takahashi (2022), o conteúdo alcalino predominantemente afeta a reação de precipitação da DEF ao controlar a liberação de sulfato no sistema. Logo, pode-se presumir que o comportamento encontrado na expansão dos mecanismos combinados é explicado pela reserva química das amostras, em especial o conteúdo alcalino. O possível compartilhamento dos álcalis entre RAA e DEF acaba por gerar um menor conteúdo alcalino disponível para a formação do gel de RAA e, conseqüentemente, uma menor expansão, quando comparado ao mecanismo de RAA ocorrendo individualmente.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Para cada ensaio, foi comparado cada grupo individualmente, e analisadas as possíveis diferenças estatisticamente significativas entre as idades de 28 e 200 dias. No Apêndice D são apresentadas, em formato de tabela, as comparações múltiplas realizadas entre os grupos por meio de análise estatística, em ambas as idades.

Além disso, foram comparados os resultados dos grupos acometidos por mecanismos expansivos com suas respectivas referências (inerte ou reativa) na idade de 200 dias. A partir

dessa comparação, foi possível isolar o efeito do aumento da idade e quantificar apenas o efeito gerado pela degradação decorrente dos mecanismos expansivos.

### 5.2.1 Ensaios não-destrutivos

#### 5.2.1.1 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

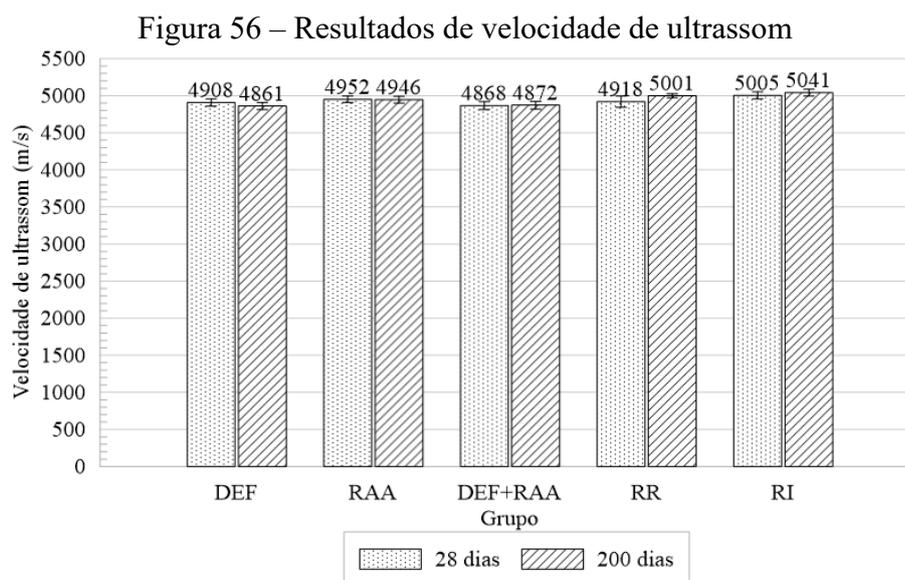
Analisando os dados obtidos com o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (Tabela 10 e Figura 56), os grupos DEF, referência reativa (RR) e referência inerte (RI) apresentaram diferença significativa entre as idades de 28 e 200 dias.

Tabela 10 – Resultados de velocidade de ultrassom, em m/s

Grupo	28 dias		200 dias		Valor-P
	Média (m/s)	Desvio padrão	Média (m/s)	Desvio padrão	
DEF	4908,32	47,87	4860,71	49,01	0,006
RAA	4951,66	43,43	4945,68	45,02	0,687
DEF+RAA	4867,54	53,52	4872,13	50,04	0,792
RR	4918,44	76,33	5000,66	26,45	0,000 <sup>1</sup>
RI	5004,86	47,73	5041,00	44,70	0,027

<sup>1</sup> Valor obtido a partir do teste de Gammes -Howell

Fonte: Autora (2024).



Observando os valores, percebe-se que os grupos de referências apresentaram um aumento da velocidade de ultrassom com o aumento da idade. A referência reativa apresentou

um aumento de 1,67% e a referência inerte aumentou 0,72%. Esse comportamento é, possivelmente, decorrente da densificação do concreto com o aumento da idade.

Em relação à DEF, a velocidade de ultrassom diminuiu em 0,97%, possivelmente devido aos danos internos causados por esse mecanismo expansivo. As amostras de RAA e DEF+RAA não mostraram uma alteração estatisticamente significativa entre as duas idades analisadas. Contudo, utilizando como base o comportamento de aumento de velocidade de ultrassom das amostras de referência, pode-se calcular a velocidade teórica das amostras submetidas a mecanismos expansivos, ou seja, a velocidade caso não houvesse a influência dos componentes deletérios.

Aplicando o aumento percentual da referência sobre a média da velocidade aos 28 dias, é obtida a velocidade teórica aos 200 dias. A partir da diferença entre a velocidade teórica e a real aos 200 dias, calcula-se a variação percentual gerada pelos mecanismos expansivos analisados, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Variação na velocidade de ultrassom causada pelos mecanismos expansivos

<b>Grupo</b>	<b>Velocidade teórica (m/s)</b>	<b>Diferença (teórica-real) (m/s)</b>	<b>Variação (%)</b>
DEF	4943,72	83,01	-1,68
RAA	5034,44	88,76	-1,76
DEF+RAA	4948,91	76,78	-1,55

Fonte: Autora (2024).

Subtraindo o efeito da possível densificação do concreto com o aumento das idades, e isolando a ação dos mecanismos expansivos, é verificado que a presença dos componentes deletérios afetou negativamente os valores de velocidade de ultrassom. Após essa análise, a redução da velocidade para o grupo de DEF foi mais significativa.

Em relação aos grupos de RAA e DEF+RAA, possivelmente, a presença de gel nos poros está mascarando os valores aos 200 dias, por isso a análise estatística não apresentou diferença significativa entre as duas idades. Conforme Sinha e Wei (2023), as relações mais baixas de Ca/Si no gel de reação álcali-sílica (RAS) indicam uma menor densidade do gel quando comparado ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pela densificação do concreto. Por isso, isolando o efeito da densificação com o aumento das idades, foi possível identificar a mudança na velocidade de ultrassom, mesmo com a presença do gel.

Comparando as variações da Tabela 11 com os resultados de variação dimensional (tópico 5.1), conclui-se que a RAA apresentou a maior variação dimensional e a maior variação

na velocidade de ultrassom, ou seja, a maior degradação. Todavia, o grupo de DEF, o qual apresentou a menor variação dimensional, foi o que apresentou a segunda maior variação na velocidade de ultrassom, o que pode ser explicado pela fissuração sem o preenchimento por gel, como ocorre nos outros mecanismos.

### 5.2.1.2 Resistividade elétrica superficial

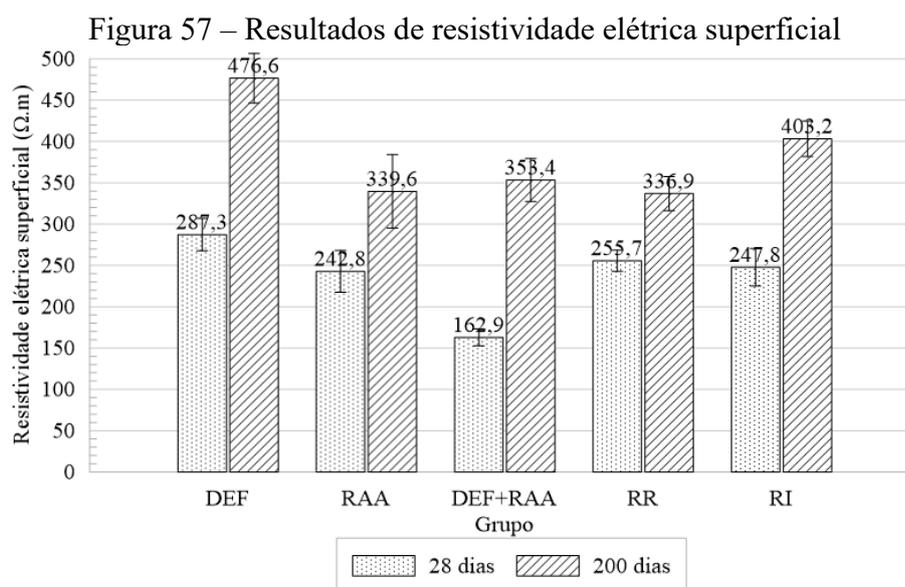
A Tabela 12 e Figura 57 apresentam os resultados obtidos com o ensaio de resistividade elétrica superficial, onde é demonstrado que todos os grupos apresentaram um aumento estatisticamente significativo nessa propriedade com o aumento da idade.

Tabela 12 – Resultados de resistividade elétrica superficial, em  $\Omega.m$

Grupo	28 dias		200 dias		Valor-P
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
DEF	287,33	19,72	476,56	30,02	0,000
RAA	242,78	25,37	339,60	44,50	0,000
DEF+RAA	162,89	10,27	353,44	26,01	0,000 <sup>1</sup>
RR	255,71	12,72	336,89	20,73	0,000
RI	247,83	22,70	403,17	21,45	0,000

<sup>1</sup> Valor obtido a partir do teste de Gammes -Howell

Fonte: Autora (2024).



Ao analisar os resultados, observa-se que o maior aumento foi do grupo de DEF+RAA, sendo que a variação foi de 117%, seguido dos grupos de DEF e RI, com variações de 65,9% e

62,7%, respectivamente. Em comparação aos demais, os grupos de RAA e RI apresentaram variações menos expressivas, com valores de 39,9% e 31,7%, respectivamente.

Executando a análise para isolar o efeito dos mecanismos expansivos (Tabela 13), por meio da comparação com as referências, observa-se que as variações continuam positivas. Ou seja, isso significa que mesmo descontando o efeito da idade do concreto, os grupos acometidos por mecanismos expansivos ainda apresentaram um ganho na resistividade elétrica.

Tabela 13 – Variação na resistividade elétrica superficial causada pelos mecanismos expansivos

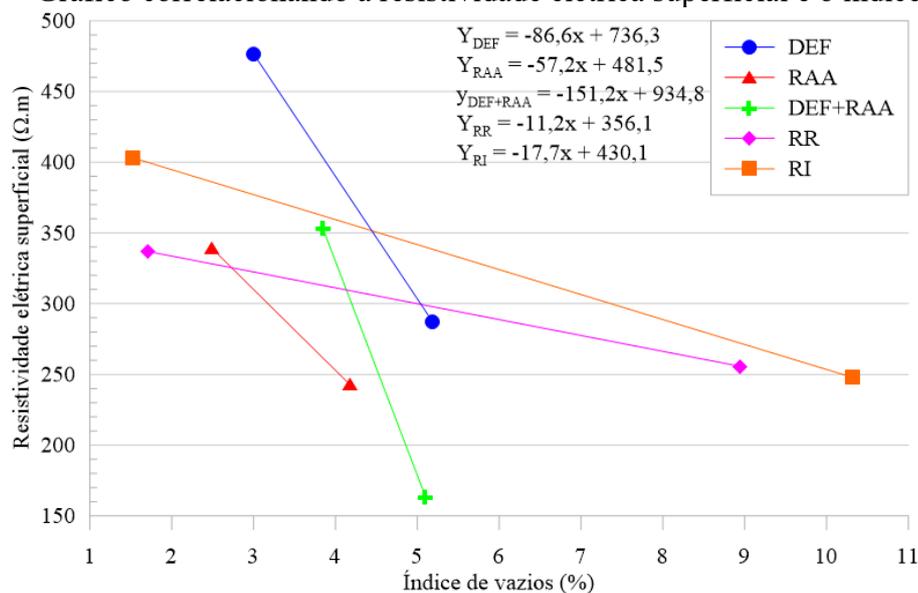
<b>Grupo</b>	<b>Resistividade teórica (<math>\Omega.m</math>)</b>	<b>Diferença (<math>\Omega.m</math>)</b>	<b>Variação (%)</b>
DEF	467,43	-9,13	1,95
RAA	319,86	-19,74	6,17
DEF+RAA	214,60	-138,84	64,70

Fonte: Autora (2024).

De forma geral, a literatura apresenta que a presença de mecanismos expansivos afeta negativamente os valores de resistividade elétrica, já que existe uma tendência desses mecanismos de criar microfissuras e contribuir para o aumento da porosidade e permeabilidade (GHASVAND *et al.*, 2023; RAMU *et al.*, 2021). Ainda, a presença de minerais condutivos (hematita) derivados da areia de minério de ferro tende a aumentar a condução elétrica no concreto e reduzir a resistividade elétrica (LIU, Y. *et al.*, 2022). Logo, esperava-se que houvesse uma redução na resistividade elétrica dos grupos com mecanismos expansivos, e não um aumento.

Contudo, analisando os resultados de índice de vazios, apresentados no item 5.2.2.2, houve a densificação do concreto com o aumento da idade, apesar dos mecanismos expansivos que estão acontecendo. Correlacionando ambos os ensaios, criou-se o gráfico da Figura 58.

Figura 58 – Gráfico correlacionando a resistividade elétrica superficial e o índice de vazios



Fonte: Autora (2024).

A partir das equações geradas para cada mecanismo, considerando os resultados de 28 e 200 dias de índice de vazios e resistividade elétrica superficial, observa-se coeficientes angulares mais negativos para os grupos com mecanismos expansivos. Esses coeficientes indicam uma maior taxa de diminuição da resistividade com o aumento dos vazios, quando em comparação com os concretos de referência. Contudo, como essas equações estão considerando apenas os dados de duas idades, não é prudente fazer qualquer conclusão com base nelas, sendo necessária uma análise com mais idades e níveis de expansão. Com isso, assume-se que os resultados obtidos com o ensaio de resistividade elétrica superficial foram inconclusivos.

## 5.2.2 Caracterização física

### 5.2.2.1 Absorção de água por capilaridade

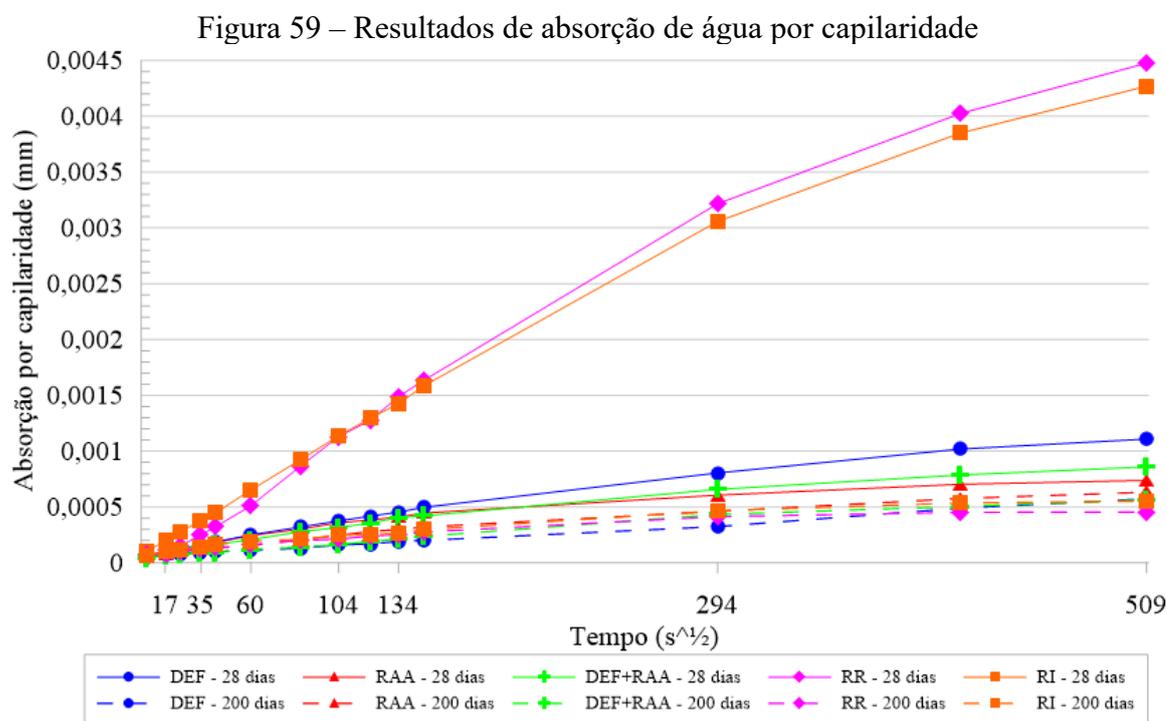
Com relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, os valores de absorção após 72 horas de ensaio estão apresentados na Tabela 14. Comparando as idades de 28 e 200 dias, observa-se uma variação negativa para todos os grupos, ou seja, houve uma redução na absorção de água por capilaridade com o aumento da idade. Entretanto, as reduções mais expressivas são das amostras de referência, sendo que RR apresentou uma redução de 89,8% e RI reduziu 87%. Além disso, somente as amostras de referência e DEF (variando -48,2%) apresentaram diferença estatisticamente significativa entre as duas idades.

Tabela 14 – Resultados de absorção de água por capilaridade após 72 horas, em mm

Grupo	28 dias		200 dias		Valor-P
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
DEF	1,11E-03	1,11E-04	5,75E-04	9,10E-05	0,003
RAA	7,39E-04	1,08E-04	6,33E-04	3,40E-05	0,179
DEF+RAA	8,60E-04	1,91E-04	6,21E-04	1,00E-06	0,192
RR	4,48E-03	1,06E-03	4,56E-04	1,80E-05	0,003
RI	4,27E-03	6,81E-04	5,53E-04	4,60E-05	0,001

Fonte: Autora (2024).

Ao analisar o comportamento da absorção por capilaridade durante as 72 horas de ensaio, de acordo com o gráfico da Figura 59, observa-se as amostras de referência (RR e RI), aos 28 dias, apresentaram uma absorção de água visivelmente discrepante dos demais grupos. A partir da comparação múltipla entre os grupos realizada nas análises estatística, confirmou-se que, aos 28 dias, as referências fazem parte de um mesmo agrupamento, e os grupos acometidos por mecanismos expansivos fazem parte de outro agrupamento.



A principal diferença entre esses grupos foi a condição de armazenamento, e há um consenso na literatura de que temperaturas de cura mais altas promovem uma maior taxa de hidratação do cimento, resultando em uma matriz de concreto mais densa, com menos porosidade e, conseqüentemente, resultando em menores valores de absorção de água

(LOTHENBACH *et al.*, 2007; PICHLER *et al.*, 2017). Ainda de acordo com esses autores, o grau final de hidratação alcançado independe da temperatura de cura, por isso, aos 200 dias, os valores encontrados são similares entre si.

Devido a essa diferença estatisticamente significativa aos 28 dias entre as referências e os demais grupos, o cálculo dos valores teóricos de absorção de água por capilaridade aos 200 dias, visando identificar o efeito isolado dos mecanismos expansivos nessa propriedade, não se aplica.

Contudo, apesar da redução na absorção por capilaridade com o aumento da idade, as menores diminuições são dos grupos de RAA, DEF+RAA e DEF, respectivamente. Esse resultado coincide com a ordem de maiores variações dimensionais. Ou seja, o grupo que apresentou maior expansão (RAA), foi também o que apresentou a menor variação na absorção por capilaridade entre as duas idades (-14,3%), e a maior absorção aos 200 dias ( $6,33 \cdot 10^{-4}$  mm).

Para uma conclusão mais assertiva a respeito do efeito dos mecanismos expansivos na absorção por capilaridade, seria necessário utilizar referências armazenadas na mesma temperatura que os grupos submetidos à mecanismos expansivos (neste caso, 50 °C) até os 28 dias.

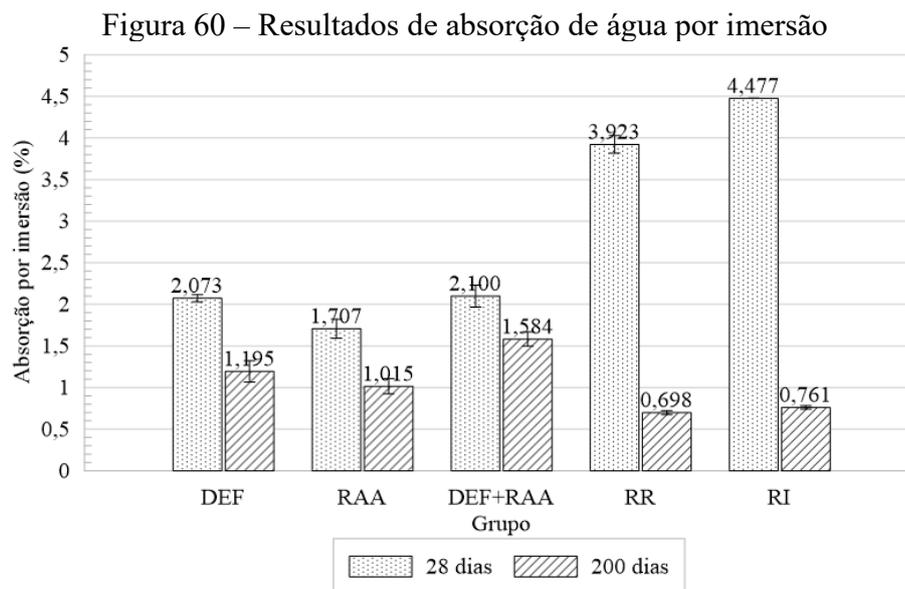
#### 5.2.2.2 Absorção de água e índice de vazios

Em relação à absorção de água por imersão, os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 15 e Figura 60, e é possível observar que todos os grupos apresentaram diferença estatisticamente significativa entre as duas idades. Assim como na absorção por capilaridade, houve uma redução na absorção por imersão com o aumento da idade, e as referências (RR e RI) foram os grupos que apresentaram as maiores discrepâncias (82,2 e 83% negativos, respectivamente).

Tabela 15 – Resultados de absorção de água por imersão, em %

Grupo	28 dias		200 dias		Valor-P
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
DEF	2,073	0,042	1,195	0,128	0,000
RAA	1,707	0,114	1,015	0,092	0,001
DEF+RAA	2,100	0,132	1,584	0,086	0,005
RR	3,923	0,105	0,698	0,024	0,000
RI	4,477	0,001	0,761	0,021	0,000

Fonte: Autora (2024).



A mesma análise feita na absorção por capilaridade se aplica à absorção por imersão, sendo ambas influenciadas pela temperatura de armazenamento das amostras. Todavia, a absorção por imersão apresentou um comportamento distinto em relação a variação dos grupos com mecanismos expansivos entre as duas idades. A ordem dos grupos com mecanismos expansivos, de maior para menor variação entre as duas idades, foram DEF (-42,3%), RAA (-40,5%) e DEF+RAA (-24,6%).

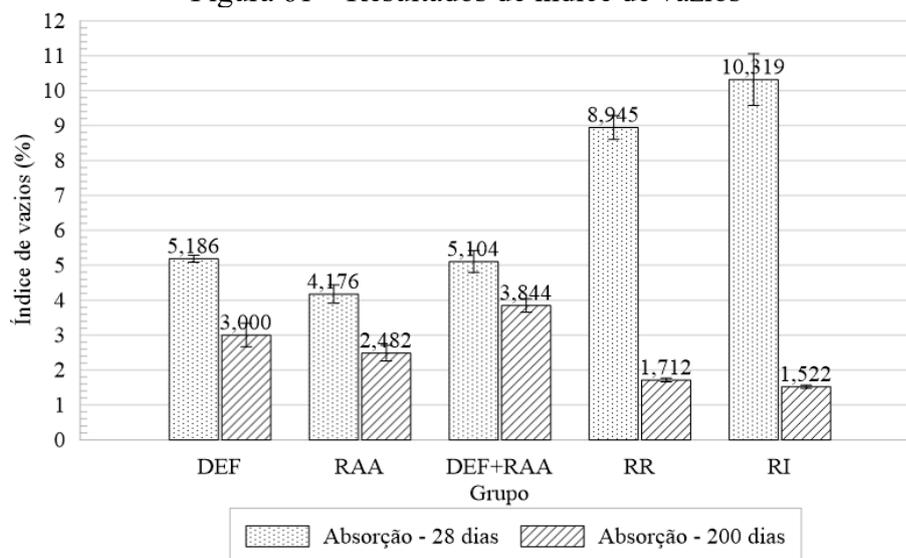
Já com relação aos resultados de índice de vazios, apresentados na Tabela 16 e Figura 61, também houve diferença significativa para todos os grupos em relação às duas idades analisadas. E foi observado o mesmo padrão de variação que na absorção por imersão: maiores variações negativas para os grupos de referência, seguido dos mecanismos expansivos isolados (DEF e RAA) e, por fim, os mecanismos ocorrendo juntos (DEF+RAA).

Tabela 16 – Resultados de índice de vazios, em %

Grupo	28 dias		200 dias		Valor-P
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
DEF	5,186	0,097	3,000	0,336	0,000
RAA	4,176	0,258	2,482	0,223	0,001
DEF+RAA	5,104	0,312	3,844	0,191	0,004
RR	8,945	0,338	1,712	0,056	0,000
RI	10,319	0,740	1,522	0,043	0,000

Fonte: Autora (2024).

Figura 61 – Resultados de índice de vazios



Fonte: Autora (2024).

Analisando os valores de absorção e índice de vazios, e a comparação múltipla entre os grupos realizada na análise estatística dos dados de 200 dias, verificou-se que as referências (RR e RI) fazem parte de um mesmo agrupamento, os mecanismos expansivos isolados (DEF e RAA) fazem parte de outro agrupamento, e os mecanismos ocorrendo simultaneamente (DEF+RAA) se encontram em um terceiro agrupamento.

Com isso, pode-se afirmar que houve uma maior densificação das amostras de referência com o aumento da idade, já que foram os grupos com menores índice de vazios e absorção por imersão aos 200 dias. Apesar de não ter sido possível isolar e quantificar o efeito dos mecanismos expansivos nessas propriedades do concreto, observa-se que os grupos com mecanismos expansivos apresentaram maiores valores de absorção e índice de vazios, quando em comparação com as referências aos 200 dias. Então, presume-se que os mecanismos expansivos estão afetando negativamente essas propriedades físicas do concreto. Ainda, o efeito mais negativo é observado quando os mecanismos estão ocorrendo simultaneamente.

### 5.2.3 Caracterização mecânica

#### 5.2.3.1 Resistência à compressão axial

Conforme apresentado na Tabela 17 e ilustrado na Figura 62, todos os grupos apresentaram ganho de resistência à compressão com o aumento da idade, apesar do aumento da expansão ocasionado pelos mecanismos expansivos. A partir da análise estatística, esse

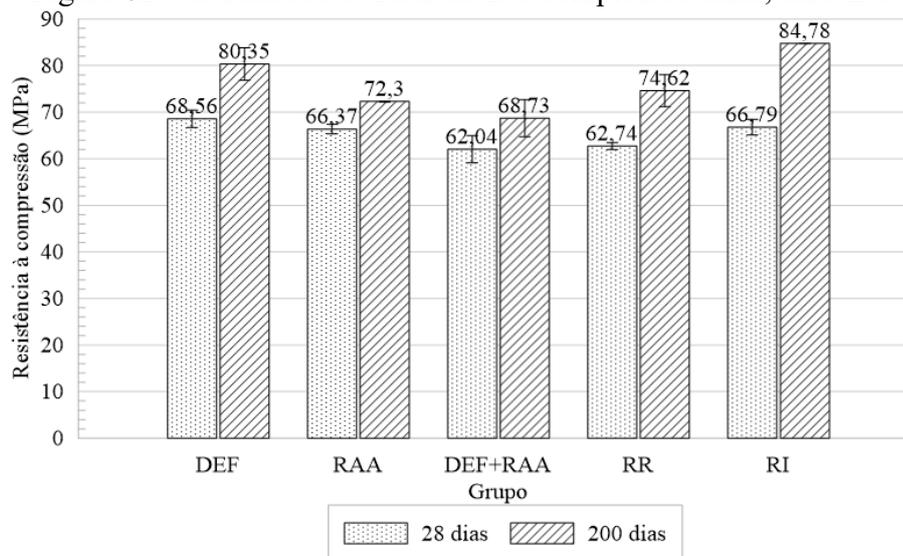
aumento foi estatisticamente significativo para todos os grupos, exceto DEF+RAA. Os maiores ganhos foram dos grupos de referências reativa e inerte, sendo 18,9% e 26,9%, respectivamente. Já as amostras de RAA, DEF+RAA e DEF apresentaram ganhos de 8,9%, 10,8% e 17,2%, respectivamente.

Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão axial, em MPa

Grupo	28 dias		200 dias		Valor-P
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
DEF	68,56	1,86	80,35	3,48	0,007
RAA	66,37	1,05	72,30	0,08	0,005
DEF+RAA	62,04	2,90	68,73	3,98	0,078
RR	62,74	0,75	74,62	3,43	0,004
RI	66,79	1,67	84,78	0,02	0,001

Fonte: Autora (2024).

Figura 62 – Resultados de resistência à compressão axial, em MPa



Fonte: Autora (2024).

Apesar da influência da temperatura de cura nas características físicas do concreto aos 28 dias, a análise estatística identificou que, para os resultados de resistência à compressão nessa idade, os grupos DEF e RI fazem parte de um mesmo agrupamento, e os grupos RAA, DEF+RAA e RR fazem parte de outro agrupamento.

Com isso, assume-se que a temperatura de armazenamento não afetou a resistência à compressão do concreto. Logo, utilizando como base os ganhos de resistência das amostras de referência, foi calculado a resistência à compressão teórica das amostras submetidas a mecanismos expansivos, da mesma forma em que foi realizado para a velocidade de ultrassom

e resistividade elétrica superficial. Então, foi obtida a diferença entre as resistências à compressão teórica e real, e a variação percentual ocasionada pelos mecanismos expansivos, conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Variação da resistência à compressão causada pelos mecanismos expansivos

<b>Grupo</b>	<b>Resistência teórica (MPa)</b>	<b>Diferença (teórica – real) (MPa)</b>	<b>Variação (%)</b>
DEF	87,03	6,68	-7,67
RAA	78,93	6,64	-8,41
DEF+RAA	73,79	5,06	-6,85

Fonte: Autora (2024).

Segundo a análise feita com base nos concretos de referência, assume-se que os mecanismos expansivos estão influenciando negativamente a resistência à compressão dos concretos. Contudo, a variação da resistência à compressão não acompanha o comportamento apresentado pela variação dimensional, onde as maiores expansões foram da RAA, seguido de DEF+RAA, e então a DEF.

De acordo com Mohammadi, Ghiasvand e Nili (2020), a resistência à compressão tende a diminuir devido à RAA, mas sua sensibilidade e intensidade de redução é variável, devido a fatores como grau de reatividade do agregado e propriedades do gel formado.

Já em estudos que avaliaram a relação entre expansão por DEF e a resistência à compressão, foi observado uma redução contínua na resistência com o aumento dos níveis de expansão (SANJEEWA; ASAMOTO, 2024).

### 5.2.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

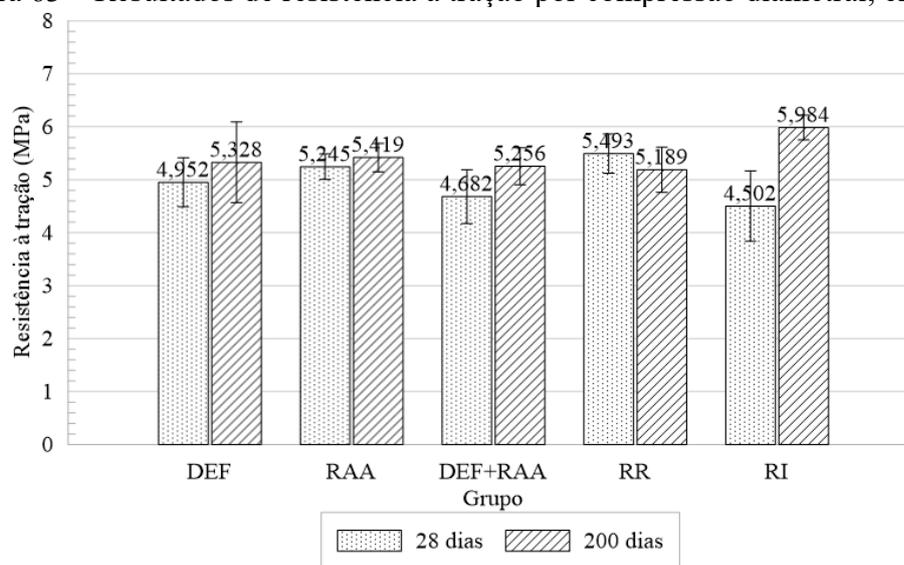
Conforme apresentado na Tabela 19 e ilustrado na Figura 63, com relação à resistência à tração por compressão diametral, apenas a referência inerte (RI) apresentou diferença estatisticamente significativa entre os 28 e 200 dias.

Tabela 19 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral, em MPa

Grupo	28 dias		200 dias		Valor-P
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
DEF	4,95	0,46	5,33	0,79	0,506
RAA	5,25	0,24	5,42	0,27	0,451
DEF+RAA	4,68	0,51	5,26	0,35	0,181
RR	5,49	0,37	5,19	0,43	0,405
RI	4,50	0,66	5,98	0,23	0,022

Fonte: Autora (2024).

Figura 63 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral, em MPa



Fonte: Autora (2024).

Com relação aos resultados de resistência à tração por compressão diametral e análise ANOVA, pode-se assumir que os mecanismos expansivos, para o nível de expansão dos grupos aos 200 dias, não influenciaram essa propriedade mecânica do concreto. Ainda, de acordo com a análise estatística múltipla entre os grupos, para ambas as idades, todos fazem parte de um mesmo agrupamento e são estatisticamente não diferentes. Logo, esse ensaio não apresentou resultados conclusivos para o acompanhamento das diferentes reações expansivas.

Contudo, vale ressaltar que o avanço das expansões pode futuramente afetar essa propriedade. Principalmente nas amostras com RAA, já que o gel formado exerce pressão, produz uma resistência à tração interna e reduz essa propriedade do concreto (MOHAMMADI; GHIASVAND; NILI, 2020).

### 5.2.3.3 Módulo de elasticidade estático

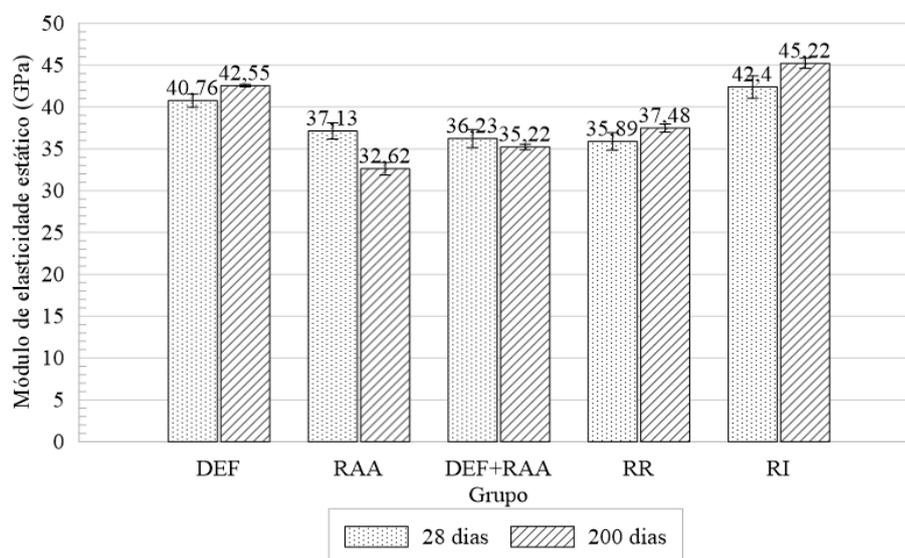
Com relação ao módulo de elasticidade estático, houve diferença estatisticamente significativa entre as idades de 28 e 200 dias para os grupos DEF, RAA e RI, conforme Tabela 20. O gráfico da Figura 64 ilustra os resultados encontrados. Dentre os grupos afetados por mecanismos expansivos, percebe-se que apenas DEF apresentou um aumento no módulo de elasticidade (4,38%). Quanto aos grupos de RAA e DEF+RAA, esses apresentaram uma redução de 12,15% e 2,78% no módulo, respectivamente.

Tabela 20 – Resultados de módulo de elasticidade estático, em GPa

Grupo	28 dias		200 dias		Variação (%)	Valor-P
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão		
DEF	40,76	0,77	42,55	0,16	4,38	0,017
RAA	37,13	0,97	32,62	0,76	-12,15	0,003
DEF+RAA	36,23	1,09	35,22	0,33	-2,78	0,201
RR	35,89	1,03	37,48	0,50	4,42	0,074
RI	42,40	1,34	45,22	0,59	6,67	0,029

Fonte: Autora (2024).

Figura 64 – Resultados de módulo de elasticidade estático, em GPa



Fonte: Autora (2024).

Ainda, foi feita a mesma análise realizada nos resultados de resistência à compressão, comparando as amostras afetadas por mecanismos expansivos com as amostras de referência. Conforme apresentado na Tabela 21, percebe-se que os mecanismos expansivos afetaram negativamente o módulo, e que a variação dessa propriedade para cada mecanismo acompanha

o comportamento de variação dimensional, onde o RAA apresentou a maior variação e expansão, seguido de DEF+RAA e DEF.

Tabela 21 – Variação do módulo de elasticidade estático causada pelos mecanismos expansivos

<b>Grupo</b>	<b>Módulo teórico (GPa)</b>	<b>Diferença (GPa)</b>	<b>Variação (%)</b>
DEF	43,48	0,93	-2,14
RAA	38,77	6,15	-15,87
DEF+RAA	37,83	2,61	-6,90

Fonte: Autora (2024).

O módulo de elasticidade é considerado mais sensível a fissuras internas do que a resistência à compressão, apresentando uma tendência de queda mais evidente com o crescimento da expansão (LU et al., 2022).

Ao observar os resultados, as amostras acometidas por RAA e DEF+RAA apresentaram as variações mais expressivas no módulo de elasticidade, apresentando valores negativos mesmo sem desconsiderar o efeito do avanço da idade. Já para o grupo DEF, a variação foi menos acentuada. De acordo com Sanjeeva e Asamoto (2024), a deposição de etringita nas fissuras abertas nos estágios iniciais pode contribuir para esse comportamento.

Já para as amostras de RAA, conforme Mohammadi, Ghiasvand e Nili (2020), o módulo de elasticidade é altamente sensível, mesmo em baixos níveis de expansão. Por isso, os autores afirmam que este é um dos ensaios mais confiáveis para a obtenção de correlações com a variação dimensional do concreto devido aos mecanismos expansivos.

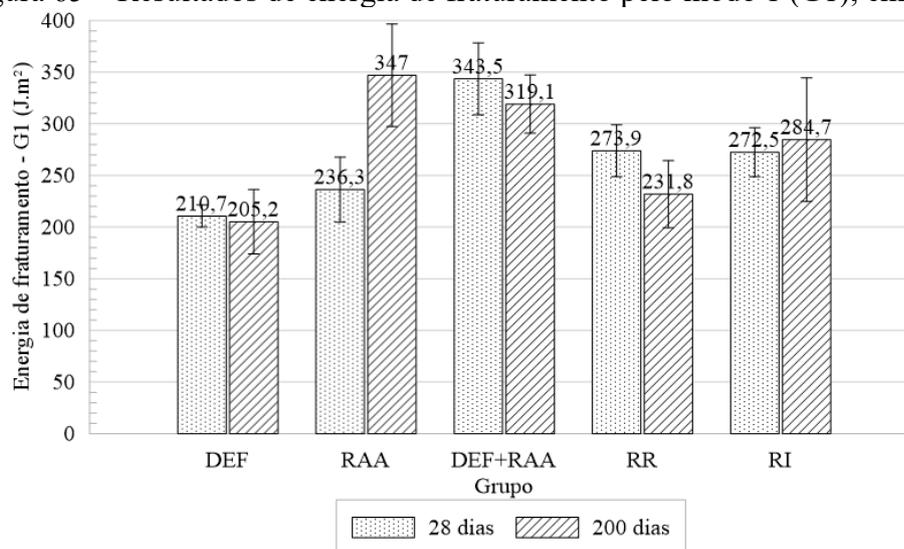
#### 5.2.3.4 Energia de fraturamento pelo modo 1 (G1)

Conforme apresentado na Tabela 22 e ilustrado na Figura 65, para o ensaio de energia de fraturamento pelo modo 1, apenas a RAA apresentou diferença estatisticamente significativa entre os 28 e 200 dias, sendo que o valor de energia de fraturamento aumentou em 46,85%.

Tabela 22 – Resultados de energia de fraturamento pelo modo 1 (G1), em J.m<sup>2</sup>

Grupo	28 dias		200 dias		Valor-P
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
DEF	210,75	10,67	205,20	31,30	0,744
RAA	236,30	31,40	347,00	49,60	0,002
DEF+RAA	343,50	34,90	319,10	28,20	0,212
RR	273,90	25,10	231,80	32,50	0,067
RI	272,50	23,80	284,70	59,80	0,662

Fonte: Autora (2024).

Figura 65 – Resultados de energia de fraturamento pelo modo 1 (G1), em J.m<sup>2</sup>

Fonte: Autora (2024).

Também foi realizada a comparação entre os grupos de mecanismos expansivos com as referências (Tabela 23). Ao analisar os resultados de variação, percebe-se que as amostras de RAA e DEF+RAA apresentaram um aumento na energia de fraturamento, enquanto a DEF diminuiu. Esse comportamento demonstra uma possível influência positiva dos produtos de RAA nessa propriedade do concreto.

Tabela 23 – Variação da energia de fraturamento pelo modo 1 causada pelos mecanismos expansivos

Grupo	G1 teórico (J.m <sup>2</sup> )	Diferença (J.m <sup>2</sup> )	Variação (%)
DEF	220,19	14,99	-6,81
RAA	199,98	-147,02	73,52
DEF+RAA	290,70	-28,40	9,77

Fonte: Autora (2024).

Conforme o estudo de Giaccio et al. (2008) a formação de múltiplas fissuras no concreto afetado por RAA resulta em uma zona de fratura maior, que podem dissipar a energia mais eficientemente do que uma única fissura dominante. Esse fenômeno pode levar a um aumento na energia de fraturamento em determinados estágios da deterioração por RAA.

#### 5.2.4 Análise microestrutural

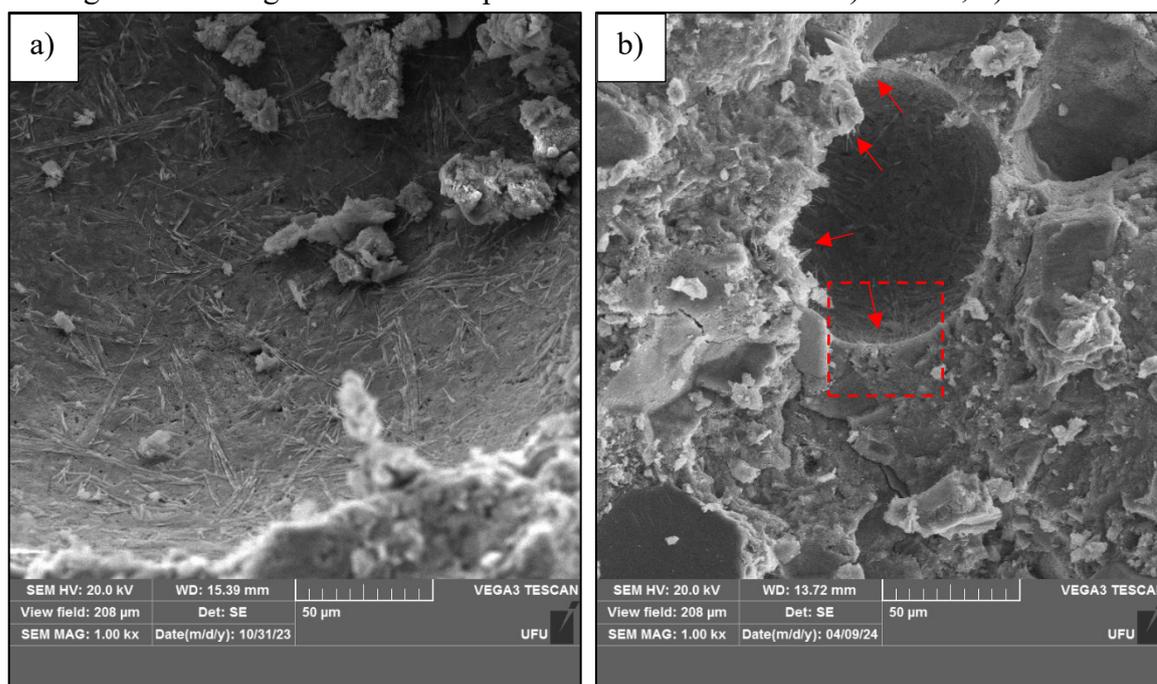
##### 5.2.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A partir da análise de MEV, foi possível confirmar a ocorrência dos mecanismos expansivos presentes nas amostras, conforme apresentado na sequência.

##### a. Formação de etringita tardia (DEF)

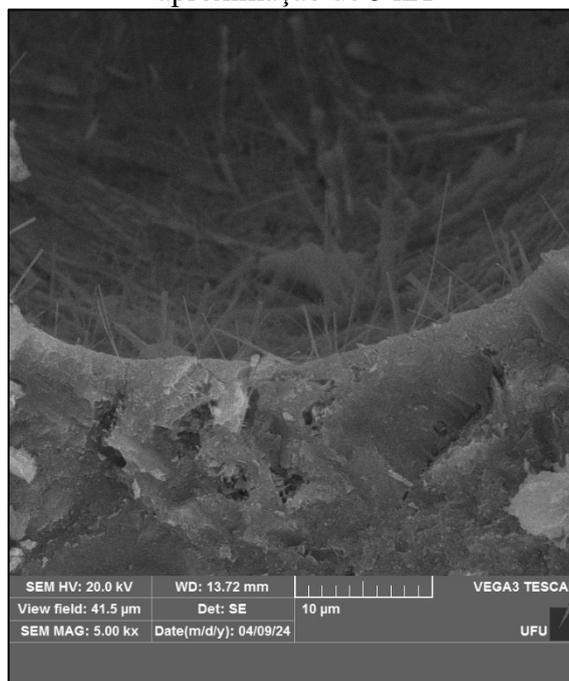
Ao comparar a imagem de MEV obtida em um poro aos 28 dias (Figura 66a), com um poro aos 200 dias (Figura 66b), observa-se que houve a formação de algumas agulhas características de etringita na borda do poro. Na Figura 67, onde a Figura 66b foi ampliada, é possível ver com mais detalhes os produtos formados.

Figura 66 – Imagem de MEV de poro em amostras de DEF: a) 28 dias; b) 200 dias



Fonte: Autora (2024).

Figura 67 – Imagem de MEV de poro em amostra de DEF aos 200 dias (Figura 66b) com aproximação de 5 kX



Fonte: Autora (2024).

Como indicativo de que essas agulhas são de etringita tardia, e não primária, têm-se o seu surgimento na borda dos poros e sua característica morfológica. Conforme o estudo de Katsioti *et al.* (2011), existem dois tipos de morfologia dos cristais de etringita. O primeiro tipo, característico de etringita não expansiva, é composto por cristais longos (10 a 100  $\mu\text{m}$ ) e maior espessura. O segundo tipo, característico de etringita expansiva, é formado por cristais com comprimentos menores (1 a 2  $\mu\text{m}$ ) e mais finos (0,1 a 0,2  $\mu\text{m}$ ), da mesma forma que os encontrados na amostra.

#### b. Reação álcali-agregado (RAA)

As amostras de RAA estavam possibilitando a visualização do gel a olho nu aos 200 dias, inclusive com exsudação do gel na superfície das amostras, conforme mostrado na Figura 68.

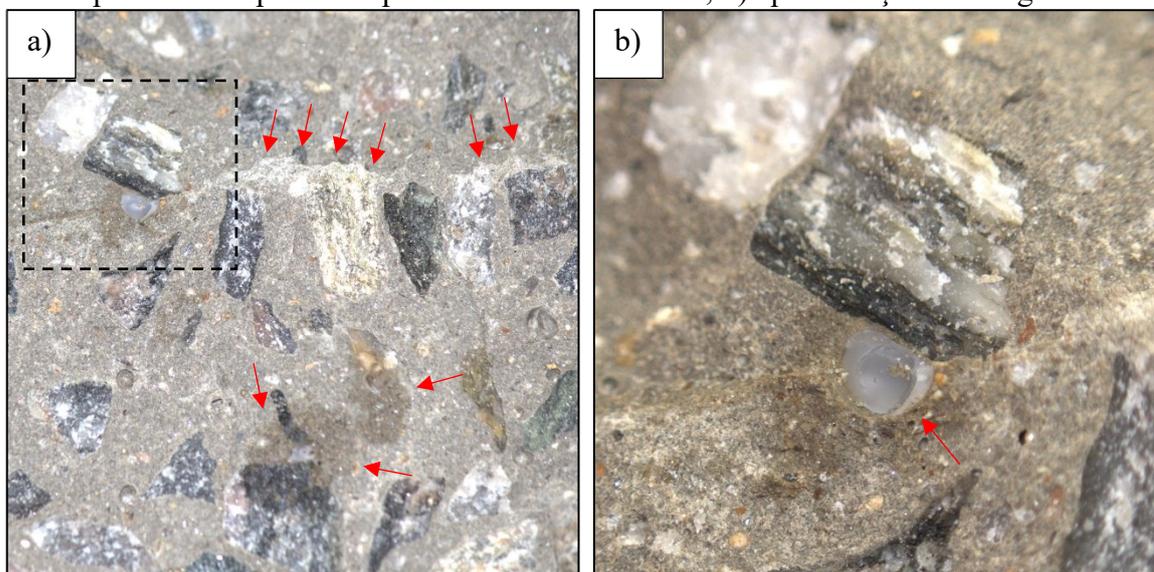
Figura 68 – Gel exsudado na superfície do concreto



Fonte: Autora (2024).

Nas imagens da Figura 69, é possível ver o gel de RAA preenchendo completamente um poro próximo ao agregado graúdo, e se espalhando por toda a extensão da amostra (setas vermelhas). Na aproximação da imagem (Figura 69b) é possível ver com mais detalhes o poro preenchido.

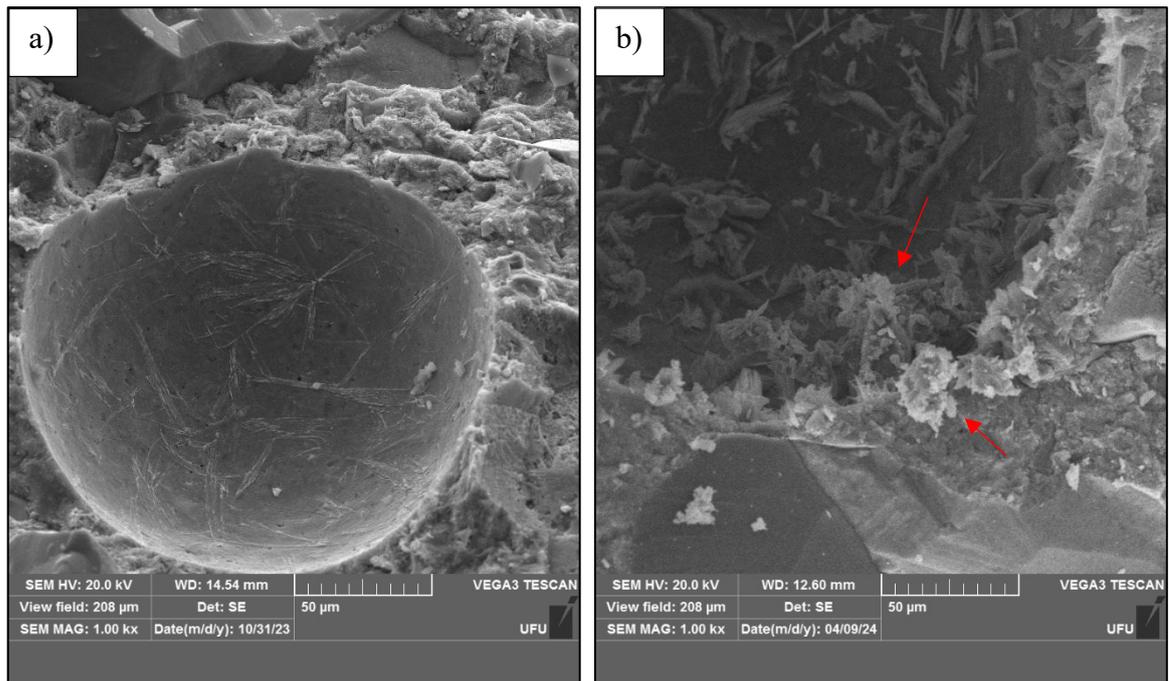
Figura 69 – Imagens de corpos de prova de RAA com presença de gel: a) gel preenchendo os poros e se espalhando pela extensão da amostra; b) aproximação da imagem



Fonte: Autora (2024).

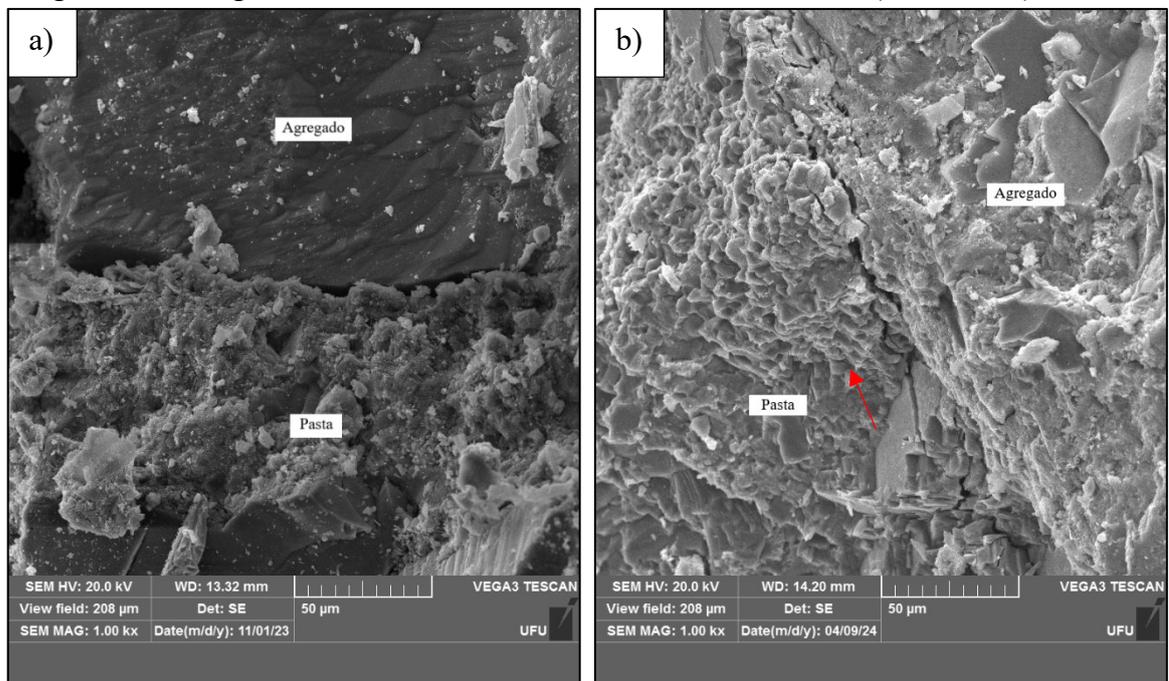
Ao comparar as imagens de MEV de 28 e 200 dias, também foi possível ver a presença do gel nos poros e interface entre agregado e pasta, conforme apresentado nas Figuras 70 e 71.

Figura 70 – Imagem de MEV de poro em amostras de RAA: a) 28 dias; b) 200 dias



Fonte: Autora (2024).

Figura 71 – Imagem de MEV de interface em amostras de RAA: a) 28 dias; b) 200 dias



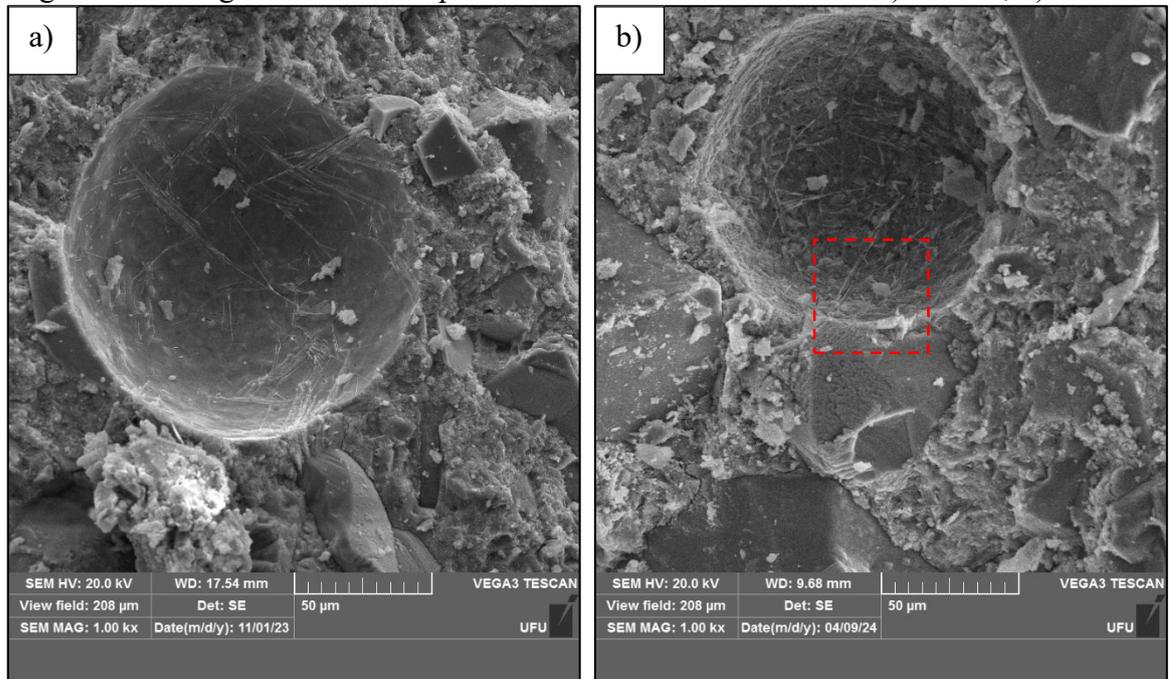
Fonte: Autora (2024).

### c. Formação de etringita tardia e reação álcali agregado (DEF + RAA)

Nas imagens de MEV das amostras de DEF+RAA também foi possível identificar os produtos de reação preenchendo os poros aos 200 dias (Figura 72). Na Figura 73, é visível a

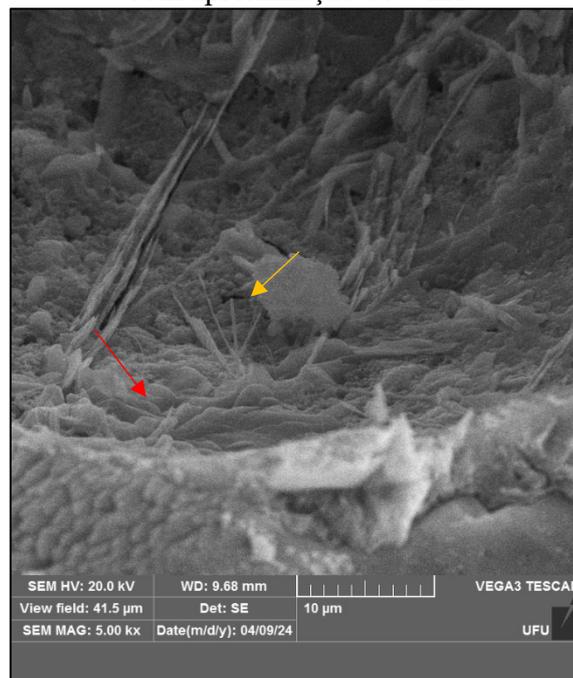
presença do gel de RAA (seta vermelha), e com relação à DEF, foi possível ver apenas uma pequena formação de cristais característicos de etringita (seta amarela).

Figura 72 – Imagem de MEV de poro em amostras de DEF+RAA: a) 28 dias; b) 200 dias



Fonte: Autora (2024).

Figura 73 – Imagem de MEV de poro em amostra de DEF+RAA aos 200 dias (Figura 72b) com aproximação de 5 kX

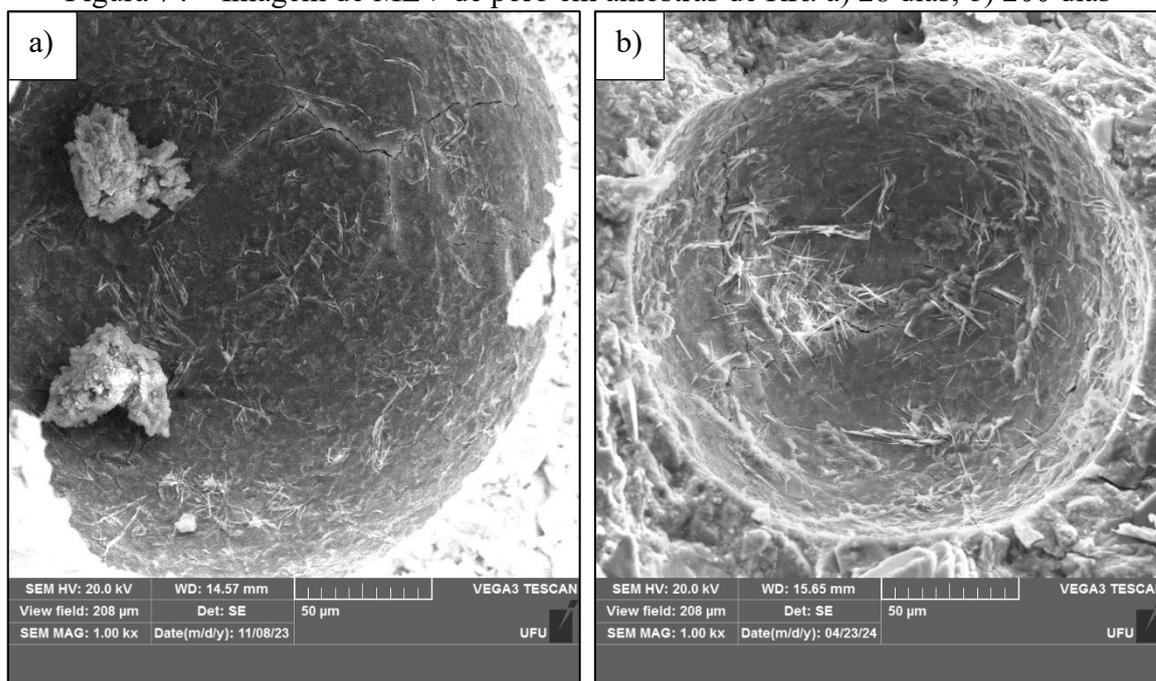


Fonte: Autora (2024).

d. Referência reativa (RR)

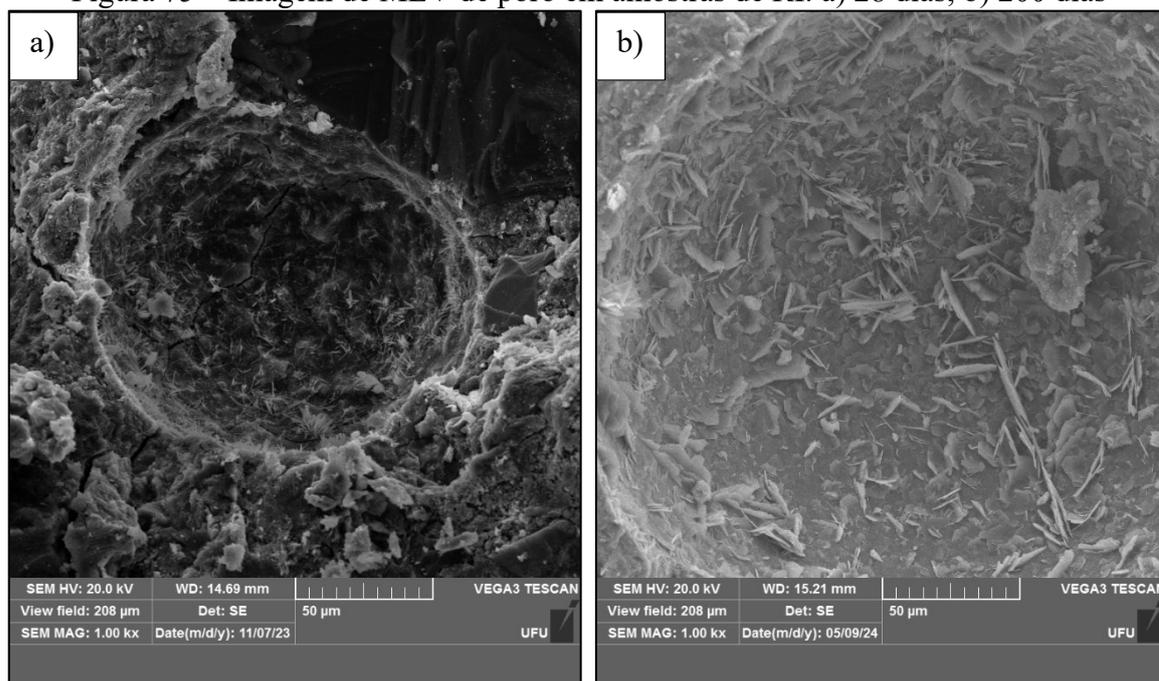
Com relação às amostras de referência, tanto aos 28 dias, como aos 200 dias, não foram observados cristais característicos de reações expansivas, apenas produtos normais de hidratação. A Figura 74 apresenta as imagens da referência reativa e a Figura 75 mostra as imagens da referência inerte.

Figura 74 – Imagem de MEV de poro em amostras de RR: a) 28 dias; b) 200 dias



Fonte: Autora (2024).

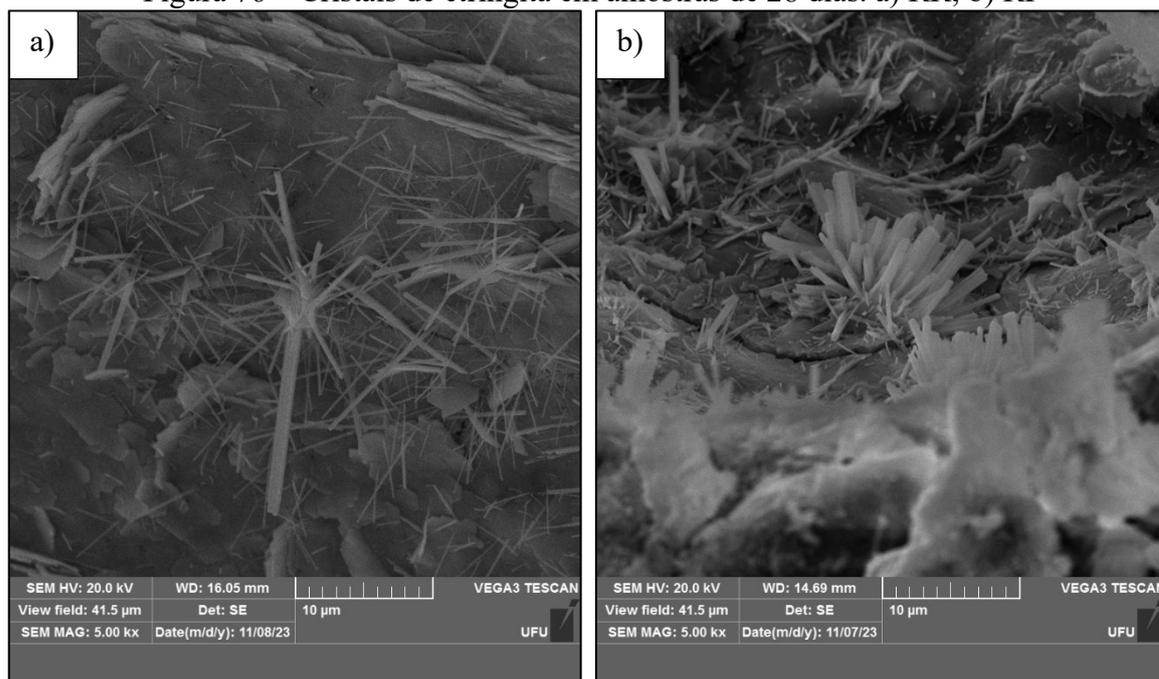
Figura 75 – Imagem de MEV de poro em amostras de RI: a) 28 dias; b) 200 dias



Fonte: Autora (2024).

Nas imagens de MEV dos concretos de referência foi possível observar a presença de cristais de etringita nos poros aos 28 dias (Figura 76). Conforme explicado no tópico 5.2.4.1.a, a morfologia dos cristais de etringita primária e tardia são diferentes, e nessas imagens é possível verificar a morfologia característica dos cristais de etringita primária.

Figura 76 – Cristais de etringita em amostras de 28 dias. a) RR; b) RI

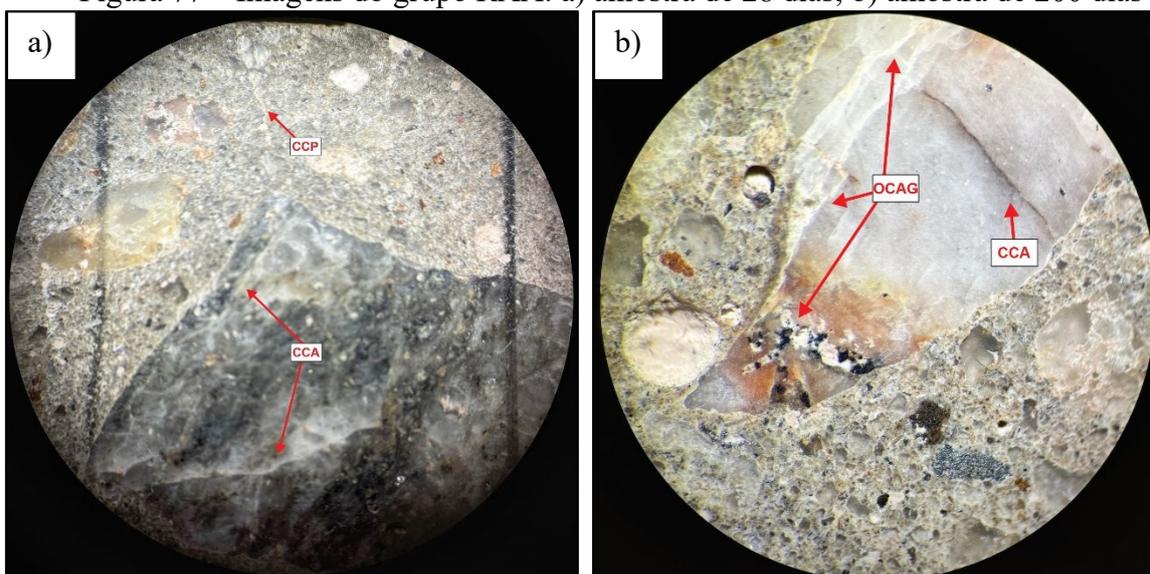


Fonte: Autora (2023).

### 5.2.4.2 Damage Rating Index

Com relação aos resultados de DRI, apresentados na Tabela 24 e Figura 78, foi identificado o aumento estatisticamente significativo dos danos com o aumento das expansões, para todos os grupos. Na Figura 77, é possível ver os diferentes danos encontrados em uma amostra de RAA aos 28 e 200 dias.

Figura 77 – Imagens do grupo RAA: a) amostra de 28 dias; b) amostra de 200 dias



Fonte: Autora (2024).

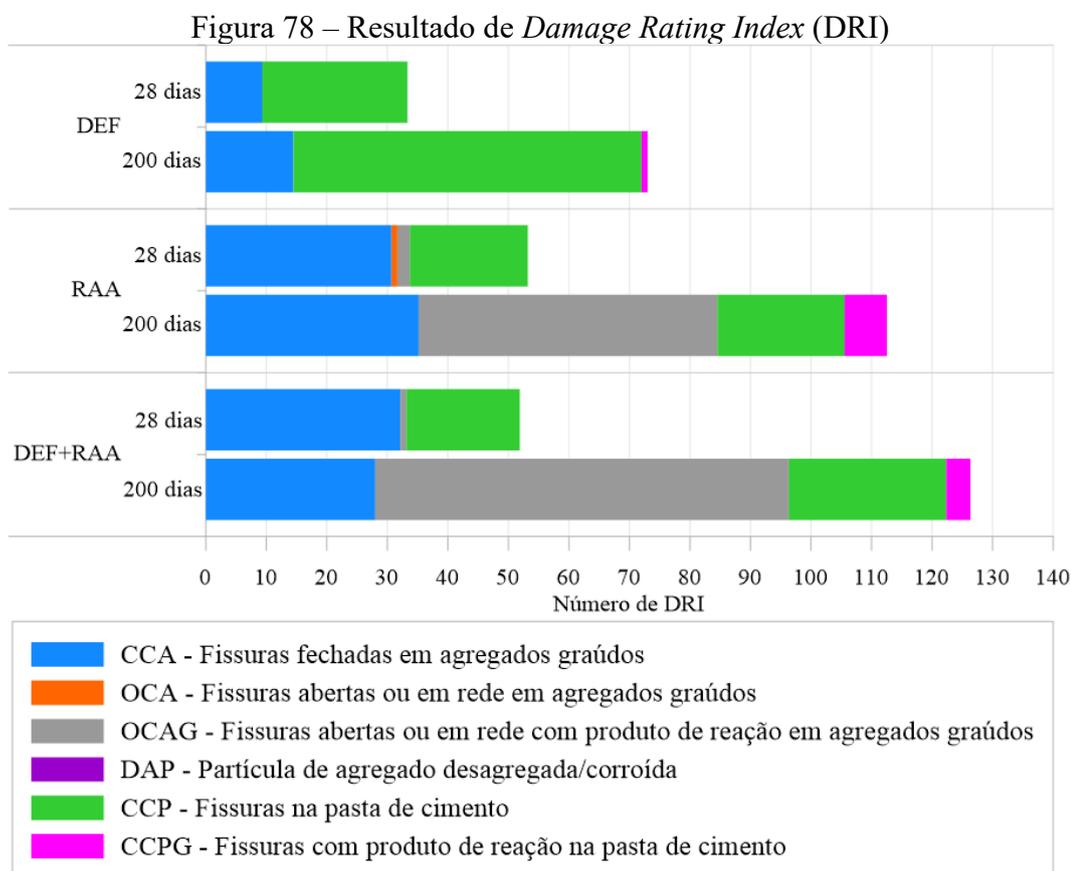
Comparando cada grupo nas diferentes idades, foi observado que o DEF apresentou um aumento de 119%, o RAA aumentou 111,5% e o DEF+RAA obteve uma elevação nos danos de 143,6%.

Tabela 24 – Resultados de DRI normalizado

Grupo		CCA	OCA	OCAG	CAD	DAP	CCP	CCPG	DRI normalizado
DEF	28	9,33	0	0	0	0	24	0	33,33
	200	14,5	0	0	0	0	57,5	1	73,00
RAA	28	30,71	1	2	0	0	19,5	0	53,21
	200	35,21	0	49,33	0	0	21	7	112,54
DEF+RAA	28	32,12	0	1	0	0	18,75	0	51,87
	200	28	0	68,33	0	0	26	4	126,33

Fonte: Autora (2024).

O comportamento dos danos não acompanhou o mesmo padrão de expansão encontrado entre os grupos, sendo que o número de DRI aos 200 dias indica maiores danos nas amostras de DEF+RAA, seguido de RAA e, por fim, DEF.



Fonte: Autora (2024).

Ao analisar os danos petrográficos das amostras, assume-se que:

- O DEF apresentou um aumento nos fatores CCA e CCP (fissuras fechadas no agregado e na pasta, respectivamente), sendo que o aumento nas fissuras na pasta (CCP) foram mais expressivos. Isso é condizente com o esperado para a formação de etringita tardia, já que esta se forma na pasta, para, então, atingir os agregados.
- O RAA apresentou um aumento pouco expressivo nos fatores CCA e CCP (fissuras fechadas no agregado e na pasta, respectivamente), porém, é destacado o surgimento dos danos OCAG e CCPG (fissuras preenchidas com produtos de reação no agregado e na pasta, respectivamente). Uma vez que o desenvolvimento da reação álcali-agregado ocorre no agregado e depois avança para a pasta de cimento, é possível identificar esse comportamento na análise de DRI, onde o dano mais significativo aos 200 dias foi no agregado, com a presença de produto de reação (OCAG).

- O DEF+RAA apresentou uma ínfima redução no fator CCA e aumento no CCP, além do surgimento significativo de fissuras com produto de reação no agregado (OCAG) e um modesto surgimento de fissuras com produto de reação na pasta (CCPG). Por meio das imagens de MEV, foi observado uma maior predominância de produtos de RAA, com pouca presença de DEF. Combinando ambas as análises, pode-se assumir que nos mecanismos combinados, o RAA está sendo responsável por maior parte dos danos às amostras.

- Ao comparar o DEF+RAA com o RAA, o RAA apresentou um fator CCPG (fissura com produto de reação na pasta) 75% maior do que o DEF+RAA, indicando, possivelmente, um estágio mais avançado de degradação, apesar do menor número de DRI, já que o gel está migrando do agregado para a pasta.

- Em relação ao fato de ter surgido mais fissuras preenchidas nos agregados (OCAG) do grupo DEF+RAA, em relação ao grupo RAA, não foi encontrada uma explicação para esse comportamento.

No estudo de Sanchez, Drimalas e Fournier (2020), foi identificado que a associação de reação álcali-sílica e formação de etringita tardia altera o padrão global de deterioração do material afetado, mas a densidade total de fissuras e o desenvolvimento não foram alterados pela associação.

Na literatura, a maior parte dos estudos utilizam a técnica de DRI para avaliar os danos causados pela reação álcali-agregado, sendo pouco os trabalhos que usam a técnica para avaliar a associação de mecanismos expansivos. Com isso, a discussão desses dados baseando-se na literatura fica limitada.

### 5.2.5 *Caracterização química*

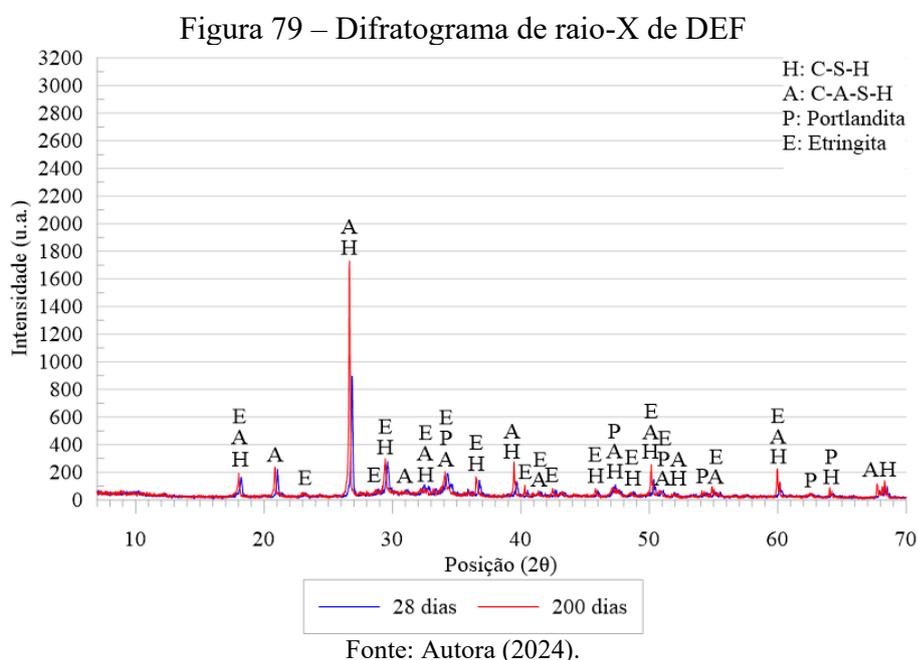
#### 5.2.5.1 Difração de raios-X (DRX)

A partir dos difratogramas de raios-X, foi possível, assim como nas análises de MEV e DRI, confirmar a presença dos mecanismos expansivos nos concretos de cada grupo. Para todos os grupos, é possível identificar a presença dos principais compostos resultantes da hidratação do cimento, sendo eles:

- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H), identificado nos difratogramas pela letra “H”, sendo que as fichas ICDD utilizadas foram 29-0377, 33-0306, 42-0538;

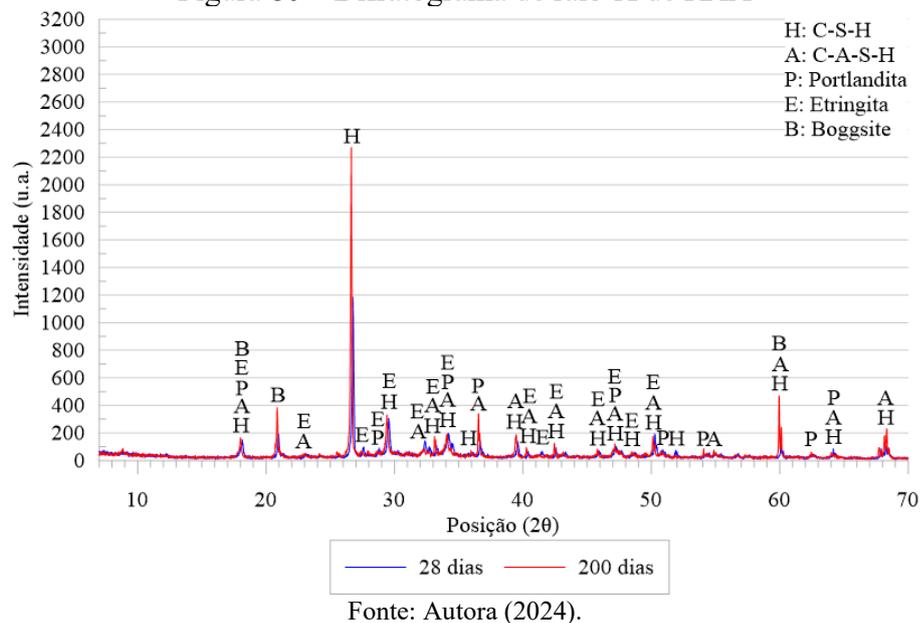
- Hidrato de silicato de cálcio e alumínio (C-A-S-H), identificado nos difratogramas pela letra “A”, sendo que as fichas ICDD utilizadas foram 46-1405 e 20-0452;
- Hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), ou Portlandita, identificado nos difratogramas pela letra “P”, sendo que a ficha ICDD utilizada foi a 44-1481;
- Etringita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), identificada nos difratogramas pela letra “E”, sendo que a ficha ICDD utilizada foi a 41-1451.

Na Figura 79, onde está apresentado o difratograma do grupo de DEF, é possível identificar uma maior intensidade dos picos de 50 e 60° aos 200 dias, quando em comparação com os 28 dias. Esse aumento, pode indicar a presença da etringita tardia.



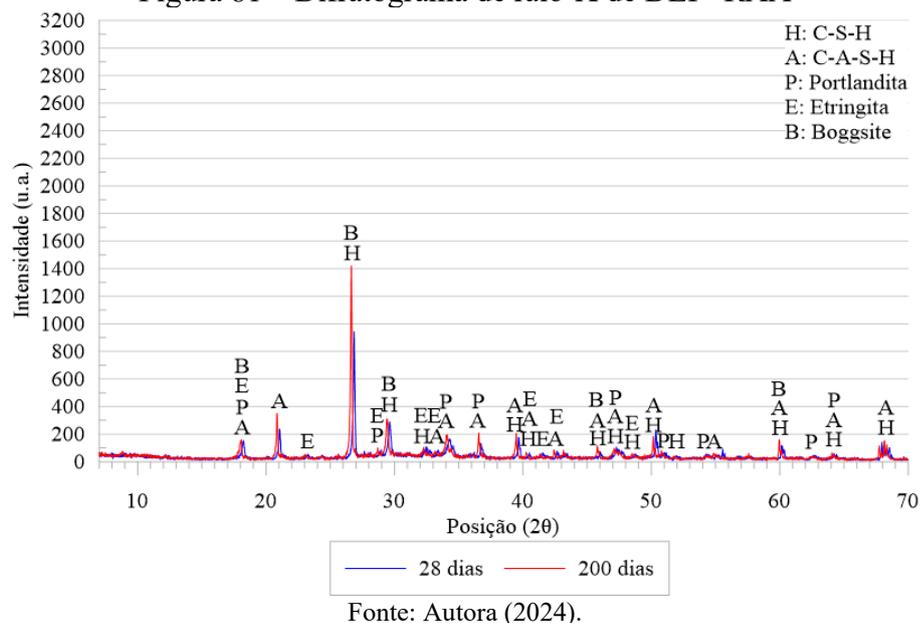
Na Figura 80, onde está apresentado o difratograma do grupo de RAA, é possível confirmar a presença de produtos de reação álcali-agregado aos 200 dias através da presença do composto Boggsite em 21 e 60°, inexistente aos 28 dias. Esse composto, identificado no difratograma pela letra “B”, foi identificado por meio da ficha ICDD número 42-1379.

Figura 80 – Difratoograma de raio-X de RAA



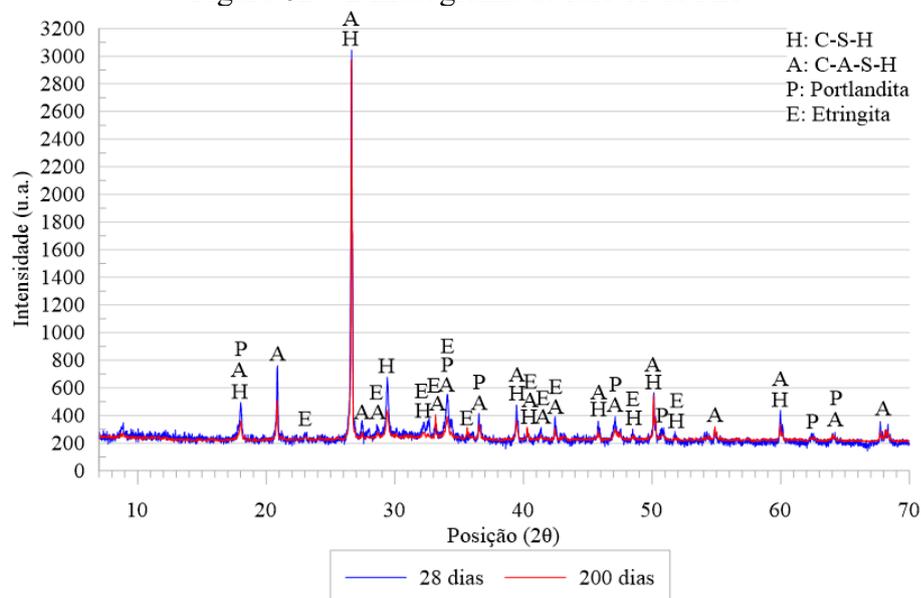
No difratograma de DEF+RAA, apresentado na Figura 81, não é possível identificar picos mais intensos de DEF aos 200 dias, somente a presença de Boggsite em 27, 46 e 60°. Assim como nas análises microestruturais, o difratograma também corrobora com a teoria de que, no caso de mecanismos expansivos acoplados, o RAA está sendo mais significativo na degradação do concreto.

Figura 81 – Difratoograma de raio-X de DEF+RAA



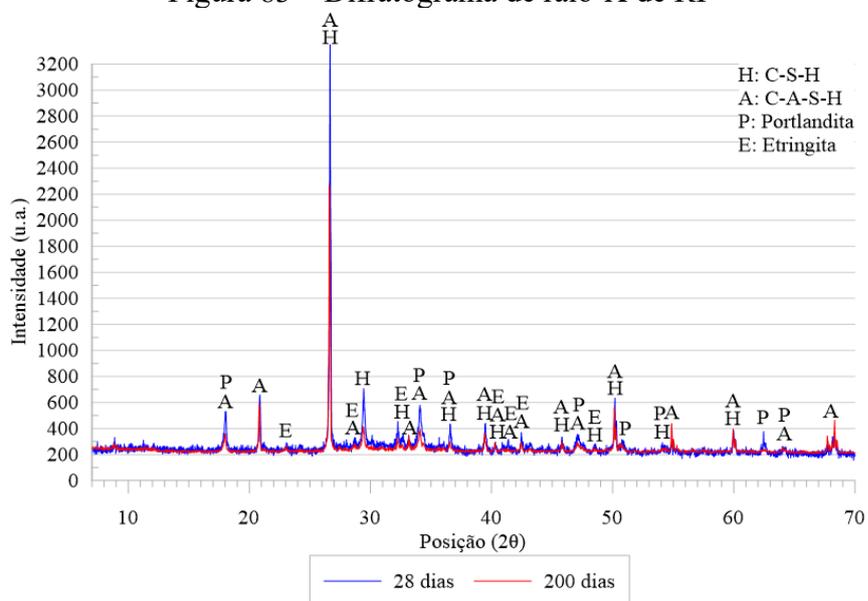
Nas Figuras 82 e 83, as quais apresentam, respectivamente, os difratogramas das amostras de referência reativa e inerte, não é identificado nenhum produto além dos característicos de reação de hidratação do cimento.

Figura 82 – Difratograma de raio-X de RR



Fonte: Autora (2024).

Figura 83 – Difratograma de raio-X de RI



Fonte: Autora (2024).

### 5.3 RESUMO GERAL

A partir da compilação dos resultados de caracterização do concreto, foi formulada a Tabela 25.

Tabela 25 – Compilação dos resultados obtidos com o estudo

Ensaio	DEF			RAA			DEF+RAA		
	28 dias	200 dias	Variação (%)	28 dias	200 dias	Variação (%)	28 dias	200 dias	Variação (%)
Velocidade de ultrassom (m/s)	4908,32	4860,71	-0,97	4951,66	4945,68	-0,12	4867,54	4872,13	0,09
Resistividade elétrica superficial ( $\Omega.m$ )	287,33	476,56	65,86	242,78	339,6	39,88	162,89	353,44	116,98
Absorção de água por capilaridade (mm)	1,11E-03	5,75E-04	-48,20	7,39E-04	6,33E-04	-14,34	8,60E-04	6,21E-04	-27,79
Absorção de água por imersão (%)	2,073	1,195	-42,35	1,707	1,015	-40,54	2,1	1,584	-24,57
Índice de vazios (%)	5,186	3	-42,15	4,176	2,482	-40,57	5,104	3,844	-24,69
Resistência à compressão axial (MPa)	68,56	80,35	17,20	66,37	72,3	8,93	62,04	68,73	10,78
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	4,95	5,33	7,68	5,25	5,42	3,24	4,68	5,26	12,39
Módulo de elasticidade estático (GPa)	40,76	42,55	4,39	37,13	32,62	-12,15	36,23	35,22	-2,79
Energia de fraturamento pelo modo 1 ( $J.m^2$ )	210,75	205,2	-2,63	236,3	347	46,85	343,5	319,1	-7,10

Fonte: Autora (2024).

Todos os resultados de caracterização do concreto indicaram a densificação deste, mostrando que os níveis de expansão alcançados pelos grupos até os 200 dias não geraram degradação o bastante para ser sensível aos ensaios realizados, com exceção do módulo de elasticidade. No capítulo 6, onde são apresentadas as conclusões do estudo, foram realizadas observações a respeito dos resultados obtidos.

## 6 CONCLUSÃO

Esta dissertação investigou o comportamento de dois mecanismos expansivos na degradação de concreto produzido com areia de minério de ferro, com o objetivo de avaliar os efeitos desses mecanismos quando atuando separadamente e acoplados. Através dos métodos empregados na pesquisa, foram obtidos resultados significativos que permitiram atingir os objetivos propostos inicialmente.

Dentre as principais conclusões obtidas com o estudo, destacam-se:

- A partir da caracterização das propriedades físicas e químicas da areia de minério de ferro, foi destacado a elevada finura da areia, fato que gerou uma elevada viscosidade ao concreto produzido;
- Apesar da elevada finura da areia, o material não é classificado como pozolânico, e sua composição química é formada essencialmente de quartzo e hematita;
- O acoplamento dos mecanismos expansivos não gerou expansões mais expressivas até os 200 dias, sendo que os concretos acometidos por reação álcali-agregado foram os que apresentaram as maiores expansões;
- Dentre os resultados dos ensaios não destrutivos, apenas a velocidade de ultrassom apresentou resultados significativos para o estudo, sendo que para a resistividade elétrica superficial são necessários mais dados para formar alguma conclusão mais assertiva;
- Através dos ensaios físicos, foi possível verificar a influência da temperatura de armazenamento das amostras na densificação do concreto; contudo, por conta dessa influência, não foi possível isolar e quantificar os efeitos dos mecanismos expansivos nas propriedades físicas dos concretos;
- Dentre os ensaios mecânicos, o módulo de elasticidade estático foi o que apresentou a maior sensibilidade aos efeitos dos mecanismos expansivos, sendo condizente com o comportamento de expansão observado entre os grupos;
- Por meio das análises químicas e microestruturais, foi possível confirmar a presença dos mecanismos expansivos, e formar a teoria de que, quando os mecanismos expansivos de DEF e RAA ocorrem simultaneamente, a RAA tende a ser mais significativa na degradação do concreto.

Apesar das contribuições significativas, este estudo apresenta algumas limitações, como a necessidade de avaliar os mecanismos expansivos em níveis de degradação mais avançados. Além disso, outra lacuna a ser preenchida é a avaliação da possível potencialização dos

mecanismos expansivos gerada pela areia de minério de ferro. Estas limitações abrem caminhos para futuras investigações, onde recomenda-se realizar o mesmo estudo em concretos com e sem areia de minério de ferro, incorporando idades/níveis de degradação mais elevados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, Waqas; AHMAD, Ayaz; OSTROWSKI, Krzysztof Adam; ASLAM, Fahid; JOYKLAD, Panuwat. A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 15, p. E00683, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00683>.
- AL SHAMAA, Mohamad Al; LAVAUD, Stéphane; DIVET, Loic; NAHAS, Georges; TORRENTI, Jean Michel. Influence of relative humidity on delayed ettringite formation. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 58, p. 14-22, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.013>.
- ALEXANDER, Mark; BEUSHAUSEN, Hans. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 122, p. 17-29, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>.
- ALMADA, Bruna Silva; SILVA NETO, Gilberto Alves da; PRADO, Dyala Fraga do; AGUILAR, Maria Teresa Paulino; GARCIA, Dayana Cristina Silva; SILVA, Guilherme Jorge Brigolini; SANTOS, White José dos. Evaluation of the microstructure and micromechanics properties of structural mortars with addition of iron ore tailings. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 63, p. 105405, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2022.105405>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C127**: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C187**: Standard test method for amount of water required for normal consistency of hydraulic cement paste. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C117**: Standard test method for materials finer than 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) sieve in mineral aggregates by washing. West Conshohocken: ASTM International, 2017a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C142/C142M**: Standard test method for clay lumps and friable particles in aggregates. West Conshohocken: ASTM International, 2017b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C188**: Standard test method for density of hydraulic cement. West Conshohocken: ASTM International, 2017c.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C496/C496M**: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken: ASTM International, 2017d.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C204**: Standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus. West Conshohocken: ASTM International, 2018a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C33/C33M**: Standard specification for concrete aggregates. West Conshohocken: ASTM International, 2018b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C136/C136M**: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. West Conshohocken: ASTM International, 2019a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C295/C295M**: Standard test method for petrographic examination of aggregates for concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2019b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1293**: Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. West Conshohocken: ASTM International, 2020a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C143/C143M**: Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2020b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1585**: Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. West Conshohocken: ASTM International, 2020c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C109/C109M**: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). West Conshohocken: ASTM International, 2021a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C191**: Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by vicat needle. West Conshohocken: ASTM International, 2021b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C39/C39M**: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken: ASTM International, 2021c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C642**: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2021d.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C114**: Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. West Conshohocken: ASTM International, 2022a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C128**: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. West Conshohocken: ASTM International, 2022b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C150/C150M**: Standard specification for portland cement. West Conshohocken: ASTM International, 2022c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1778**: Standard guide for reducing the risk of deleterious alkali-aggregate reaction in concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2022d.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C469/C469M**: Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. West Conshohocken: ASTM International, 2022e.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C597**: Standard test method for pulse velocity through concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2022f.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1702**: Standard test method for measurement of heat of hydration of hydraulic cementitious materials using isothermal conduction calorimetry. West Conshohocken: ASTM International, 2023.

ANDRADE NETO, José da Silva; LA TORRE, Angeles G. de; KIRCHHEIM, Ana Paula. Effects of sulfates on the hydration of Portland cement – A review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 279, p. 122428, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122428>.

AQEL, Mohammad; PANESAR, Daman K.. Delayed Ettringite Formation in Concrete Containing Limestone Filler. **Aci Materials Journal**, [S.L.], v. 115, n. 4, p. 565-574, jul. 2018. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/51702013>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 30 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389-1**: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto – Parte 1: Agregado miúdo. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389-2**: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto – Parte 2: Agregado graúdo. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009d. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2010a. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2010b. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9204**: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8809**: Cimento Portland — Determinação do calor de hidratação a partir do calor de dissolução — Método de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-3**: Agregados - Reatividade álcali-agregado – Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018c. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018d. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018e. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1**: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos estáticos à compressão. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021d. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14656**: Cimento Portland e matérias-primas — Análise química por espectrometria de raios X — Métodos de ensaio. ABNT. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023a. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-4**: Cimento Portland - Análise química – Parte 4: Determinação do resíduo insolúvel. ABNT. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023b. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-6**: Cimento Portland - Análise química – Parte 6: Determinação da perda ao fogo. ABNT. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023c. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 4 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023d. 242 p.

ATHIBARANAN, S.; KARTHIKEYAN, J.; RAWAT, Shraddha. Investigation on service life prediction models of reinforced concrete structures exposed to chloride laden environment. **Journal Of Building Pathology And Rehabilitation**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1-15, 16 dez. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41024-021-00149-8>.

AZEVEDO, António C.; SILVA, Fernando A.N.; DELGADO, João M.P.Q.; SOUZA, Nicole P.s.; TAHLAITI, Mahfoud; KHELIDJ, Abdelhafid. Diagnostic of Concrete Samples Affected by Internal Swelling Reactions. **Building Pathology And Rehabilitation**, [S.L.], v. 21, p. 1-81, 2021. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-76497-5>.

BASF THE CHEMICAL COMPANY. **Ficha Técnica de Produto - GLENIUM® 51**. Disponível em: <<https://cdn.ntcbrasil.com.br/wp-content/uploads/glenium-51-basf-especificacao-completa.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas; coordenação técnica de Marina Dalla Costa**. – Brasília: ANM, 2021. 23 p. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-2021-ano-base-2020.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2023.

BINAL, Adil. The Pessimum Ratio and Aggregate Size Effects on Alkali Silica Reaction. **Procedia Earth And Planetary Science**, [S.L.], v. 15, p. 725-731, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.103>.

BLANCO, A.; CAVALARO, S.H.P.; SEGURA, I.; SEGURA-CASTILLO, L.; AGUADO, A.. Expansions with different origins in a concrete dam with bridge over spillway. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 163, p. 861-874, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.161>.

BLANCO, A.; PARDO-BOSCH, F.; CAVALARO, S.; AGUADO, A.. Lessons learned about the diagnosis of pathologies in concrete dams: 30 years of research and practice. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 197, p. 356-368, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.143>.

BU, Changming; LIU, Lei; LU, Xinyu; ZHU, Dongxu; SUN, Yi; YU, Linwen; OUYANG, Yuhui; CAO, Xuemei; WEI, Qike. The Durability of Recycled Fine Aggregate Concrete: a review. **Materials**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 1110, 31 jan. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15031110>.

BULLARD, Jeffrey W.; JENNINGS, Hamlin M.; LIVINGSTON, Richard A.; NONAT, Andre; SCHERER, George W.; SCHWEITZER, Jeffrey S.; SCRIVENER, Karen L.; THOMAS, Jeffrey J.. Mechanisms of cement hydration. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 12, p. 1208-1223, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>.

CAMPOS, A.; LÓPEZ, C.M.; BLANCO, A.; AGUADO, A.. Effects of an internal sulfate attack and an alkali-aggregate reaction in a concrete dam. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 166, p. 668-683, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.180>.

CAO, Liping; ZHOU, Jie; ZHOU, Tao; DONG, Zejiao; TIAN, Zhiwen. Utilization of iron tailings as aggregates in paving asphalt mixture: a sustainable and eco-friendly solution for mining waste. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 375, p. 134126, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134126>.

CARLES-GIBERGUES, A.; HORNAIN, H.. A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena. In: OLLIVIER, J-P., VICHOT, A. (ed.). **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Tradução: CASCUDO, O., CARASEK, H., 1 ed., capítulo 10, São Paulo: Ibracon, 2014.

CARMIGNANO, Ottávio; VIEIRA, Sara; TEIXEIRA, Ana Paula; LAMEIRAS, Fernando; BRANDÃO, Paulo Roberto; LAGO, Rochel. Iron Ore Tailings: characterization and applications. **Journal Of The Brazilian Chemical Society**, [S.L.], v. 32, n. 10, p. 1895-1911, 2021. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20210100>.

CEARY, Micah Shalom. **Characterization of delayed ettringite formation in maryland bridges**. Tese (Doutorado) – Faculty of the Graduate School, University of Maryland. College Park – MD, p. 304. 2007.

CHELGANI, S. Chehreh; PARIAN, M.; PARAPARI, P. Semsari; GHORBANI, Y.; ROSENKRANZ, J.. A comparative study on the effects of dry and wet grinding on mineral flotation separation—a review. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 5004-5011, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.053>.

CIMENTO NACIONAL. **Certificado de ensaios do produto CPV ARI**. Arcos/MG: Cimento Nacional, 2023. Responsável técnico: Tiago Andrade Couto.

COLLEPARDI, M.. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 25, n. 4-5, p. 401-407, maio 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465\(02\)00080-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465(02)00080-x).

COSTA, Fernanda B. Pereira da; HASELBACH, Liv M.; SILVA FILHO, Luiz Carlos P. da. Pervious concrete for desired porosity: influence of w/c ratio and a rheology-modifying admixture. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 268, p. 121084, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121084>.

CRUZ, P. F. **Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. S.L: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - Ibama, 2015. Disponível em: [http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo\\_tecnico\\_preliminar\\_ibama.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf). Acesso em: 25 mar. 2022.

DAVIDOVÁ, Vendula; REITERMAN, Pavel. Shrinkage of various types of portland clinker-based cements with respect to their hydration degree. **Acta Polytechnica**, [S.L.], v. 60, n. 2, p. 88-97, 30 abr. 2020. Czech Technical University in Prague - Central Library. <http://dx.doi.org/10.14311/ap.2020.60.0088>.

DEBOUCHA, Walid; LEKLOU, Nordine; KHELIDJ, Abdelhafid; PLÉ, Olivier; ALENGARAM, U. Johnson. Combination Effect of Limestone Filler and Slag on Delayed Ettringite Formation in Heat-Cured Mortar. **Journal Of Materials In Civil Engineering**,

[S.L.], v. 32, n. 3, p. 1-6, mar. 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003020](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003020).

DELGADO, J. M. P. Q.; NASCIMENTO, N.; SILVA, F. A. N.; AZEVEDO, A. C.. Diagnostic of Concrete Samples of Pile Caps Affected by Internal Swelling Reactions. **Iranian Journal Of Science And Technology, Transactions Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 46, n. 2, p. 1059-1071, 18 jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40996-020-00565-9>.

DESCHENES JUNIOR, Richard A.; GIANNINI, Eric R.; DRIMALAS, Thanos; FOURNIER, Benoit; HALE, W. Micah. Effects of Moisture, Temperature, and Freezing and Thawing on Alkali-Silica Reaction. **Aci Materials Journal**, Farmington Hills, v. 115, n. 4, p. 575-584, jul. 2018. <http://dx.doi.org/10.14359/5170219>.

DIAMOND, S.. Delayed ettringite formation — Processes and problems. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 205-215, jan. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465\(96\)00017-0](http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465(96)00017-0).

DORN, Tobias; BLASK, Oliver; STEPHAN, Dietmar. Acceleration of cement hydration – A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 323, p. 126554, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126554>.

DUARTE, Marlo Souza; ALMADA, Bruna Silva; SANTOS, White José dos; BESSA, Sofia Araújo Lima; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva; AGUILAR, Maria Teresa Paulino. Influence of mechanical treatment and magnetic separation on the performance of iron ore tailings as supplementary cementitious material. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 59, p. 105099, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2022.105099>.

DUNANT, Cyrille F.; SCRIVENER, Karen L.. Effects of aggregate size on alkali–silica-reaction induced expansion. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 42, n. 6, p. 745-751, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.02.012>.

DYER, Thomas. **Concrete durability**. [S.L.]: CRC Press, 2014.

ELAHI, Md Manjur A; SHEARER, Christopher R.; REZA, Abu Naser Rashid; SAHA, Ashish Kumer; KHAN, Md Nabi Newaz; HOSSAIN, Md Maruf; SARKER, Prabir Kumar. Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): a review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 281, p. 122628, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122628>.

FANIJO, Ebenezer O.; KOLAWOLE, John Temitope; ALMAKRAB, Abdullah. Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 15, p. e00563, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00563>.

FERNANDES, Leonardo H.s.; ARAUJO, Fernando H.A. de; SILVA, José W.L.; TABAK, Benjamin Miranda. Booms in commodities price: assessing disorder and similarity over

economic cycles. **Resources Policy**, [S.L.], v. 79, p. 103020, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103020>.

FERREIRA, Rondinele Alberto dos Reis; PERIN, Laisy Meurer; COSTA, Eliane Betânia Carvalho; SANTOS, Antonio Carlos dos. Microstructural analysis of concrete ties with granite and carbonate aggregates after 10 years on Brazil railroads. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 152, p. 107429, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107429>.

FIGUEIRA, R.B.; SOUSA, R.; COELHO, L.; AZENHA, M.; ALMEIDA, J.M. de; JORGE, P.A.s.; SILVA, C.J.R.. Alkali-silica reaction in concrete: mechanisms, mitigation and test methods. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 222, p. 903-931, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.230>.

FONTES, Wanna C.; CARVALHO, José M. Franco de; ANDRADE, Luana C.R.; SEGADÃES, Ana M.; PEIXOTO, Ricardo A.F.. Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: from tailings-dams to brown porcelain. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 206, p. 111-121, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.052>.

FONTES, Wanna Carvalho; MENDES, Júlia Castro; SILVA, Sidney Nicodemos da; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 112, p. 988-995, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.027>.

FREITAS, Carlos Machado de; BARCELLOS, Christovam; ASMUS, Carmen Ildes Rodrigues Fróes; SILVA, Mariano Andrade da; XAVIER, Diego Ricardo. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e saúde coletiva. **Cadernos de Saúde Pública**, [S.L.], v. 35, n. 5, p. 1-6, maio 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-311x00052519>.

FUNAHASHI JÚNIOR, Eduardo Issamu; GAMBALE, Patrícia Guedes; OLIVEIRA, Solanda; HASPARYK, Nicole Pagan. Influência do metacaulim na elevação da temperatura e na formação de etringita tardia em compósitos cimentícios. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 1-19, maio 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2021-47252>.

GALVÃO, José Lucas Barros; ANDRADE, Humberto Dias; BRIGOLINI, Guilherme Jorge; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti; MENDES, Júlia Castro. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 200, p. 412-422, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.313>.

GAMBALE, Patrícia Guedes. **Estudo do calor de hidratação do concreto massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras de retração**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

GARG, Himanshu; SATYAPRAKASH. Durability of concrete made with steel filings as a replacement of fine aggregate. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 49, p. 3217-3221, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.146>.

GAUTAM, Bishnu P.; PANESAR, Daman K.. The effect of elevated conditioning temperature on the ASR expansion, cracking and properties of reactive aggregate concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 140, p. 310-320, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.104>.

GHIASVAND, Ebrahim; MOHAMMADI, Hosein; REZAEI, Zahra; AYYOUBI, Mehran; DEGHANI, Soran. Evaluation of the durability of concretes containing alkali-activated slag exposed to the alkali-silica reaction by measuring electrical resistivity. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 367, p. 130094, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130094>.

GIACCIO, G.; ZERBINO, R.; PONCE, J.M.; BATIC, O.R.. Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 38, n. 7, p. 993-1004, jul. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.02.009>.

GODART, Bruno; WOOD, Jonathan. Interaction of DEF and AAR, a review. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, v. 3, n. 15, p. pp. 25-34, 2021. Disponível em: <<https://hal.science/hal-03188267/>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

GRATTAN-BELLEW, P. E.; MITCHELL, L. D. Quantitative petrographic analysis of concrete: the damage rating index (DRI) method, a review. **The Marc-Andre Berube symposium on alkali-aggregate reactivity in concrete**, Montreal, PQ (Canada), 31 May - 3 Jun 2006.

GRAZIA, M.T. de; GOSHAYESHI, N.; GORGA, R.; SANCHEZ, L.F.M.; 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**, [S.L.], v. 40, p. 102298, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2021.102298>.

GU, Yushan; MARTIN, Renaud-Pierre; METALSSI, Othman Omikrine; FEN-CHONG, Teddy; DANGLA, Patrick. Pore size analyses of cement paste exposed to external sulfate attack and delayed ettringite formation. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 123, p. 105766, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.011>.

GU, Yushan; METALSSI, Othman Omikrine; MARTIN, Renaud-Pierre; FEN-CHONG, Teddy; DANGLA, Patrick. Locating ettringite due to DEF at the pore scale of cement paste by heat-based dissolution tests. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 258, p. 120000, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120000>.

GUIMARÃES, Roberta N.; MOREIRA, Victor R.; CRUZ, Joyce R.A.; SALIBA, Aloysio P.M.; AMARAL, Míriam C.s.. History of tailings dam failure: impacts on access to safe water and influence on the legislative framework. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 852, p. 158536, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158536>.

HALDAR, Swapan Kumar. Mineral Processing. **Mineral Exploration**, [S.L.], p. 259-290, 2018. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-814022-2.00013-7>.

HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C. **Deterioração do concreto por reações expansivas.** XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens -SNGB. **Anais...** Salvador – BA: Comitê Brasileiro de Barragens. Maio 2019.

HASPARYK, Nicole Pagan; SCHOVANZ, Dioice; TIECHER, Francieli; KUPERMAN, Selmo Chapira. Global analysis of DEF damage to concretes with and without fly-ash. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 15, n. 3, e15305, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000300005>.

HAYES, Nolan W.; GIORLA, Alain Benjamin; TRENT, Walker; CONG, Derek; PAPE, Yann Le; MA, Zhongguo John. Effect of alkali-silica reaction on the fracture properties of confined concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 238, p. 117641, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117641>.

HILLERBORG, Arne. Results of three comparative test series for determining the fracture energy  $G_F$  of concrete. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 18, n. 5, p. 407-413, set. 1985. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02472416>.

HIME, William G. Delayed ettringite formation-A concern for precast concrete?. **PCI journal**, v. 41, n. 4, p. 26-30, 1996.

HOOTON, R. Doug; BICKLEY, John A.. Design for durability: the key to improving concrete sustainability. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 67, p. 422-430, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.016>.

HORKOSS, Sayed; ESCADEILLAS, Gilles; RIZK, Toufic; LTEIF, Roger. The effect of the source of cement SO 3 on the expansion of mortars. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 4, p. 62-72, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2015.12.004>.

IFSTTAR, GTI5-A. Recommendations for preventing disorders due to Delayed Ettringite Formation. **Technics and methods**, p. 1-70, 2018.

ISLAM, Kamrul; MURAKAMI, Shinsuke. Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915-2020. **Global Environmental Change**, [S.L.], v. 70, p. 102361, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102361>.

JAYASIMHA, N.; SUJINI, B.; ANNAPURNA, B.P.. A study on durability and strength properties of high strength concrete with partial replacement of iron ore tailings with fine aggregates. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 65, p. 1922-1929, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.163>.

JEBLI, M.; JAMIN, F.; PELISSOU, C.; LHOPITAL, E.; YOUSOUFI, M.s. El. Characterization of the expansion due to the delayed ettringite formation at the cement paste-aggregate interface. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 289, p. 122979, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122979>.

JOO, Hyo Eun; TAKAHASHI, Yuya. Development of alkali-silica reaction model considering the effect of aggregate size. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 122, p. 104149, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104149>.

JOSHI, Nirmal Raj; MATSUMOTO, Ayumu; ASAMOTO, Shingo; MIURA, Taito; KAWABATA, Yuichiro. Investigation of the mechanical behaviour of concrete with severe delayed ettringite formation expansion focusing on internal damage propagation under various compressive loading patterns. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 128, p. 104433, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104433>.

KARTHIK, Madhu M.; MANDER, John B.; HURLEBAUS, Stefan. Alkali–silica reaction, delayed ettringite formation and corrosion effects on a bridge pier. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Bridge Engineering**, [S.L.], v. 175, n. 1, p. 35-49, mar. 2022. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/jbren.20.00031>.

KASANIYA, Mahipal; THOMAS, Michael D.A.. Role of the alkalis of supplementary cementing materials in controlling pore solution chemistry and alkali–silica reaction. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 162, p. 107007, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107007>.

KATSIOTI, M.; PATSIKAS, N.; PIPILIKAKI, P.; KATSIOTIS, N.; MIKEDI, K.; CHANIOTAKIS, M.. Delayed ettringite formation (DEF) in mortars of white cement. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 900-905, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.095>.

KAWABATA, Yuichiro; DUNANT, Cyrille; YAMADA, Kazuo; SCRIVENER, Karen. Impact of temperature on expansive behavior of concrete with a highly reactive andesite due to the alkali–silica reaction. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 125, p. 105888, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105888>.

KAWABATA, Yuichiro; TAKAHASHI, Haruka; WATANABE, Sadayuki. The long-term suppression effects of fly ash and slag on the expansion of heat-cured mortar due to delayed ettringite formation. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 310, p. 125235, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125235>.

KCHAKECH, Badreddine; MARTIN, Renaud-Pierre; OMIKRINE METALSSI, Othman; TOUTLEMONDE, François. **Experimental study of the influence of the temperature and duration of heat treatments at an early age on the risk of concrete expansion associated with delayed ettringite formation**. CONCREEP 10. Anais...Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 18 set. 2015. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784479346.055>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

KELHAM, S.. The effect of cement composition and fineness on expansion associated with delayed ettringite formation. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 171-179, jan. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00013-5](http://dx.doi.org/10.1016/0958-9465(95)00013-5).

KOTHARI, Chirayu; TAKAHASHI, Yuya. The effect of heat treatment on the kinetics of the delayed ettringite formation – An improved chemo-thermal-hygral model. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 331, p. 127358, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127358>.

KRIVENKO, Pavel; DROCHYTKA, Rostislav; GELEVERA, Aleksandr; KAVALEROVA, Elena. Mechanism of preventing the alkali–aggregate reaction in alkali activated cement

concretes. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 45, p. 157-165, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.003>.

LACOMBE, Clément; VIDAL, Thierry; SELIER, Alain; NORET, Christine; ANTHINIAC, Patrice. Creep of concrete during Alkali-Aggregates Reaction. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 336, p. 127355, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127355>.

LARIVE, Catherine. **Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques**. 1997. 327 f. Tese (Doutorado) - Curso de Structures Et Matériaux, Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées, Paris, 1997. Disponível em: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00520676>. Acesso em: 02 jan. 2023.

LEITE, L. S. **Estudo da energia de fraturamento em concretos com reação expansiva**. 117 f. Dissertação (Mestrado). Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

LI, Junquan; WU, Zemei; SHI, Caijun; YUAN, Qiang; ZHANG, Zuhua. Durability of ultra-high performance concrete – A review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 255, p. 119296, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>.

LI, Wei; DENG, Min; MO, Liwu; PANESAR, Daman K.; MAO, Zhongyang. Alkali carbonate reaction (ACR): investigations on mechanism of dedolomitization of dolomite in dolostones. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 351, p. 128942, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128942>.

LI, Zhiping; LU, Dagang; GAO, Xiaojian. Analysis of correlation between hydration heat release and compressive strength for blended cement pastes. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 260, p. 120436, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120436>.

LING, Gang; SHUI, Zhonghe; GAO, Xu; SUN, Tao; YU, Rui; LI, Xiaosheng. Utilizing Iron Ore Tailing as Cementitious Material for Eco-Friendly Design of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 8, p. 1829, 7 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14081829>.

LIU, Kangning; WANG, Sheliang; QUAN, Xiaoyi; JING, Wu; XU, Jin; ZHAO, Nan; LIU, Bo. Effect of iron ore tailings industrial by-product as eco-friendly aggregate on mechanical properties, pore structure, and sulfate attack and dry-wet cycles resistance of concrete. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 17, p. 01472, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01472>.

LIU, Xiaoming; LI, Tingyu; TIAN, Weiguang; WANG, Yiqun; CHEN, Yanhu. Study on the durability of concrete with FNS fine aggregate. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 381, p. 120936, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120936>.

LIU, Yang; HAO, Wenru; HE, Wei; MENG, Xia; SHEN, Yinlan; DU, Tao; WANG, Hui. Influence of Dolomite Rock Powder and Iron Tailings Powder on the Electrical Resistivity,

Strength and Microstructure of Cement Pastes and Concrete. **Coatings**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 95, 14 jan. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings12010095>.

LONDERO, Carolina; KLEIN, Nayara Soares; MAZER, Wellington. Study of low-cement concrete mix-design through particle packing techniques. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 42, p. 103071, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103071>.

LOTHENBACH, Barbara; WINNEFELD, Frank; ALDER, Corinne; WIELAND, Erich; LUNK, Peter. Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 37, n. 4, p. 483-491, abr. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.016>.

LU, Chunhua; BU, Senzhuang; ZHENG, Yulong; KOSA, Kenji. Deterioration of concrete mechanical properties and fracture of steel bars caused by alkali-silica reaction: a review. **Structures**, [S.L.], v. 35, p. 893-902, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.051>.

LUMBROSO, Darren; MCELROY, Caitlin; GOFF, Craig; COLLELL, Marta Roca; PETKOVSEK, Gregor; WETTON, Mark. The potential to reduce the risks posed by tailings dams using satellite-based information. **International Journal Of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 38, p. 101209, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101209>.

LV, Xingdong; LIN, Yuqiang; CHEN, Xia; SHI, Yan; LIANG, Renqiang; WANG, Rongkai; PENG, Ziling. Environmental impact, durability performance, and interfacial transition zone of iron ore tailings utilized as dam concrete aggregates. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 292, p. 126068, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126068>.

MAGALHÃES, Luciano Fernandes de; MORAIS, Isabella de Souza; LARA, Luis Felipe dos Santos; RESENDE, Domingos Sávio de; MENEZES, Raquel Maria Rocha Oliveira; AGUILAR, Maria Teresa Paulino; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva. Iron Ore Tailing as Addition to Partial Replacement of Portland Cement. **Materials Science Forum**, [S.L.], v. 930, p. 125-130, set. 2018. Trans Tech Publications, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.930.125>.

MAIA, Wenderson do Carmo; LOPES, Alan de Oliveira; LIMA, Bruno Salgado; GUIMARÃES, Gustavo Costa; SOUZA, Leonardo Mesquita de; BARBOSA, Sidney de Oliveira; SOUZA, Thalles Evangelista Fernandes de. **Laudo de perícia criminal federal nº 1070/2019**. S.L.: Superintendência Regional de Polícia Federal em Minas Gerais. Disponível em: <[https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/wp-content/uploads/sites/41/2019/11/laudo\\_1070\\_2019\\_setec\\_sr\\_pf\\_mg\\_assinado-2.pdf](https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/wp-content/uploads/sites/41/2019/11/laudo_1070_2019_setec_sr_pf_mg_assinado-2.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2022.

MALBOIS, M.; BENBOUDJEMA, F.; TORRENTI, J.M.; DIVET, L.; LAVAUD, S.. Effect of aggregate mineralogical composition on DEF in concrete. **Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability And Innovations**, [S.L.], p. 2588-2592, 19 abr. 2021. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/9780429279119-353>.

MANCINI, Sandro Donnini; MEDEIROS, Gerson Araújo de; PAES, Michel Xocaira; OLIVEIRA, Benone Otávio Souza de; ANTUNES, Maria Lúcia Pereira; SOUZA, Ricardo Gabbay de; FERRAZ, José Lázaro; BORTOLETO, Ana Paula; OLIVEIRA, José Antônio Puppim de. Circular Economy and Solid Waste Management: challenges and opportunities in Brazil. **Circular Economy And Sustainability**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 261-282, 26 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s43615-021-00031-2>.

MARTÍN, Julio Emilio Torres; RAMOS, Nuria Rebolledo; CHINCHÓN-PAYÁ, Servando; ARCILA, Isabel Helices; TOLEDO, Antonio Silva; MONTERO, Javier Sánchez; SANJUÁN, Marta Llorente; SOTO, Sergio Agulló; GARCÍA, Fidel Otero; HAAN, Leendert de. Durability of a reinforced concrete structure exposed to marine environment at the Málaga dock. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. e01582, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01582>.

MARTIN, Renaud-Pierre; METALSSI, Othman Omikrine; TOUTLEMONDE, François. Importance of considering the coupling between transfer properties, alkali leaching and expansion in the modelling of concrete beams affected by internal swelling reactions. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 49, p. 23-30, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.008>.

MARTIN, Renaud Pierre; RENAUD, Jean Claude; TOUTLEMONDE, François. Experimental investigations concerning combined delayed ettringite formation and alkali aggregate reaction. In: **6th International conference on concrete under severe conditions CONSEC10**. 2010. p. 8p. Disponível em: <<https://hal.science/hal-00904253/>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

MATOS, Ana Mafalda; SILVA, F.A.N.; AZEVEDO, A.C.; MARINS, J.F.; DELGADO, J.M.P.Q.. Alkali-reactivity of Pernambuco east shear zone coarse concrete aggregates: an experimental discussion. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 344, p. 128239, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128239>.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: TUTIKIAN, Bernardo (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. Cap. 21. p. 857-896.

MENDES, Beatryz C.; PEDROTI, Leonardo G.; FONTES, Mauricio P.F.; RIBEIRO, José Carlos L.; VIEIRA, Carlos M.F.; PACHECO, Anderson A.; AZEVEDO, Afonso R.G. de. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 227, p. 116669, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.050>.

MOHAMMADI, Afshin; GHIASVAND, Ebrahim; NILI, Mahmoud. Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 258, p. 119567, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119567>.

MORAIS, C.F.; BELO, B.R.; BEZERRA, A.C.s.; LOURA, R.M.; PORTO, M.P.; BESSA, S.A.L.. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 268, p. 121073, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121073>.

NOËL, Martin; SANCHEZ, Leandro; TAWIL, Dana. Structural implications of internal swelling reactions in concrete: review and research needs. **Magazine Of Concrete Research**, [S.L.], v. 70, n. 20, p. 1052-1063, out. 2018. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.17.00383>.

OGORODOVA, L. P.; GRITSENKO, Yu. D.; KOSOVA, D. A.; VIGASINA, M. F.; MELCHAKOVA, L. V.; KSENOFONTOV, D. A.; DEDUSHENKO, S. K.. Physicochemical and Thermochemical Study of Ettringite. **Geochemistry International**, [S.L.], v. 59, n. 12, p. 1188-1197, dez. 2021. Pleiades Publishing Ltd. <http://dx.doi.org/10.1134/s0016702921100050>.

PAN, Jianwen; WANG, Weijia; WANG, Jimin; BAI, Yin; WANG, Jinting. Influence of coarse aggregate size on deterioration of concrete affected by alkali-aggregate reaction. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 329, p. 127228, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127228>.

PAUL, Alvaro; RASHIDI, Mehdi; KIM, Jin-Yeon; JACOBS, Laurence J.; KURTIS, Kimberly E.. The impact of sulfate- and sulfide-bearing sand on delayed ettringite formation. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 125, p. 104323, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104323>.

PEDERSEN, Bård M.; WIGUM, Børge J.; LINDGÅRD, Jan. Influence of aggregate particle size on the alkali silica reaction—a literature review. In: **Proceedings of 15th international conference on alkali-aggregate reaction in concrete, Sao Paulo, Brazil**. 2016. Disponível em: <<https://icaarconcrete.org/wp-content/uploads/2020/11/15ICAAR-PedersenBM-1.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2023.

PETTIFER, K.; NIXON, P.J.. Alkali metal sulphate — a factor common to both alkali aggregate reaction and sulphate attack on concrete. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 173-181, mar. 1980. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(80\)90074-5](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(80)90074-5).

PICHELIN, A.; CARCASSÈS, M.; CASSAGNABÈRE, F.; MULTON, S.; NAHAS, G.. Sustainability, transfer and containment properties of concrete subject to delayed ettringite formation (DEF). **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 113, p. 103738, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103738>.

PICHLER, Ch.; SCHMID, M.; TRAXL, R.; LACKNER, R.. Influence of curing temperature dependent microstructure on early-age concrete strength development. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 102, p. 48-59, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.022>.

PICIULLO, Luca; STORRØSTEN, Erlend Briseid; LIU, Zhongqiang; NADIM, Farrokh; LACASSE, Suzanne. A new look at the statistics of tailings dam failures. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 303, p. 106657, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106657>.

PORTELLA, Kleber Franke; HASPARYK, Nicole Pagan; BRAGANÇA, Mariana D'Orey Gaivão Portella; BRONHOLO, Jeferson Luís; DIAS, Bruna Gomes; LAGOEIRO, Leonardo

Evangelista. Multiple techniques of microstructural characterization of DEF: case of study with high early strength portland cement composites. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 311, p. 125341, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125341>.

PROTASIO, Fernando Nóbrega Mendes; AVILLEZ, Roberto Ribeiro de; LETICHEVSKY, Sonia; SILVA, Flávio de Andrade. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 278, p. 123929, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123929>.

RAJABIPOUR, Farshad; GIANNINI, Eric; DUNANT, Cyrille; IDEKER, Jason H.; THOMAS, Michael D.A.. Alkali-silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 76, p. 130-146, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.024>.

RAMU, Yogesh Kumar; SIRIVIVATNANON, Vute; THOMAS, Paul; DHANDAPANI, Yuvaraj; VESSALAS, Kirk. Evaluating the impact of curing temperature in delayed ettringite formation using electrochemical impedance spectroscopy. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 282, p. 122726, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122726>.

RASTRUP, Erik. Heat of hydration in concrete. **Magazine Of Concrete Research**, [S.L.], v. 6, n. 17, p. 79-92, set. 1954. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/mac.1954.6.17.79>.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLIERE, A.M.; DRON, R. Appreciation de l'activite pouzzolanique des constituants secondaires. In: **7th International Congress Chemical Cement**, Vol. 3, Paris, 1980, 36-41.

REN, Fengming; MO, Jinxu; WANG, Qing; HO, Johnny Ching Ming. Crumb rubber as partial replacement for fine aggregate in concrete: an overview. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 343, p. 128049, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128049>.

RIDA, Loubaba; ALAOUI, Adil Hafidi. Effect of high volume fly ash and curing temperature on delayed ettringite formation. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 58, p. 1285-1293, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.110>.

SÁ, Thomas Schatzmayr Welp; ODA, Sandra; BALTHAR, Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 342, p. 128072, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128072>.

SALIM, Muhammad Usama; MOSABERPANAH, Mohammad Ali. The mechanism of alkali-aggregate reaction in concrete/mortar and its mitigation by using geopolymer materials and mineral admixtures: a comprehensive review. **European Journal Of Environmental And Civil Engineering**, [S.L.], v. 26, n. 14, p. 6766-6806, 4 ago. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2021.1960899>.

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**, [S.L.], v. 1-2, p. 100001, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cement.2020.100001>.

SANCHEZ, L.F.M.; 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**, [S.L.], v. 107, p. 284-303, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.017>.

SANCHEZ, L.F.M.; 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**, [S.L.], v. 93, p. 17-31, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.12.001>.

SANJEEWA, Hakmana Vidana Arachchige Nuwan; ASAMOTO, Shingo. A review of mechanical properties of deteriorated concrete due to delayed ettringite formation and its influence on the structural behavior of reinforced concrete members. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 422, p. 135795, abr. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135795>.

SANTOS, Luís Oliveira; XU, Min; SILVA, António Santos. Monitoring the structural effects of internal swelling reactions in Aguieira bridges. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Construction Materials**, [S.L.], v. 175, n. 3, p. 95-108, jun. 2022. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/jcoma.21.00046>.

SELLIER, A.; GRIMAL, É.; MULTON, S.; BOURDAROT, E.. **Swelling concrete in dams and hydraulic structures: DSC 2017**. John Wiley & Sons, 2017.

SELLIER, Alain; MULTON, Stéphane. Chemical modelling of Delayed Ettringite Formation for assessment of affected concrete structures. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 108, p. 72-86, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.006>.

SHAYAN, A.; QUICK, G. W.. Relative importance of deleterious reactions in concrete: formation of aar products and secondary ettringite. **Advances In Cement Research**, [S.L.], v. 4, n. 16, p. 149-157, out. 1992. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.1992.4.16.149>.

SHETTIMA, Ali Umara; HUSSIN, Mohd Warid; AHMAD, Yusof; MIRZA, Jahangir. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 120, p. 72-79, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095>.

SHI, Caijun; SHI, Zhenguo; HU, Xiang; ZHAO, Rui; CHONG, Linlin. A review on alkali-aggregate reactions in alkali-activated mortars/concretes made with alkali-reactive aggregates. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 48, n. 3, p. 621-628, 6 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-014-0505-2>.

SINHA, Arkabrata; WEI, Jianqiang. Phase evolution and mechanical-hydroscopic properties of alkali-silica reaction gels modified by magnesium nitrate. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 144, p. 105283, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105283>.

SILVA, Fernando A. N.; DELGADO, João M. P. Q.; AZEVEDO, António C.; MAHFOUD, Tahlaiti; KHELIDJ, Abdelhafid; NASCIMENTO, Nicole; LIMA, António G. B.. Diagnosis and Assessment of Deep Pile Cap Foundation of a Tall Building Affected by Internal Expansion Reactions. **Buildings**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 104, 9 mar. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings11030104>.

SOGBOSSI, Hognon; VERDIER, Jérôme; MULTON, Stéphane. Permeability and damage of partially saturated concrete exposed to elevated temperature. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 109, p. 103563, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103563>.

SRIKANTH, K. Shiva; LALITHA, G.. Durability properties of self compacting concrete partial replacement of fine aggregate with waste crushed glass. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 51, p. 2411-2416, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.594>.

SRIPRASONG, Thanadet; ASAMOTO, Shingo; RAJ, Joshi Nirmal. Study on the combined alkali silica reaction and delayed ettringite formation. **International Journal Of Geomate**, [S.L.], v. 19, n. 75, p. 84-91, 1 nov. 2020. International Journal of Geomate. <http://dx.doi.org/10.21660/2020.75.38051>.

TAPAS, Marie Joshua; THOMAS, Paul; VESSALAS, Kirk; NSIAH-BAAFI, Elsie; MARTIN, Liam; SIRIVIVATNANON, Vute. Comparative study of the efficacy of fly ash and reactive aggregate powders in mitigating alkali-silica reaction. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 63, p. 105571, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105571>.

TAYLOR, H.F.W; FAMY, C; SCRIVENER, K.L. Delayed ettringite formation. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 31, n. 5, p. 683-693, maio 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00466-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00466-5).

THEJAS, H.K.; HOSSINEY, Nabil. Alkali-activated bricks made with mining waste iron ore tailings. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 16, p. 00973, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00973>.

TIECHER, Francieli; FLORINDO, Renata N.; VIEIRA, Geilma L.; GOMES, Márcia E. B.; MOLIN, Denise C. C. dal; LERMEN, Richard T.. Influence of the Quartz Deformation Structures for the Occurrence of the Alkali-Silica Reaction. **Materials**, [S.L.], v. 11, n. 9, p. 1692, 12 set. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma11091692>.

TIECHER, F.; LANGOSKI, M.; HASPARYK, N. Behavior of mortars with different types of cement when induced to Delayed Ettringite Formation (DEF). **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 3, p. 1-16, 1 set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.537>.

TOSUN, Kamile. Effect of SO<sub>3</sub> content and fineness on the rate of delayed ettringite formation in heat cured Portland cement mortars. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 28, n. 9, p. 761-772, out. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.06.003>.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2022**. Reston, VA: National Minerals Information Center, v. 2022, p. 202, 2022. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>.

VILLENEUVE, Véronique; FOURNIER, B.; DUCHESNE, J. Determination of the damage in concrete affected by ASR-the damage rating index (DRI). In: **14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAAR)**. Austin, Texas (USA). 2012.

WANG, Ying; RAMANATHAN, Sivakumar; CHOPPERLA, Krishna Siva Teja; IDEKER, Jason H.; SURANENI, Prannoy. Estimation of non-traditional supplementary cementitious materials potential to prevent alkali-silica reaction using pozzolanic reactivity and bulk resistivity. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 133, p. 104723, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104723>.

ZHAI, Yafei; ZHANG, Liaojun; BI, Zhonghui; ZHANG, Hanyun; CUI, Binghui. Seismic performance evaluation of AAR-affected concrete gravity dams under main aftershock sequence. **Soil Dynamics And Earthquake Engineering**, [S.L.], v. 157, p. 107258, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107258>.

ZHANG, Na; TANG, Binwen; LIU, Xiaoming. Cementitious activity of iron ore tailing and its utilization in cementitious materials, bricks and concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 288, p. 123022, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123022>.

ZHANG, Weifeng; GU, Xiaowei; QIU, Jingping; LIU, Jianping; ZHAO, Yunqi; LI, Xiaohui. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 260, p. 119917, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119917>.

ZHANG, Yu; WAN, Zhi; LIMA JUNIOR, Luiz Miranda de; ÇOPUROĞLU, Oğuzhan. Early age hydration of model slag cement: interaction among c3s, gypsum and slag with different Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 161, p. 106954, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106954>.

ZHANG, Yulu; PAN, Yifan; ZHANG, Dakang. A literature review on delayed ettringite formation: mechanism, affect factors and suppressing methods. **Magazine Of Concrete Research**, [S.L.], v. 73, n. 7, p. 325-342, abr. 2021. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.20.00268>.

ZHANG, Zhiqiang; ZHANG, Zhilu; YIN, Shaoning; YU, Linwen. Utilization of Iron Tailings Sand as an Environmentally Friendly Alternative to Natural River Sand in High-Strength Concrete: shrinkage characterization and mitigation strategies. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 24, p. 5614, 9 dez. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13245614>.

ZHAO, Jiangshan; NI, Kun; SU, Youpo; SHI, Yunxing. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 286, p. 122968, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122968>.

ZHAO, Sujing; FAN, Junjiang; SUN, Wei. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 50, p. 540-548, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019>.

ZHOU, Jin; CHEN, Lou; ZHENG, Keren; PRATEEK, Ghimire; HE, Fuqiang; LIU, Zhanqun; YUAN, Qiang. Effect of elevated Al concentration on early-age hydration of Portland cement. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 136, p. 104866, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104866>.

ZHOU, Yucheng; ZHAN, Yijian; ZHU, Mintao; WANG, Shengyi; LIU, Juanhong; NING, Ning. A Review of the Effects of Raw Material Compositions and Steam Curing Regimes on the Performance and Microstructure of Precast Concrete. **Materials**, [S.L.], v. 15, n. 8, p. 2859, 13 abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15082859>.

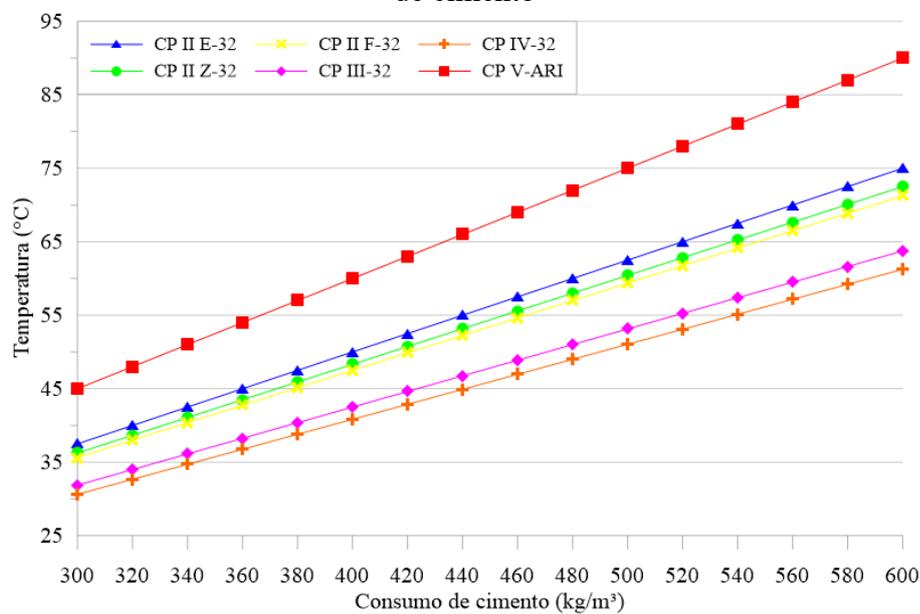
## APÊNDICE A – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO CONCRETO PARA DIFERENTES TIPOS E CONSUMOS DE CIMENTO

Tabela 26 – Variáveis utilizadas no cálculo de variação da temperatura em função dos diferentes tipos de cimento

Tipo de cimento	Calor de hidratação <sup>1</sup> (J/g)	Calor específico do concreto <sup>2</sup> (kJ/kg.°C)	Massa específica do concreto <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
CP II E-32	300	1	2400
CP II Z-32	290		
CP II F-32	285		
CP III-32	255		
CP IV-32	245		
CP V-ARI	360		

Fonte: <sup>1</sup> Valores de calor de hidratação do cimento obtido de Gambale, 2017; <sup>2</sup> Valor de calor específico do concreto obtido de ABNT NBR 15220-3: 2005; <sup>3</sup> Para efeitos de cálculo, a massa específica do concreto foi fixada em 2400 kg/m<sup>3</sup>, conforme ABNT NBR 6118: 2023d.

Figura 84 – Variação de temperatura do concreto produzido com diferentes tipos e consumos de cimento



Fonte: Autora (2023).

## APÊNDICE B – CONTROLE DE CONCRETAGENS

Tabela 27 – Controle de concretagem do grupo “DEF”

Grupo	Formação de etringita tardia (DEF)					
	29/08/2023			31/08/2023		
Data da concretagem	A	B	C	D	E	F
Betonada	A	B	C	D	E	F
Início <sup>1</sup>	08:02	08:44	09:26	07:44	08:32	09:23
Fim <sup>2</sup>	08:12	08:53	09:33	07:55	08:39	09:32
Temperatura ambiente (°C)	20	22	23	21	22	25
Umidade ambiente (%)	76	72	69	71	66	60
Abatimento (mm)	230	230	240	230	240	230
						

<sup>1</sup> Horário de início da mistura, contado a partir do momento em que a betoneira foi ligada; <sup>2</sup> Horário de fim da mistura, contado no momento em que a betoneira foi desligada e iniciou-se o processo de moldagem dos corpos de prova.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 28 – Controle de concretagem do grupo “RAA”

Grupo	Reação álcali-agregado (RAA)					
	05/09/2023			07/09/2023		
Data da concretagem	A	B	C	D	E	F
Betonada	A	B	C	D	E	F
Início <sup>1</sup>	07:43	08:19	08:55	07:41	08:27	08:59
Fim <sup>2</sup>	07:50	08:25	09:03	07:50	08:34	09:06
Temperatura ambiente (°C)	24	25	26	19	21	22
Umidade ambiente (%)	63	59	58	75	69	63
	230	210	200	220	220	210
Abatimento (mm)						

<sup>1</sup> Horário de início da mistura, contado a partir do momento em que a betoneira foi ligada; <sup>2</sup> Horário de fim da mistura, contado no momento em que a betoneira foi desligada e iniciou-se o processo de moldagem dos corpos de prova.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 29 – Controle de concretagem do grupo “DEF + RAA”

Grupo	Formação de etringita tardia + Reação álcali-agregado (DEF + RAA)					
	12/09/2023			14/09/2023		
Data da concretagem						
Betonada	A	B	C	D	E	F
Início <sup>1</sup>	07:40	08:20	08:48	07:44	08:22	08:56
Fim <sup>2</sup>	07:47	08:25	08:55	07:53	08:30	09:05
Temperatura ambiente (°C)	21	22	23	21	23	23
Umidade ambiente (%)	45	43	41	77	68	66
Abatimento (mm)	220	220	230	220	220	220
						

<sup>1</sup> Horário de início da mistura, contado a partir do momento em que a betoneira foi ligada; <sup>2</sup> Horário de fim da mistura, contado no momento em que a betoneira foi desligada e iniciou-se o processo de moldagem dos corpos de prova.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 30 – Controle de concretagem do grupo “RR”

Grupo	Referência reativa (RR)					
Data da concretagem	28/09/2023			29/09/2023		
Betonada	A	B	C	D	E	F
Início <sup>1</sup>	08:05	08:42	09:12	07:40	08:15	08:51
Fim <sup>2</sup>	08:12	08:48	09:20	07:47	08:22	08:59
Temperatura ambiente (°C)	23	25	26	23	24	25
Umidade ambiente (%)	69	64	62	75	73	67
Abatimento (mm)	220	210	200	210	220	230
						

<sup>1</sup> Horário de início da mistura, contado a partir do momento em que a betoneira foi ligada; <sup>2</sup> Horário de fim da mistura, contado no momento em que a betoneira foi desligada e iniciou-se o processo de moldagem dos corpos de prova.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 31 – Controle de concretagem do grupo “RI”

Grupo	Referência inerte (RI)					
Data da concretagem	05/10/2023			06/10/2023		
Betonada	A	B	C	D	E	F
Início <sup>1</sup>	07:58	08:35	09:18	07:54	08:33	09:08
Fim <sup>2</sup>	08:05	08:42	09:24	08:00	08:39	09:14
Temperatura ambiente (°C)	25	26	27	24	26	27
Umidade ambiente (%)	65	62	59	70	67	64
Slump (mm)	210	210	230	230	230	230
						

<sup>1</sup> Horário de início da mistura, contado a partir do momento em que a betoneira foi ligada; <sup>2</sup> Horário de fim da mistura, contado no momento em que a betoneira foi desligada e iniciou-se o processo de moldagem dos corpos de prova.

Fonte: Autora (2024).

## APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL

Conforme explicado no tópico 4.2.3, durante as medições de variação dimensional, foi feita a verificação dos valores discrepantes entre as leituras de um mesmo corpo de prova, não sendo necessário refazer esse processo na análise dos dados. Então, com base na média das dez medições realizadas em cada corpo de prova, para um mesmo mecanismo expansivo e em uma mesma idade, foi feita a verificação dos valores discrepantes entre os 12 corpos de prova medidos, por meio de uma análise *box-plot*. Os valores médios e desvios padrão obtidos após a retiradas dos valores espúrios são apresentados na Tabela 32, e foram usados para construir o gráfico da Figura 55, apresentado no capítulo dos resultados de variação dimensional (tópico 5.1).

Tabela 32 – Dados de variação dimensional

Grupo	DEF		RAA		DEF+RAA	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
28	0,0074	0,0032	0,0127	0,0082	0,0126	0,0026
42	0,0107	0,0011	0,0232	0,0052	0,0157	0,0016
56	0,0140	0,0015	0,0248	0,0061	0,0181	0,0041
70	0,0156	0,0017	0,0292	0,0056	0,0221	0,0051
84	0,0186	0,0021	0,0342	0,0057	0,0277	0,0054
98	0,0207	0,0027	0,0367	0,0063	0,0291	0,0061
112	0,0222	0,0025	0,0416	0,0072	0,0331	0,0078
128	0,0257	0,0037	0,0506	0,0099	0,0357	0,0083
140	0,0277	0,0041	0,0526	0,0093	0,0385	0,0079
162	0,0303	0,0051	0,0547	0,0088	0,0418	0,0047
176	0,0324	0,0053	0,0571	0,0089	0,0469	0,0058
190	0,0352	0,0050	0,0590	0,0091	0,0494	0,0056
200	0,0376	0,0046	0,0636	0,0086	0,0517	0,0057

Fonte: Autora (2024).

Após a obtenção desses dados, foi feita a análise de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias conforme testes descritos no tópico 4.2.5, sendo os valores-P apresentados na Tabela 33. Os valores-P menores que 0,05 representam a hipótese alternativa de que os dados não seguem uma distribuição normal e/ ou as variâncias são heterogêneas.

Tabela 33 – Análise de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias

Grupo	Normalidade dos dados (valor-P)			Homogeneidade das variâncias (valor-P)
	DEF	RAA	DEF+RAA	
28	0,403	0,712	0,215	0,004
42	0,156	0,066	0,179	0,004
56	0,419	0,285	0,073	0,047
70	0,426	0,789	0,185	0,010
84	0,902	0,695	0,064	0,063
98	0,422	0,664	0,072	0,197
112	0,376	0,970	0,253	0,018
128	0,502	0,234	0,589	0,084
140	0,637	0,779	0,578	0,136
162	0,342	0,933	0,315	0,128
176	0,618	0,834	0,052	0,176
190	0,357	0,696	0,442	0,082
204	0,132	0,604	0,306	0,187

Fonte: Autora (2024).

Conforme os dados da Tabela 33, constatou-se que os dados de todas as idades seguiram uma distribuição normal. Contudo, as amostras de 28, 42, 56, 70 e 112 seguiram a hipótese alternativa de que no mínimo uma variância era diferente. Na sequência, foi realizada a análise ANOVA. Por fim, para as amostras de hipótese alternativa, foi realizado o teste *post-hoc* de Games-Howell. Já para as amostras que seguiram a hipótese nula (todas as variâncias iguais), foi realizado o teste *post-hoc* de Tukey. Os resultados desses testes estão apresentados na Tabela 34, a seguir.

Tabela 34 – Resultados de comparação múltipla entre grupos e testes *post-hoc* realizados nas amostras de variação dimensional

	Grupo	Valor-P		Agrupamento
		DEF	RAA	
28 <sup>1</sup>	DEF	-	-	A
	RAA	0,121	-	A
	DEF+RAA	0,001	0,998	A
42 <sup>1</sup>	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,000	0,006	C
56 <sup>1</sup>	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,016	0,013	C
70 <sup>1</sup>	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,003	0,010	C
84	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,000	0,050	C
98	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,002	0,004	C
112 <sup>1</sup>	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,001	0,028	C
128	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,012	0,000	C
140	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,005	0,000	C
162	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,001	0,000	C
176	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,000	0,003	C
190	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,000	0,005	C
200	DEF	-	-	A
	RAA	0,000	-	B
	DEF+RAA	0,000	0,000	C

<sup>1</sup> Valor obtido a partir do teste de Gammes -Howell

Fonte: Autora (2024).

## APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Tabela 35 - Resultados da análise estatística de velocidade de ultrassom das amostras de 28 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,145	0,192	0,982	0,000	A e B
RAA	-	0,000	0,388	0,018	A
DEF+RAA	-	-	0,057	0,000	B
RR	-	-	-	0,000	A e B
RI	-	-	-	-	C

Fonte: Autora (2024).

Tabela 36 – Resultados da análise estatística de velocidade de ultrassom das amostras de 200 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,000	0,936	0,000	0,000	A
RAA	-	0,000	0,003	0,000	B
DEF+RAA	-	-	0,000	0,000	A
RR	-	-	-	0,054	C
RI	-	-	-	-	C

Fonte: Autora (2024).

Tabela 37 – Resultados da análise estatística de resistividade elétrica superficial das amostras de 28 dias

Grupo	Valor-P <sup>1</sup>				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,000	0,000	0,000	0,000	A
RAA	-	0,000	0,332	0,969	B
DEF+RAA	-	-	0,000	0,000	C
RR	-	-	-	0,708	B
RI	-	-	-	-	B

<sup>1</sup> Valor obtido a partir do teste de Gammes -Howell

Fonte: Autora (2024).

Tabela 38 – Resultados da análise estatística de resistividade elétrica superficial das amostras de 200 dias

Grupo	Valor-P <sup>1</sup>				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,000	0,000	0,000	0,000	A
RAA	-	0,785	0,999	0,000	B
DEF+RAA	-	-	0,240	0,000	B
RR	-	-	-	0,000	B
RI	-	-	-	-	C

<sup>1</sup> Valor obtido a partir do teste de Gammes -Howell

Fonte: Autora (2024).

Tabela 39 – Resultados da análise estatística de capilaridade após 72 horas das amostras de 28 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,927	0,982	0,000	0,000	A
RAA	-	0,999	0,000	0,000	A
DEF+RAA	-	-	0,000	0,000	A
RR	-	-	-	0,991	B
RI	-	-	-	-	B

Fonte: Autora (2024).

Tabela 40 – Resultados da análise estatística de capilaridade após 72 horas das amostras de 200 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,651	0,853	0,109	0,983	A e B
RAA	-	0,999	0,015	0,377	A
DEF+RAA	-	-	0,040	0,608	A
RR	-	-	-	0,227	B
RI	-	-	-	-	A e B

Fonte: Autora (2024).

Tabela 41 – Resultados da análise estatística de absorção de água por imersão das amostras de 28 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,041	0,68	0,000	0,000	A
RAA	-	0,229	0,000	0,000	B
DEF+RAA	-	-	0,000	0,000	A e B
RR	-	-	-	0,004	C
RI	-	-	-	-	D

Fonte: Autora (2024).

Tabela 42 – Resultados da análise estatística de absorção de água por imersão das amostras de 200 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,122	0,001	0,000	0,001	A
RAA	-	0,000	0,005	0,022	A
DEF+RAA	-	-	0,000	0,000	B
RR	-	-	-	0,869	C
RI	-	-	-	-	C

Fonte: Autora (2024).

Tabela 43 – Resultados da análise estatística de índice de vazios das amostras de 28 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,075	0,999	0,000	0,000	A
RAA	-	0,110	0,000	0,000	A
DEF+RAA	-	-	0,000	0,000	A
RR	-	-	-	0,014	B
RI	-	-	-	-	C

Fonte: Autora (2024).

Tabela 44 – Resultados da análise estatística de índice de vazios das amostras de 200 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,064	0,003	0,000	0,000	A
RAA	-	0,000	0,006	0,001	A
DEF+RAA	-	-	0,000	0,000	B
RR	-	-	-	0,779	C
RI	-	-	-	-	C

Fonte: Autora (2024).

Tabela 45 – Resultados da análise estatística de resistência à compressão axial das amostras de 28 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,592	0,009	0,018	0,751	A
RAA	-	0,087	0,177	0,998	A e B
DEF+RAA	-	-	0,988	0,056	B
RR	-	-	-	0,116	B
RI	-	-	-	-	A e B

Fonte: Autora (2024).

Tabela 46 – Resultados da análise estatística de resistência à compressão axial das amostras de 200 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,123	0,012	0,261	0,567	A e B
RAA	-	0,730	0,921	0,025	B e C
DEF+RAA	-	-	0,241	0,003	C
RR	-	-	-	0,045	B e C
RI	-	-	-	-	A

Fonte: Autora (2024).

Tabela 47 – Resultados da análise estatística de resistência à tração por compressão diametral das amostras de 28 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,936	0,951	0,637	0,766	A
RAA	-	0,602	0,964	0,360	A
DEF+RAA	-	-	0,286	0,989	A
RR	-	-	-	0,148	A
RI	-	-	-	-	A

Fonte: Autora (2024).

Tabela 48 – Resultados da análise estatística de resistência à tração por compressão diametral das amostras de 200 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,999	1,000	0,995	0,432	A
RAA	-	0,991	0,968	0,563	A
DEF+RAA	-	-	1,000	0,339	A
RR	-	-	-	0,268	A
RI	-	-	-	-	A

Fonte: Autora (2024).

Tabela 49 – Resultados da análise estatística de módulo de elasticidade estático das amostras de 28 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,012	0,003	0,002	0,377	A
RAA	-	0,830	0,620	0,001	B
DEF+RAA	-	-	0,994	0,000	B
RR	-	-	-	0,000	B
RI	-	-	-	-	A

Fonte: Autora (2024).

Tabela 50 – Resultados da análise estatística de módulo de elasticidade estático das amostras de 200 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,000	0,000	0,000	0,001	A
RAA	-	0,001	0,000	0,000	B
DEF+RAA	-	-	0,002	0,000	C
RR	-	-	-	0,000	D
RI	-	-	-	-	E

Fonte: Autora (2024).

Tabela 51 – Resultados da análise estatística de energia de fraturamento pelo modo 1 (G1) das amostras de 28 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,640	0,000	0,014	0,022	A
RAA	-	0,000	0,196	0,262	A e B
DEF+RAA	-	-	0,002	0,003	C
RR	-	-	-	1,000	B
RI	-	-	-	-	B

Fonte: Autora (2024).

Tabela 52 – Resultados da análise estatística de energia de fraturamento pelo modo 1 (G1) das amostras de 200 dias

Grupo	Valor-P				Agrupamento
	RAA	DEF+RAA	RR	RI	
DEF	0,000	0,001	0,904	0,032	A
RAA	-	0,795	0,008	0,127	B
DEF+RAA	-	-	0,063	0,647	B e C
RR	-	-	-	0,439	A e C
RI	-	-	-	-	B e C

Fonte: Autora (2024).

Tabela 53 – Resultados da análise estatística de DRI das amostras de 28 dias

Grupo	Valor-P		Agrupamento
	DEF	RAA	
DEF	-	-	A
RAA	0,001	-	B
DEF+RAA	0,003	0,874	B

Fonte: Autora (2024).

Tabela 54 – Resultados da análise estatística de DRI das amostras de 200 dias

<b>Grupo</b>	<b>Valor-P</b>		<b>Agrupamento</b>
	<b>DEF</b>	<b>RAA</b>	
DEF	-	-	A
RAA	0,000	-	B
DEF+RAA	0,000	0,014	C

Fonte: Autora (2024).