

**ESTUDO DO ATAQUE INDIVIDUAL E MISTO DE *DEF* E RAA E DE SEUS  
EFEITOS DELETÉRIOS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E  
MECÂNICAS DE CONCRETOS E ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND  
POZOLÂNICO E DE ALTA RESISTÊNCIA**

Jeferson Luiz Bronholo

**Curitiba, 2020**

**JEFERSON LUIZ BRONHOLO**

**ESTUDO DO ATAQUE INDIVIDUAL E MISTO DE DEF E RAA E DE SEUS  
EFEITOS DELETÉRIOS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E  
MECÂNICAS DE CONCRETOS E ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND  
POZOLÂNICO E DE ALTA RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Tecnologia em materiais, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Dr Kleber Franke Portella

Coorientadora: Dr<sup>a</sup> Nicole Pagan Hasparyk

**Curitiba, 2020**

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

---

B969e

Bronholo, Jeferson Luiz

Estudo do ataque individual e misto de DEF e RAA e de seus efeitos deletérios nas propriedades físico-químicas e mecânicas de concretos e argamassas de cimento portland pozolânico e de alta resistência [recurso eletrônico]/ Jeferson Luiz Bronholo. Curitiba, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Tecnologia em materiais, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná.

Orientador: Dr Kleber Franke Portella

Coorientadora: Dra Nicole Pagan Hasparyk

1. Concreto armado. 2. Cimento. I. Portella, Kleber Franke. II. Hasparyk, Nicole Pagan. III. Título.

CDD 650

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563

## TERMO DE APROVAÇÃO

**JEFERSON LUIZ BRONHOLO**

### **ESTUDO DO ATAQUE INDIVIDUAL E MISTO DE DEF E RAA E SEUS EFEITOS DELETÉRIOS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS DE CONCRETOS E ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO E DE ALTA RESISTÊNCIA**

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:



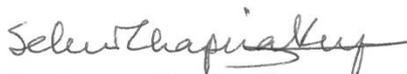
**ORIENTADOR: Prof. Dr. Kleber Franke Portella**  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



**Prof. Dr. Luiz Alkimin De Lacerda**  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



**Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho**  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



**Prof. Dr. Selmo Chapira Kuperman**  
DESEK

Curitiba, 02 de outubro de 2020.

A todos, que de uma maneira ou de outra, me ajudaram nesta caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e meus guias, que me proporcionam saúde e força para atingir meus objetivos.

Agradeço a toda minha família, principalmente a meus pais que me ensinaram desde cedo a lutar e persistir nos sonhos para alcançar os objetivos, aos meus irmãos que sempre me apoiaram e tiveram paciência em todos os momentos de ausência devido aos estudos.

A minha noiva linda, Dayana, pelo carinho e cuidado de sempre.

Meus sobrinhos, em especial a Yasmin e Camille, que sempre me incentivaram e deram força para continuar com os estudos.

Ao Max e ao Kelvin, meus companheiros incansáveis durante as várias madrugadas de estudo.

Ao LACTEC, por possibilitar mais esse crescimento pessoal e profissional por meio do seu programa de mestrado.

Aos meus orientadores Dr. Kleber Franke Portella e Dr<sup>a</sup>. Nicole Pagan Hasparyk, que muito mais que orientar a respeito do tema de estudo, davam aula a cada conversa, compartilhando um pouco do imenso conhecimento que possuem e pelos vários incentivos recebidos e palavras de carinho, não me deixando desanimar nem desistir, a quem sou muito grato.

Aos meus gerentes Luiz Alkimin de Lacerda e Betina Lepretti Medeiros, que sempre me apoiaram e possibilitaram meu crescimento profissional, o meu muito obrigado!

Ao Dr. Selmo Chapira Kuperman, pelas contribuições valiosas durante o andamento da pesquisa e pela disposição em participar da banca de qualificação.

À Mariana D'Orey Gaivão Portella Bragança e Bruna Gomes Dias, por toda dedicação e paciência na obtenção e interpretações das análises microscópicas.

À Luciana dos Anjos Farias, fundamental no desenvolvimento dos traços de concreto utilizados nesta pesquisa.

Aos colaboradores do laboratório de materiais e estruturas civis do LACTEC, por toda ajuda nas dosagens e inúmeras outras atividades necessárias durante a pesquisa. Destaco meus amigos e colegas de trabalho, Rafael Arnecke, Dalvinei Jennrich, Ricardo Oliveira, Gabriel Algouver, Bruno Ribeiro, Evandro Mesquita, Wellington Lopes, Douglas Ferreira, Brenda Rudek, Leandro Octaviano, Mateus

Miranda, Gabriel Rehme, Fernando Brito, Julia Calluf, Daniele Pereira, LÍria Áurea entre outros que não foram citados, muito obrigado!

A Furnas Centrais Elétricas, por possibilitar fazer parte de um Projeto de P&D FURNAS/ANEEL, intitulado “Metodologias e infraestrutura tecnológica para aperfeiçoamento das avaliações de confiabilidade e otimização de empreendimentos de energia”, fazendo ser possível o sonho de obter o título de mestre.

“Quem acredita sempre alcança”

Renato Russo

## RESUMO

A durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto, em geral, bem como das grandes obras, como barragens e usinas hidrelétricas, dependem dos materiais que as compõe, das condições de aplicação do concreto bem como do ambiente de exposição no qual estão expostas. É muito discutida no meio técnico, a necessidade de cuidados no emprego dos agregados a serem utilizados, e investigações prévias à sua aplicação na produção do concreto são recomendadas, principalmente, com relação à potencialidade reativa, pois em contato com a umidade e os álcalis do cimento, como o sódio e potássio, podem causar uma reação química expansiva álcali-agregado (RAA), e mais comumente, a do tipo álcali-silica (RAS). Outros processos químicos de deterioração também podem ser gerados se não forem adotados os devidos cuidados, como por exemplo a formação da etringita tardia (*delayed ettringite formation* ou *DEF*), que pode ocorrer de maneira isolada ou combinada com a RAA no concreto. A DEF pode ser gerada tanto a partir de curas térmicas, geralmente com temperaturas acima de 60 °C, como pelo próprio calor de hidratação do cimento, na mesma faixa de temperatura, quando em contato com a água e os seus íons sulfato, durante as reações exotérmicas. Como consequências gerais à estrutura acometida por uma destas reações (ataque isolado) ou por ambas (ataque misto ou combinado), têm-se o desenvolvimento e o crescimento de subprodutos internos que causam tensões e fissuras progressivas e, por fim, deterioração. Para o estudo dos ataques por RAA (tipo RAS) e DEF, isolados e mistos, em concretos e argamassas, contendo dois tipos de cimentos Portland, o pozolânico (CP IV 32), com cinzas volantes, e o de alta resistência inicial (CP V ARI), sem e com temperatura de cura elevada 85 °C), foram moldados corpos de prova cilíndricos e prismáticos, na presença de agregados potencialmente reativos e inócuos para a RAA. Ensaio não-destrutivos (ultrassom e de resistividade elétrica), mecânicos, microestruturais e de expansão foram executados no programa experimental. Os maiores resultados de expansão obtidos chegaram a 0,3% para as barras de argamassa e a 0,4% para os prismas de concreto, aos 365 dias, em média. Também, foram observadas reduções importantes nas resistências à compressão e módulos de elasticidade, da ordem de 20% e 35% respectivamente, em condição de ataque combinado (DEF+RAA), indicando que tanto as reações isoladas como as combinadas produzem efeitos prejudiciais às estruturas de concreto, como observado a nível microestrutural pela formação de etringita comprimida e fissuras a partir de poucas idades dos compósitos, além do gel da RAA. Adicionalmente, na pesquisa foram disponibilizadas metodologias experimentais para a investigação destas patologias de forma que poderá servir para contribuir para o desenvolvimento de normas técnicas aplicadas à caracterização e prevenção da DEF isolada ou combinada com a RAA.

**Palavras-Chave:** DEF, RAA, RAS, ataque isolado, ataque combinado, expansão.

## ABSTRACT

Durability and service life of concrete structures in general, and those large constructions, such as dams and hydroelectric power plants, depend on the applied materials, conditions of concrete placing as well as the exposure environment. It is widely discussed by specialists precautions related to aggregates due to their potential to promote AAR, and specially ASR when they come into contact with moisture and alkalis from cement (sodium and potassium) leading to an expansive reaction. Furthermore, other chemical deterioration processes can be generated, such as delayed ettringite formation (*DEF*), which can occur isolated or coupled with AAR in concrete. *DEF* is associated by high curing temperatures, usually above 60 °C, or even by cement heat hydration, when in contact with water and sulfate ions, usually coming from cement. As general consequences for the structure affected by those reactions (isolated or coupled attack), there are the development and growth of internal products that cause progressive tensions and cracks, leading concrete to deterioration. For the study of attacks by AAR (ASR) and *DEF*, isolated and coupled, cylindrical and prismatic specimens of mortars and concretes were cast at the laboratory with two types of Portland cements, a pozzolanic cement (CP IV 32), with fly ashes, and a high early strength cement (CP V ARI), and in two situations: with and without and high curing temperature 85 °C). Non-destructive essays (ultrasound and electrical resistivity), mechanical tests, microstructural analyses and expansion evaluation were considered in the experimental program. The higher expansion results achieved 0.3% for mortar bars and 0.4% for concrete prisms, at 365 days, on average. Moreover, important decreases in the compressive strength and modulus of elasticity, of the order of 20% and 35% respectively, were observed in the coupled *DEF* + AAR attack, indicating that both isolated and combined attack produce harmful effects on the concrete structures, as observed by microstructural analyses, with the formation of massive ettringite and microcracks at early ages as well as the presence of ASR gel. Furthermore, the research provided with success specific experimental methodologies for the investigation of mentioned pathologies that can contribute to the development of technical standards applied to the characterization and prevention of *DEF*, isolated, or coupled with ASR.

**Keywords:** *DEF*, AAR, ASR, isolated attack, combined attack, expansion.

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                  | <b>20</b> |
| 1.1      | CONTEXTO.....  | 20        |
| 1.2      | ESTRUTURA DO TRABALHO.....                               | 21        |
| 1.3      | OBJETIVOS .....  | 22        |
| 1.3.1    | Objetivo Geral.....                                      | 22        |
| 1.3.2    | Objetivos Específicos .....                              | 22        |
| 1.4      | JUSTIFICATIVA.....                                       | 23        |
| <b>2</b> | <b>PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO .....</b>        | <b>25</b> |
| 2.1      | REAÇÕES QUÍMICAS NO CONCRETO.....                        | 26        |
| 2.1.1    | Ataque externo por sulfatos, ESA.....                    | 26        |
| 2.1.2    | Ataque interno por sulfatos, ISA .....                   | 28        |
| 2.2      | FORMAÇÃO DE ETRINGITA TARDIA ( <i>DEF</i> ) .....        | 34        |
| 2.2.1    | Definição.....   | 34        |
| 2.2.2    | Fatores influentes .....                                 | 38        |
| 2.2.3    | Ocorrências de <i>DEF</i> .....                          | 41        |
| 2.2.4    | Estudos para avaliar o potencial para a <i>DEF</i> ..... | 43        |
| 2.3      | REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO .....                             | 47        |
| 2.3.1    | Definição.....   | 47        |
| 2.3.2    | Fatores influentes à RAA.....                            | 48        |
| 2.3.3    | Casos de RAA .....                                       | 54        |
| 2.3.4    | Normatização .....                                       | 57        |
| 2.4      | ATAQUES COMBINADOS .....                                 | 59        |
| 2.5      | CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO .....                      | 64        |
| <b>3</b> | <b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>                       | <b>65</b> |
| 3.1      | MATERIAIS .....  | 68        |
| 3.1.1    | Cimentos .....   | 68        |
| 3.1.2    | Agregado miúdo .....                                     | 71        |
| 3.1.3    | Agregados graúdos .....                                  | 72        |
| 3.1.4    | Água para amassamento.....                               | 73        |
| 3.1.5    | Aditivo químico .....                                    | 73        |
| 3.2      | DOSAGEM .....  | 74        |
| 3.3      | CURA E AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO.....                        | 77        |
| 3.4      | ENSAIOS E ANÁLISES.....                                  | 80        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.4.1    | END .....   | 82         |
| 3.4.2    | COMPORTAMENTO FÍSICO .....  | 84         |
| 3.4.3    | COMPORTAMENTO MECÂNICO E VISUAL.....                                | 88         |
| 3.4.4    | MICROESTRUTURA.....   | 90         |
| 3.4.5    | ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS .....                            | 92         |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                | <b>94</b>  |
| 4.1      | END .....   | 95         |
| 4.1.1    | ULTRASSOM .....   | 95         |
| 4.1.2    | RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....   | 98         |
| 4.1.3    | EXPANSÃO LINEAR .....   | 100        |
| 4.1.4    | VARIAÇÃO DE MASSA.....  | 105        |
| 4.2      | COMPORTAMENTO MECÂNICO.....   | 113        |
| 4.2.1    | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....                                       | 113        |
| 4.2.2    | MÓDULO DE ELASTICIDADE .....  | 118        |
| 4.2.3    | RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....  | 132        |
| 4.2.4    | Análise visual.....   | 135        |
| 4.3      | MICROESTRUTURA.....   | 139        |
| 4.3.1    | MEV/EDS - Concreto.....   | 139        |
| 4.3.2    | MEV/EDS – Argamassa .....   | 146        |
| 4.3.3    | DIFRAÇÃO DE RAIOS X, DRX .....                                      | 152        |
| 4.3.4    | CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES<br>GERAIS ..... | 155        |
| 4.4      | MÉTODO DE ENSAIO - DEF E DEF+RAA EM LABORATÓRIO .....               | 160        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>   | <b>161</b> |
| <b>6</b> | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>                        | <b>165</b> |
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>166</b> |
|          | <b>APÊNDICE A .....</b>   | <b>179</b> |
|          | <b>APÊNDICE B .....</b>   | <b>180</b> |
|          | <b>APÊNDICE C .....</b>   | <b>181</b> |
|          | <b>APÊNDICE D .....</b>   | <b>184</b> |
|          | <b>APÊNDICE E .....</b>   | <b>187</b> |
|          | <b>APÊNDICE F.....</b>  | <b>190</b> |
|          | <b>APÊNDICE G .....</b>   | <b>191</b> |
|          | <b>APÊNDICE H .....</b>   | <b>192</b> |

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>APÊNDICE I.....</b> | <b>195</b> |
| <b>APÊNDICE J.....</b> | <b>198</b> |
| <b>APÊNDICE K.....</b> | <b>199</b> |
| <b>APÊNDICE L.....</b> | <b>210</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 2.1 – Desenho esquemático dos efeitos do mecanismo de expansão – <i>DEF</i> .<br>.....   | 35 |
| FIGURA 2.2 – Micrografia, por MEV, de um concreto de cimento Portland,<br>representando a <i>DEF</i> . .....  | 36 |
| FIGURA 2.3 – Desenho esquemático dos fatores condicionantes para <i>DEF</i> em<br>estruturas de concreto e argamassas de cimento Portland. ....                               | 38 |
| FIGURA 2.4 – Fotos ilustrativas de dormentes de concreto atacados por <i>DEF</i> .....  | 42 |
| FIGURA 2.5 – Elementos estruturais em contato constante com a água atacados por<br><i>DEF</i> . .....   | 43 |
| FIGURA 2.6 – Estruturas de ponte atacada por <i>DEF</i> . .....   | 43 |
| FIGURA 2.7 – Desenho ilustrativo dos fatores condicionantes para RAA (RAS). ....  | 48 |
| FIGURA 2.8 – Influência da temperatura em reações químicas pela RAS. ....   | 53 |
| FIGURA 2.9 – Poro preenchido em concreto afetado por RAA. ....  | 54 |
| FIGURA 2.10 – Sequência de reação – RAA. ....   | 54 |
| FIGURA 2.11 – Pilar Vertedouro – Barragem Furnas. ....  | 56 |
| FIGURA 2.12 - Pilar Vertedouro – Porto Colômbia. ....   | 56 |
| FIGURA 2.13 – Casos de RAA em usinas hidroelétricas (UHEs). ....  | 56 |
| FIGURA 2.14 – Imagens de dois blocos de fundação, em concreto de cimento<br>Portland, em local não identificado pelo autor, na região de Recife-PE, atacados por<br>RAA. .... | 57 |
| FIGURA 2.15 – Fissuras por ataque combinado – <i>DEF</i> e RAA – Brasil. ....   | 60 |
| FIGURA 2.16 – Fissuras por ataque combinado – <i>DEF</i> e RAA – Portugal. ....   | 60 |
| FIGURA 2.17 – Vista geral à jusante da barragem – indícios de produtos<br>neoformados. ....   | 61 |
| FIGURA 2.18 – Fissuras por ataque combinado – Galeria da barragem. ....   | 61 |
| FIGURA 2.19 – Vista geral à jusante – Fissuras horizontais no vertedouro. ....  | 61 |
| FIGURA 2.20 – Fissuras observadas nas paredes dos diques da barragem. ....  | 61 |
| FIGURA 2.21 – Fissuras em bloco de fundação – <i>DEF</i> e RAA. ....  | 62 |
| FIGURA 3.1 – Expansão ao longo de 30 dias – Areia natural. ....   | 71 |
| FIGURA 3.2 – Resultados do ensaio de expansão, ao longo de 30 dias, dos<br>agregados estudados. ....  | 73 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 3.3 – Fotos ilustrativas dos momentos de dosagem dos CPs: (a) determinação do abatimento; (b) moldagem de CPs de concreto.....  | 76 |
| FIGURA 3.4 – Fotos ilustrativas dos CPs, sendo (a) após moldagem; (b) com filme plástico. ....   | 76 |
| FIGURA 3.5 – Processo de cura térmica aplicada aos CPs desenvolvidos no processo de identificação de <i>DEF</i> e <i>RAA</i> . ....  | 77 |
| FIGURA 3.6 – Fotos ilustrativas do tanque de cura CP's de concreto (a); esquema da disposição no tanque (b); e tanque de cura para prismas de argamassa (c). ....  | 79 |
| FIGURA 3.7 – Gráfico resultante das medidas de pH dos tanques de cura dos corpos de prova ao longo do tempo de sua exposição. ....   | 79 |
| FIGURA 3.8 – Câmara climática utilizada na cura térmica. ....  | 80 |
| FIGURA 3.9 – Foto ilustrativa em um dos momentos de leitura de ultrassom em CPs de concreto.....   | 83 |
| FIGURA 3.10 – Princípio de funcionamento equipamento Resipod.....  | 84 |
| FIGURA 3.11 – Foto ilustrativa de uma das leituras da resistividade elétrica em corpos de prova das amostras submetidas aos processos de formação e de caracterização da <i>DEF</i> e <i>RAA</i> ao longo do tempo. .... | 84 |
| FIGURA 3.12 – Fotos ilustrativas dos prismas de concreto (a), relógio comparador (b), Leitura de expansão argamassa (c).....   | 86 |
| FIGURA 3.13 – Disposição do corpo de prova – Tração indireta.....  | 90 |
| FIGURA 4.1 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de argamassa – <i>RAA</i> isolada.....  | 96 |
| FIGURA 4.2 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de argamassa – <i>DEF</i> isolada.....  | 96 |
| FIGURA 4.3 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de argamassa – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> .....  | 96 |
| FIGURA 4.4 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de concreto – <i>RAA</i> isolada.....   | 97 |
| FIGURA 4.5 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de concreto – <i>DEF</i> isolada.....   | 97 |
| FIGURA 4.6 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de concreto – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> .....   | 97 |
| FIGURA 4.7 – Resistividade elétrica em CPs de concreto – <i>RAA</i> isolada. ....  | 99 |
| FIGURA 4.8 – Resistividade elétrica em CPs de concreto – <i>DEF</i> isolada. ....  | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 4.9 – Resistividade elétrica em CPs de concreto – DEF + RAA. ....                              | 99  |
| FIGURA 4.10 – Resultados de expansão, argamassa – RAA isolada. ....                                   | 100 |
| FIGURA 4.11 – Resultados de expansão, argamassa – DEF isolada. ....                                   | 100 |
| FIGURA 4.12 – Resultados de expansão, argamassa – DEF + RAA. ....                                     | 101 |
| FIGURA 4.13 – Resultados de expansão, concreto – RAA isolada. ....                                    | 103 |
| FIGURA 4.14 – Resultados de expansão, concreto – DEF isolada. ....                                    | 103 |
| FIGURA 4.15 – Resultados de expansão, concreto – DEF + RAA. ....                                      | 104 |
| FIGURA 4.16 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo - REF - CP<br>IV.....                  | 106 |
| FIGURA 4.17 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo - REF - CP V.<br>.....                 | 106 |
| FIGURA 4.18 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo - RAA isolada<br>– CP IV.....          | 106 |
| FIGURA 4.19 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo -RAA isolada<br>– CP V.....            | 107 |
| FIGURA 4.20 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo -DEF isolada<br>- CP IV – Térmica..... | 107 |
| FIGURA 4.21 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo -DEF isolada<br>- CP V – Térmica.....  | 107 |
| FIGURA 4.22 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo - RAA + DEF<br>- CP IV – Térmica.....  | 108 |
| FIGURA 4.23 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo - RAA + DEF<br>- CP V – Térmica.....   | 108 |
| FIGURA 4.24 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - REF – CP IV.<br>.....                 | 109 |
| FIGURA 4.25 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - REF – CP V.<br>.....                  | 110 |
| FIGURA 4.26 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - RAA isolada –<br>CP IV.....           | 110 |
| FIGURA 4.27 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - RAA isolada –<br>CP V.....            | 110 |
| FIGURA 4.28 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - DEF isolada -<br>CP IV – Térmica..... | 111 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 4.29 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - <i>DEF</i> isolada - CP V – Térmica.....           | 111 |
| FIGURA 4.30 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo – <i>DEF</i> + RAA - CP IV – Térmica.....            | 111 |
| FIGURA 4.31 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo – <i>DEF</i> + RAA - CP V – Térmica.....             | 112 |
| FIGURA 4.32 – Resultados de resistência à compressão, argamassa – RAA isolada.....                                 | 113 |
| FIGURA 4.33 – Resultados de resistência à compressão, argamassa – <i>DEF</i> isolada.....                          | 113 |
| FIGURA 4.34 – Resultados de resistência à compressão, argamassa – <i>DEF</i> + RAA.....                            | 113 |
| FIGURA 4.35 – Resultados de resistência à compressão, concreto – RAA isolada.....                                  | 115 |
| FIGURA 4.36 – Resultados de resistência à compressão, concreto – <i>DEF</i> isolada.....                           | 115 |
| FIGURA 4.37 – Resultados de resistência à compressão, concreto – <i>DEF</i> + RAA.....                             | 116 |
| FIGURA 4.38 – Resultados de módulo de elasticidade estático, argamassa – RAA isolada.....                          | 118 |
| FIGURA 4.39 – Resultados de módulo de elasticidade estático, argamassa – <i>DEF</i> isolada.....                   | 118 |
| FIGURA 4.40 – Resultados de módulo de elasticidade estático, argamassa – <i>DEF</i> + RAA.....                     | 118 |
| FIGURA 4.41 – Resultados de módulo de elasticidade estático, concreto – RAA isolada.....                           | 120 |
| FIGURA 4.42 – Resultados de módulo de elasticidade estático, concreto – <i>DEF</i> isolada.....                    | 120 |
| FIGURA 4.43 – Resultados de módulo de elasticidade estático, concreto – <i>DEF</i> + RAA.....                      | 120 |
| FIGURA 4.44 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, argamassa – RAA. Isolada.....       | 122 |
| FIGURA 4.45 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, argamassa – <i>DEF</i> isolada..... | 122 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 4.46 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, argamassa – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> . .....             | 122 |
| FIGURA 4.47 – Resistência à compressão versus módulo de elasticidade, argamassa – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> . .....                      | 123 |
| FIGURA 4.48 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, concreto – <i>RAA</i> isolada. ....                     | 124 |
| FIGURA 4.49 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, concreto – <i>DEF</i> isolada. ....                     | 124 |
| FIGURA 4.50 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, concreto – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> . ....               | 125 |
| FIGURA 4.51 – Resistência à compressão <i>versus</i> módulo de elasticidade, concreto – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> . ....                 | 125 |
| FIGURA 4.52 – Relação entre módulo e compressão, NBR 6118 – <i>RAA</i> isolada. .  | 127 |
| FIGURA 4.53 – Relação entre módulo e compressão, NBR 6118 – <i>DEF</i> isolada...  | 127 |
| FIGURA 4.54 – Relação entre módulo e compressão, NBR 6118 – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> . ..   | 127 |
| FIGURA 4.55 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, argamassa – <i>RAA</i> isolada. ....                                    | 128 |
| FIGURA 4.56 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, argamassa – <i>DEF</i> isolada. ....                                    | 129 |
| FIGURA 4.57 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, argamassa – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> . ....                              | 129 |
| FIGURA 4.58 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, concreto – <i>RAA</i> isolada. ....                                     | 130 |
| FIGURA 4.59 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, concreto – <i>DEF</i> isolada. ....                                     | 130 |
| FIGURA 4.60 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, concreto – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> . ....                               | 130 |
| FIGURA 4.61 – Módulo dinâmico versus módulo estático, concreto – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> . .....                                       | 132 |
| FIGURA 4.62 – Resultados de resistência à tração, concreto – <i>RAA</i> isolada. ....  | 133 |
| FIGURA 4.63 – Resultados de resistência à tração, concreto – <i>DEF</i> isolada. ....  | 133 |
| FIGURA 4.64 – Resultados de resistência à tração, concreto – <i>DEF</i> + <i>RAA</i> . ....  | 133 |
| FIGURA 4.65 – Resistências à tração e à compressão: (a) <i>RAA</i> isolada; (b) <i>DEF</i> isolada; (c) <i>RAA</i> + <i>DEF</i> . .... | 135 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 4.66 – Análise visual argamassas .....                                      | 136 |
| FIGURA 4.67 – Análise visual concretos .....                                       | 138 |
| FIGURA 4.68 – MEV <i>DEF</i> isolada com CP V - idades de 1 a 12 meses. ....       | 140 |
| FIGURA 4.69 – MEV <i>DEF</i> isolada com CP IV - idades de 1 a 12 meses. ....      | 141 |
| FIGURA 4.70 – MEV <i>RAA</i> isolada com CP V - idades de 3 a 12 meses. ....       | 142 |
| FIGURA 4.71 – MEV <i>RAA</i> isolada com CP IV - idades de 3 a 12 meses. ....      | 143 |
| FIGURA 4.72 – MEV <i>DEF</i> + <i>RAA</i> com CP V - idades de 1 a 12 meses. ....  | 144 |
| FIGURA 4.73 – MEV <i>DEF</i> + <i>RAA</i> com CP IV - idades de 1 a 12 meses. .... | 145 |
| FIGURA 4.74 – MEV <i>DEF</i> isolada com CP V-ARI - idade de 12 meses. ....        | 147 |
| FIGURA 4.75 – MEV <i>DEF</i> isolada com CP IV - idade de 12 meses. ....           | 148 |
| FIGURA 4.76 – MEV <i>RAA</i> isolada com CP V - idade de 12 meses. ....            | 148 |
| FIGURA 4.77 – MEV <i>RAA</i> isolada com CP IV - idade de 12 meses. ....           | 149 |
| FIGURA 4.78 – MEV <i>DEF</i> + <i>RAA</i> com CP V - idade de 12 meses. ....       | 150 |
| FIGURA 4.79 – MEV <i>DEF</i> + <i>RAA</i> com CP IV - idade de 12 meses. ....      | 151 |
| FIGURA 4.80 – DRX dos concretos confeccionados com o CP V. ....                    | 154 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| TABELA 2.1 – Temperatura de cura e o início da expansão de argamassas. ....          | 39  |
| TABELA 2.2 - Estruturas hidráulicas no Brasil com RAA. ....                          | 55  |
| TABELA 3.1 – Idades por ensaios/avaliações nos concretos. ....                       | 67  |
| TABELA 3.2 – Idades por ensaios/avaliações nas argamassas. ....                      | 67  |
| TABELA 3.3 – Combinações utilizadas nas dosagens – Concreto e Argamassa. ....        | 67  |
| TABELA 3.4 – Resultados da caracterização mecânica dos cimentos. ....                | 69  |
| TABELA 3.5 – Resultados da caracterização física dos cimentos. ....                  | 70  |
| TABELA 3.6 – Caracterização química dos cimentos. ....                               | 70  |
| TABELA 3.7 – Caracterização do aditivo químico. ....                                 | 73  |
| TABELA 3.8 – Características dos concretos. ....                                     | 74  |
| TABELA 3.9 – Resultados e características das dosagens das argamassas. ....          | 75  |
| TABELA 4.1 – Síntese geral dos resultados obtidos por MEV/EDS - Concretos. ...       | 146 |
| TABELA 4.2 – Síntese geral dos resultados obtidos por MEV/EDS – Argamassas.<br>..... | 152 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|            |  |
|------------|--|
| AAR        | Alkali-aggregate reaction  |
| ABNT       | Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| AGN        | <i>Agregado não reativo – considerado potencialmente inócuo, segundo a ABNT NBR 15577 (Parte 1)</i>  |
| AGR        | Agregado reativo – considerado potencialmente reativo, segundo a ABNT NBR 15577 (Parte 1).   |
| ASR        | Alkali-silica reaction   |
| ASTM       | <i>American Society for Testing and Materials</i>  |
| CCR        | Concreto compactado com rolo   |
| CP - CPs   | Corpo de prova - Corpos de prova   |
| CP IV      | Cimento Portland, pozolânico   |
| CP V ARI   | Cimento Portland de Alta Resistência Inicial   |
| <i>DEF</i> | <i>Delayed Ettringite Formation (Formação de etringita tardia)</i>   |
| DRX        | Difração de Raios X  |
| EDS        | Espectrometria por Energia Dispersiva de Raios X   |
| END        | Ensaio não destrutivo  |
| ESA        | External Sulfate attack (Ataque externo por sulfatos)  |
| IBRACON    | Instituto Brasileiro do Concreto   |
| ISA        | Internal Sulfate Attack (Ataque interno por sulfatos)  |
| LCPC       | <i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – Atualmente IFSTTAR</i>   |
| MEV        | Microscopia eletrônica de varredura  |
| NBR        | Norma Técnica Brasileira   |
| PDI        | <i>Plastic deformation Index</i>   |
| pH         | Potencial hidrogeniônico   |
| SDT        | <i>Stiffness Damage Test</i>   |
| SDI        | <i>Stiffness Damage Index</i>  |
| RAA        | Reação álcali-agregado (para efeitos dessa pesquisa, quando da citação da RAA ao longo do trabalho, estará sendo associada especificamente a reação do tipo álcali-silica) |
| RAS        | Reação álcali-silica - Tipo específico de reação álcali-agregado   |
| REF        | Referência   |
| RS         | Resistente aos sulfatos  |

## LISTA DE SÍMBOLOS E FÓRMULAS

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Al                              | Alumínio   |
| Al(OH) <sub>3</sub>             | Hidróxido de alumínio  |
| Au                              | Ouro   |
| Ca                              | Cálcio   |
| Cl                              | Cloro  |
| C-S-H                           | Silicato de cálcio hidratado   |
| Fe                              | Ferro  |
| Fe <sup>2+</sup>                | Íon ferro, ferroso   |
| H                               | Hidrogênio   |
| H <sup>+</sup>                  | Íon ácido  |
| H <sub>2</sub> O                | Água   |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  | Ácido sulfúrico  |
| K                               | Potássio   |
| Na                              | Sódio  |
| Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> | Equivalente alcalino (Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> = Na <sub>2</sub> O + 0,658K <sub>2</sub> O) |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Tenardita  |
| O                               | Oxigênio   |
| S                               | Enxofre  |
| Si                              | Silício  |
| SiO <sub>2</sub>                | Dióxido de silício   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | Óxido de alumínio - alumina  |
| CaO                             | Óxido de cálcio  |
| CO <sub>2</sub>                 | Dióxido de carbono   |
| CaCO <sub>3</sub>               | Carbonato de cálcio ou calcita   |
| Ca(OH) <sub>2</sub>             | Hidróxido de cálcio, portlandita (CH)  |
| C <sub>2</sub> S                | Silicato dicálcico   |
| C <sub>3</sub> A                | Aluminato tricálcico   |
| C <sub>3</sub> S                | Silicato tricálcico  |
| C <sub>4</sub> AF               | Ferroaluminato tetracálcico  |
| C <sub>2</sub> AF               | Ferroaluminato dicálcico   |
| CaSO <sub>4</sub>               | Sulfato de cálcio anidro   |

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Fe <sub>2</sub> O             | Óxido de ferro                                 |
| K <sub>2</sub> O              | Óxido de potássio                              |
| MgO                           | Óxido de magnésio                              |
| Mg(OH) <sub>2</sub>           | Hidróxido de magnésio - brucita                |
| M-S-H                         | Silicato de magnésio hidrato                   |
| Na <sub>2</sub> O             | Óxido de sódio                                 |
| NaSO <sub>4</sub>             | Sulfato de sódio                               |
| Q                             | Quartzo  |
| SO <sub>3</sub>               | Trióxido de enxofre, sulfato, anidro sulfúrico |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Ânions sulfato                                 |
| SiO <sub>2</sub>              | Dióxido de silício                             |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO

A durabilidade e a vida útil de estruturas de concreto de cimento Portland são influenciadas diretamente pelo seu processamento, onde se englobam os procedimentos de dosagem, com ênfase no método de cura, na sua conformação e adensamento, nas temperaturas de trabalho, na relação água/cimento e nos tipos e consumos de aglomerante, adições, aditivos e agregados. Além disto, estas podem estar comprometidas pelas suas aplicações em ambientes, como o solo, a rocha de fundação, a água de represamento ou subterrâneas e, mesmo, o ar atmosférico, com elevados teores de contaminantes ou, apenas, com elevada umidade relativa (normalmente,  $\geq 80\%$ ). Como consequências imediatas ou tardias que podem ser observadas nas estruturas de concreto expostas, estão as alterações das suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, devido à geração de subprodutos indesejáveis, expansões volumétricas, deslocamentos, microfissuras, fissuras e/ou corrosão. Entre os fatores de deterioração citados, destacam-se, em grandes empreendimentos, os provenientes de processos químicos, por serem os mais identificados, atualmente, como a reação álcali-agregado (RAA), mais especificamente a reação álcali-sílica (RAS), além da geração e crescimento da etringita tardia (delayed ettringite formation ou *DEF*). Como consequências gerais à estrutura acometida por uma destas reações ou por ambas (ataque misto ou combinado), têm-se o desenvolvimento e o crescimento de subprodutos internos (expansões volumétricas e subprodutos) que causam tensões e fissuras progressivas e a sua deterioração. É, neste último contexto, que se encontra esta pesquisa, criando subsídios técnicos e científicos para auxiliar no entendimento da formação, crescimento e da avaliação das consequências dos ataques por RAA e *DEF*, isolados e mistos, em concretos e argamassas, contendo dois tipos de cimentos Portland, o pozolânico (CP IV 32) e o de alta resistência inicial (CP V ARI) e seus processos de conformação, sem e com temperatura de cura elevada ( $\geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Neste trabalho, todas as referências realizadas à RAA, principalmente citadas na metodologia da pesquisa e nos resultados obtidos, referem-se à reação do tipo álcali-sílica (RAS).

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O documento está estruturado em sete capítulos, sendo o primeiro referente à introdução do tema, onde é apresentado o contexto geral, citando as principais influências ligadas à durabilidade das estruturas de concreto de cimento Portland, principalmente relacionada à formação de reações químicas expansivas. Também, estão apresentados os objetivos, geral e específicos, bem como a justificativa para a escolha do assunto e do desenvolvimento da pesquisa.

No segundo capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica referente ao tema, relatando de maneira geral a respeito das patologias de estruturas de concreto. Destacam-se as reações químicas, onde são enquadrados os ataques internos e externos por sulfato, a formação da etringita tardia, assim como seus fatores influentes, ocorrências e estudos relacionados já desenvolvidos. De maneira análoga, é abordada a formação da RAA, do tipo RAS. Por fim, são abordados os ataques conjugados entre *DEF* e RAA, citando suas características, estudos e casos reais onde foram identificados.

O terceiro capítulo refere-se ao programa experimental desenvolvido. Estão apresentados os materiais utilizados, os tipos e quantidades de corpos de prova moldados de argamassa e concreto, as idades de controle, bem como os ensaios destrutivos e não-destrutivos (END) executados para cada combinação, sendo oito combinações, que levam em conta dois tipos de cimento (CP IV e CP V), dois tipos de agregados graúdos (inócuos e reativos), e dois tipos de cura (convencional e térmica).

Os resultados obtidos na pesquisa estão apresentados no quarto capítulo, por meio de textos descritivos, gráficos de evolução no tempo, ao longo de 365 dias, além do confronto com a literatura. De forma geral, estão abordados END, ensaios mecânicos, variação de massa e expansão em ambientes controlados de laboratório.

No quinto capítulo, estão tratadas as considerações finais com base nos resultados obtidos no programa experimental, que respondem aos tópicos apresentados nos objetivos específicos. No sexto capítulo são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros e no sétimo e último capítulo, as referências bibliográficas utilizadas nesta pesquisa.

### 1.3 OBJETIVOS

A seguir, estão apresentados os objetivos, geral e os específicos, desta pesquisa.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Analisar as características físicas e químicas de concretos e argamassas dosados com cimento Portland CP V ARI e CP IV, com relação ao ataque individual e misto de *DEF* e RAA, ao longo do tempo, de forma a auxiliar ao final da pesquisa, na validação de um método de ensaio adaptado, em laboratório, que possa identificar a potencial ocorrência da *DEF* de maneira isolada ou conjunta com RAA.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a possibilidade de desencadeamento da RAA e da *DEF*, ao longo do tempo, em corpos de prova de referência (condições normais de cura úmida) e CPs submetidos à elevada temperatura e cura térmica, controladas, seguida da exposição a ambientes controlados de laboratório;
- b) Determinar o potencial de expansão no tempo dos concretos e das argamassas com relação aos ataques químicos estudados, além da variação de massa das amostras;
- c) Conhecer a evolução, no tempo, das propriedades mecânicas dos concretos e argamassas, como a resistência à compressão axial, tração e módulo de elasticidade;
- d) Determinar o comportamento físico-químico dos concretos e das argamassas por ensaios não-destrutivos (NDT), empregando-se as técnicas de resistividade elétrica e de ultrassom ao longo do tempo;
- e) Investigar a microestrutura, a química elementar, e as fases químicas dos concretos e argamassas por microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS) e por difração de raios X (DRX), de forma a verificar a incidência de produtos neoformados decorrentes dos ataques patológicos ao longo do tempo.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Algumas estruturas de concreto de grande porte, como barragens, geralmente construídas antes de meados do século XX, apresentam hoje evidente comprometimento de sua durabilidade, como deslocamentos e fissuras consideráveis, sendo estes sintomas amplamente atribuídos às reações expansivas. Após as investigações dos materiais constituintes utilizados na construção e as análises microestruturais dos produtos de reação formados, em grande parte dos casos, estão caracterizadas a RAA e a *DEF* (BLANCO *et al.*, 2019).

Os íons sulfato são agentes críticos na engenharia, pois estão presentes em ambientes marinhos, águas subterrâneas além de materiais de construção, como agregados e cimentos. Sua interação química em argamassas e concretos, que experimentam temperatura de cura, ou calor de hidratação elevados (acima de 65 °C), apresentam tendência para a formação da *DEF* (GU *et al.*, 2019).

Estudo realizado por Thomas (2008), referente à investigação de pilares de concreto, que sustentam um viaduto nos Estados Unidos, mostra o aparecimento de fissuras pouco antes de dez anos da construção. O concreto atingiu temperaturas acima de 70 °C no momento da construção, principalmente devido ao calor de hidratação do cimento (consumo ~450 kg/m<sup>3</sup>). Com 15 anos de idade, o concreto já apresentava fissuras com aberturas superiores a 3 mm e a *DEF* foi evidenciada como principal responsável, devido a suas características expansivas, sendo mais evidentes em trechos abaixo do solo.

Atualmente, identificar em elementos construídos a partir de argamassa ou concreto de cimento Portland, os danos causados por mecanismos de reação e dilatação interna, como a RAA, *DEF* ou ainda seu ataque combinado, levando à redução de suas propriedades mecânicas e durabilidade, torna-se um dos maiores desafios da Engenharia Civil (SANCHEZ *et al.*, 2018).

Com base no exposto, o conhecimento técnico e científico das ocorrências de deterioração ou de mecanismos deletérios por RAA e *DEF* de estruturas de concreto e de argamassas de cimento Portland, reações químicas que ocorrem a longo prazo, a partir da conformação de corpos de prova (CPs), com características similares de fabricação, constituídos por materiais específicos e submetidos a condições de cura que tendem a acelerar seus efeitos deletérios, favorecem o entendimento das

patologias, a prevenção e o monitoramento contínuo de grandes empreendimentos, possibilitam intervir nos processos construtivos de forma a evitar manutenções futuras. Com isto, além de conhecer o seu estado atual quanto ao seu desempenho, pode-se inferir pela aplicação mitigadora de materiais de reparo específicos e de tecnologias de controle da patologia.

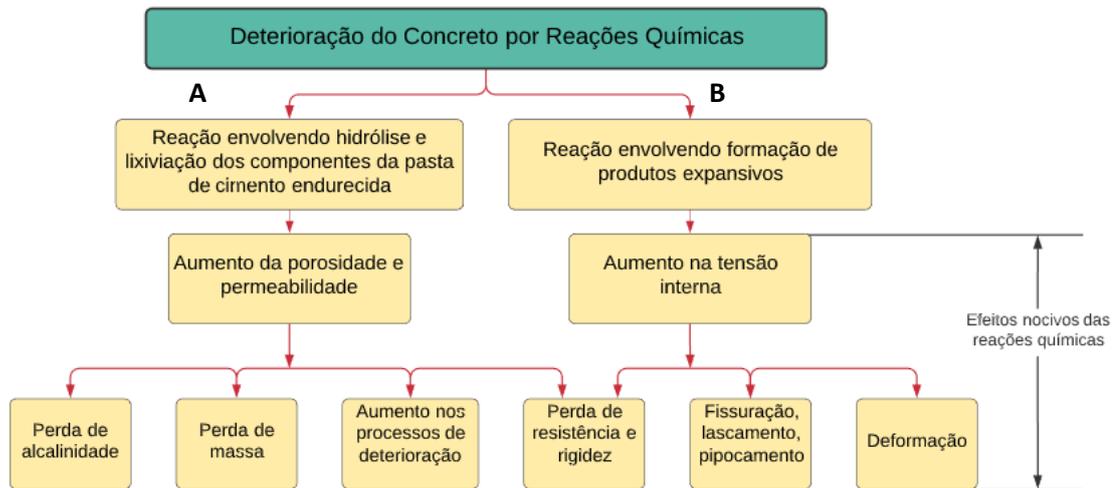
## 2 PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Neste capítulo, encontra-se apresentada a revisão bibliográfica relativa aos principais fenômenos patológicos encontrados em concretos de cimento Portland, relacionadas à deterioração por reações químicas, com maior ênfase para os ataques por sulfato, como a formação da etringita tardia, denominada internacionalmente como delayed ettringite formation (*DEF*) e a reação álcali agregado, RAA, ou alkali-aggregate reaction, AAR; citando suas características, mecanismos de formação, propriedades e consequências de cada uma destas, além de seu ataque combinado.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), entre vários outros autores (BICZOK, 1972; MEHTA *et al.*, 2014; POSSAN, 2010; LARRARD *et al.*, 2010; MIZUMOTO, 2009; CASCUDO, 2009), podem ser desencadeadas no concreto deteriorações e perda de suas propriedades a partir de reações químicas consequentes da ação da água, reações com seus constituintes, por dissolução química, neutralização e arraste ou lixiviação de material da estrutura. Em decorrência, podem-se citar, os mecanismos de troca iônica, como na desdolomitização, os processos de neutralização como a carbonatação, as formações de sais, como de Friedel, por ataques de íons cloreto, e o consequente abaixamento do pH local, que desestabiliza o meio, facilitando a sua degradação continuada.

No FLUXOGRAMA 2.1 adaptado de Mehta e Monteiro (2014), estão apresentados alguns dos processos de deterioração no concreto desencadeados por reações químicas. Em (A), encontram-se apresentados os ataques de água mole no hidróxido de cálcio (portlandita) e no silicato de cálcio hidratado, C-S-H, presentes nos cimentos Portland hidratados, levando ao aumento da porosidade e a sua consequente perda de alcalinidade e massa. Em (B), estão mostrados os ataques por sulfatos, formando etringita e RAA (objetivos deste trabalho), além de englobar, também, a corrosão das armaduras e a hidratação dos óxidos de magnésio, MgO, e de cálcio, CaO, cristalinos, e as reações expansivas que favorecem a perda de resistência mecânica e a Deformação.

FLUXOGRAMA 2.1– Principais tipos de reações químicas que favorecem a deterioração de concreto de cimento Portland.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008) adaptado.

## 2.1 REAÇÕES QUÍMICAS NO CONCRETO

Reações químicas expansivas no concreto podem causar falhas estruturais em todos os tipos de construções, entre elas as usinas e barragens de hidrelétricas, que são estruturas projetadas para possuírem um longo período de vida útil. A RAA, decorrente da combinação entre agregados potencialmente reativos com álcalis do cimento é a mais estudada, porém, cita-se, também, os ataques por sulfatos, de origem externa (ESA) ou interna (ISA), que podem gerar expansões similares a RAA, provocando fissuras e o ingresso de agentes agressivos. Já, a DEF, conhecida como etringita tardia, além da dependência química do cimento, está atrelada a concretos submetidos a temperaturas superiores a 60 °C. É a manifestação patológica mais recentemente estudada, também provocando expansões e fissuras no concreto (HASPARYK; KUPERMAN, 2019; MELO, 2010).

### 2.1.1 Ataque externo por sulfatos, ESA

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o ataque externo por sulfatos no concreto (*external sulfate attack – ESA*) é geralmente oriundo de sais existentes no solo ou rochas (parte sólida), ou dissolvidos nas águas do subsolo. Exemplifica-se tal ação externa deletéria do concreto pelo contato com a água do mar (sulfato de magnésio), formação de ácido sulfúrico e geração de sulfatos pelo contato com a água

contaminada, com esgoto doméstico ou industrial, chuva ácida, efluentes industriais à base de enxofre e solos onde foram aplicados alguns tipos de fertilizantes com alto teor em sulfatos.

Os ânions sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), são comumente associados a cátions como os íons cálcio, magnésio e sódio, sendo os dois últimos mais solúveis no solo. Os sais de sulfato são encontrados geralmente em terrenos argilosos ou lençóis freáticos, sendo os mais importantes na água, como os citados a seguir (BICZOK,1972):

- Água com sal de Gauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ );
- Água selenitosa ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ );
- Água com sal amargo ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ); e a
- Água industrial ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $(\text{SrSO}_4)$ ).

O sulfato de sódio, também conhecido como sal de Gauber, está presente em diversos minerais; o termo, água selenitosa, está relacionado à presença de gesso; e o sal amargo, aos sulfatos encontrados em fertilizantes (BICZOK,1972).

A degradação de concretos devido às reações químicas entre o cimento Portland hidratado e os íons sulfato de fonte externa, depende da concentração destes íons e da composição da pasta de cimento no concreto. O ataque pode se manifestar na forma de expansão e fissuração, aumentando a permeabilidade e, conseqüentemente, facilitando a penetração de águas agressivas, acelerando o processo de deterioração (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Biczok (1972), Collepardi (2003), entre outros autores, atribuíram o termo ESA quando a fonte é a água externa ou o solo e penetra nas estruturas em serviço, geralmente, em concretos com alta taxa de permeabilidade, localizados em ambientes úmidos, favorecendo a difusão do sulfato na fase aquosa dos poros capilares.

Segundo Santhanam *et al.* (2002), em sua pesquisa realizada com barras de argamassa submetidas ao ESA, o ataque por sulfato de sódio progride em estágios. Inicialmente, ocorre a expansão de uma camada exterior, levando à formação de fissuras na região interior da argamassa que é quimicamente inalterada. Com o contato contínuo da camada superficial com o sulfato, esta tende a se desintegrar.

Sequencialmente, a solução de sulfato reage com os produtos de hidratação do cimento no interior das fissuras geradas, levando esta região a também expandir e causar uma fissuração que é direcionada ao interior das amostras.

O ESA gerado por uma solução de sulfato de magnésio, forma uma camada de brucita (hidróxido de magnésio), sendo que a penetração da solução ocorre por difusão através de sua superfície. Na medida que o ataque avança, são formados produtos como o gesso e a etringita na pasta sob a superfície, ocasionando expansão e a perda de resistência mecânica. As expansões causam fissuras superficiais possibilitando a penetração da solução de sulfato de magnésio. Tais fatos favorecem a descalcificação do silicato hidratado de cálcio (C-S-H), pela substituição de íons de cálcio pelos íons de magnésio. O produto dessa reação de substituição é um silicato de magnésio hidrato (M-S-H), associado à perda de características cimentícias (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), as expansões no concreto, relacionadas ao ataque de sulfatos são, geralmente, associadas à formação de etringita, sulfato hidratado que contém alumina, e que é decorrente da reação entre o hidróxido de cálcio da pasta de cimento e os íons sulfato. Também, citam que a formação de gipsita nas reações de trocas catiônicas pode causar expansão.

### 2.1.2 Ataque interno por sulfatos, ISA

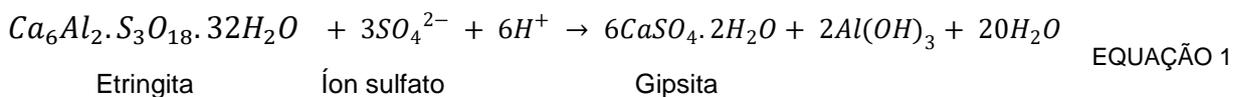
Segundo Collepardi (2003), o ataque interno por sulfatos (internacionalmente conhecido por *Internal sulfate attack – ISA*) ocorre quando a fonte não provém do ambiente, mas geralmente de agregados contaminados com gesso ou da decomposição térmica da etringita primária. Esse ataque se caracteriza pela formação de microfissuras preliminares com a deposição de etringita tardia, ocorrendo em ambientes úmidos, favorecendo a difusão dos íons sulfatos nos poros capilares. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), os sulfatos podem ser incorporados ao clínquer na forma de matéria-prima ou pelo combustível do forno, com a formação das fases de sulfatos alcalinos solúveis.

A degradação do concreto por *ISA* ocorre devido às reações químicas entre os compostos hidratados do cimento e os íons sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), liberados durante o processo de oxidação de alguns tipos de agregados, ou quando a fonte dos sulfatos

são os próprios compostos do cimento Portland, como a gipsita. Na produção de cimentos, caso o teor de sulfato (gipsita, ou gesso- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) utilizado para proporcionar o fenômeno de retardo da pega inicial, não tenha sido adequado, podem ocorrer reações químicas futuras prejudiciais à durabilidade de concretos e argamassas. No caso de excesso, a solução dos poros pode reter os íons sulfato e disponibilizá-los ao longo do tempo, favorecendo a formação da etringita secundária, responsável por expansões e fissurações, bem como da taumasita, citada mais adiante, dependendo das características dos constituintes envolvidos (HASPARYK; KUPERMAN, 2019).

A gipsita pode ser encontrada na natureza, a maioria dos solos contém sulfato na forma de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), normalmente de 0,01 a 0,05% expresso como  $\text{SO}_4^{2-}$ , quantidade considerada inofensiva para o concreto, no caso de um ataque externo. Já a deterioração da pasta de cimento Portland endurecida pela formação de gipsita por ISA se dá, inicialmente, pela redução do pH e pela perda da rigidez e resistência, seguida pela expansão e fissuração, transformando o concreto em uma massa pastosa e não coesiva (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Ayora *et.al.* (1998), cristais de gipsita podem se desenvolver a partir de reações químicas entre a etringita e os íons sulfato. Tais reações estão relacionadas à redução na concentração de hidróxidos de cálcio e de íons aluminato, geralmente em sistemas com pH entre 11,5 e 12,0, com altas concentrações de íons sulfato. Na EQUAÇÃO 1, está apresentada a reação química esquemática citada.



Neville (1997), relatou que a transformação do hidróxido de cálcio em gipsita, ocorrendo principalmente nas camadas mais superficiais do concreto, gera um acréscimo de volume em torno de 124%, responsável pela degradação das estruturas atacadas.

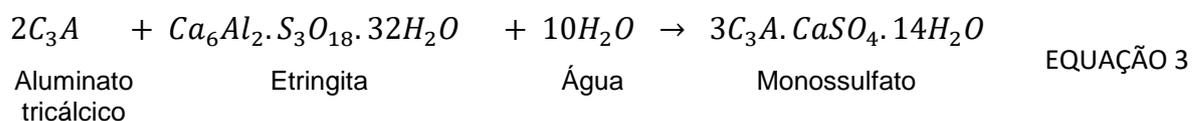
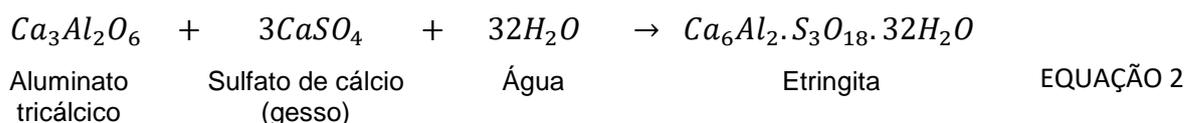
Hoppe Filho *et al.* (2014), mostraram os resultados de estudo realizados em amostras de concreto oriundos de estação de tratamento de esgoto, que após 15 anos de uso, apresentava sinais de degradação por ataque de sulfatos. Após as vistorias

realizadas, coleta de testemunhos de concreto de diversos locais da estação e análises microscópicas por microscopia eletrônica de varredura, com microsonda analítica de raios-X, e por difração de raios-X, (MEV/EDS e DRX), os autores concluíram que a estrutura apresentava degradação pela ação da formação de gipsita na massa de concreto. Além disso, os autores complementaram que, além das evidências superficiais, os estudos com os testemunhos extraídos remeteram à identificação do composto também em camadas mais profundas, alertando para a possível continuidade das manifestações patológicas na estrutura analisada ao longo do tempo.

A expansão resultante do ataque por sulfatos em concreto, argamassa ou pasta endurecida está, normalmente, atribuída aos compostos: gipsita, etringita, tenardita, mirabilita e taumasita, e são dependentes da concentração deste íon no meio, seja por origem externa ou mesmo interna, via contaminação dos insumos, mas, principalmente, de agregados, contendo fases minerais à base de sulfetos inorgânicos e orgânicos e sulfatos, também adicionados ao cimento (MEHTA, 1992; NEVILLE, 2004; MULLAUER *et al.*, 2013).

Para Marcelino (2015), a etringita primária é transformada em monossulfoaluminato de cálcio após o término da gipsita no meio e, devido ao estado ainda fluido e plástico do concreto, não são observados efeitos deletérios nesta fase.

Assim, de forma mais detalhada, pode-se citar que a etringita é formada consumindo parte do  $SO_4^{2-}$  da solução, sendo precipitada sobre o cimento anidro, se posicionando em torno das partículas do aluminato tricálcico,  $C_3A$ . O monossulfato é formado a partir da decomposição da etringita, após o consumo de todo o sulfato de cálcio. Na EQUAÇÃO 2 e na EQUAÇÃO 3, estão mostrados os processos de formação da etringita e do monossulfato (ODLER, 2007; TAYLOR *et al.*, 1997 e MEHTA e MONTEIRO, 2008 apud MELO, 2010).



Taylor *et al.* (2001), confirmaram a formação de monossulfatos a partir da etringita primária, porém não em sua totalidade, citando estudos com diversos tipos de cimento onde a etringita persistiu em pequenos cristais instáveis em relação aos maiores, devido a uma maior área específica, podendo se recristalizar em vazios ou fissuras existentes em concretos ou argamassas.

O processo de oxidação dos sulfetos gera ácido sulfúrico e, com ele, a liberação do íon ácido  $H^+$ , que ao ser liberado durante a preparação do concreto, pode tornar a água de amassamento ácida. Dessa forma, além do ISA, o ácido sulfúrico gerado pode promover o ataque das fases hidratadas, como o hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e carbonato de cálcio, resultando na dissolução da pasta de cimento do concreto (NEVILLE, 1997).

Os principais fatores que afetam e contribuem para os processos químicos de oxidação dos sulfetos presentes nos agregados são a umidade, o oxigênio dissolvido, a temperatura, a superfície específica, a morfologia, o teor de ferro, a presença de bactérias aeróbias e o pH do sistema, onde estão inseridos, geralmente reagindo no meio de forma conjunta (GOMIDES, 2009).

O sulfeto de ferro é um dos compostos que quando oxidado na presença de umidade, forma sulfatos e hidróxidos de ferro. Este processo diminui o pH do sistema e é acelerado quando o oxigênio está dissolvido na solução. Algumas espécies de bactérias podem atuar no processo de forma catalisadora, promovendo um aumento da velocidade de oxidação do  $Fe^{2+}$ . A quantidade de ferro presente nos sulfetos e o aumento da temperatura também aceleram as reações de oxidação (DUARTE, 2011 e TAYLOR *et al.*, 1984, *apud* PEREIRA, 2015).

Segundo Gomides *et al.* (2005), a superfície específica dos grãos é o principal fator interveniente na oxidação dos sulfetos e, pelos seus resultados, quanto maior a superfície específica, mais rápido pode ser o processo de alteração e de desenvolvimento das reações expansivas no interior do concreto.

Para vários pesquisadores, como Mehta e Monteiro (2014), Duchesne e Fournier (2013), de forma geral, três reações principais estão envolvidas no ataque de sulfatos ao concreto, envolvendo a combinação:

- Dos íons sulfatos com o hidróxido de cálcio livre e/ou o C-S-H, formando a gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ );
- De gesso e dos aluminatos hidratados de cálcio com o monossulfato hidratado, formando a etringita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ); e a
- Da gipsita e do carbonato de cálcio com o C-S-H, formando a taumasita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ).

A formação de gipsita, segundo reportado na literatura, geralmente, está associada a uma perda de adesão e de resistência, ocasionando lascamento e expansão, além de diminuir a resistência à tração dos concretos. A formação de etringita está relacionada com a expansão e a fissuração e na formação da taumasita, um aumento da resistência mecânica durante os estágios iniciais, devido à densificação da microestrutura. Sequencialmente, ocorre a redução da coesão e a perda progressiva de resistência, rigidez e massa das estruturas atacadas (WERITZ *et al.*, 2009; PEREIRA, 2015).

De forma a evitar as reações químicas expansivas, foram desenvolvidos cimentos Portland resistentes a sulfatos (RS), em que a quantidade de aluminato ( $\text{C}_3\text{A}$ ) é restrito, reduzindo os danos de concretos ou argamassas do ataque de sulfato convencional. Porém, tal medida, não impede necessariamente a formação de taumasita ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ), em que o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) é atacado e não as fases do aluminato (CRAMMOND, 2003).

A taumasita possui morfologia similar à da etringita, necessitando de análises por difração de raios X, para a sua identificação. Pela reação com o íon sulfato, há o ataque ao C-S-H, que libera os íons  $\text{SiO}_2$  para sua formação. A taumasita (TSA – Thaumassite form of sulfate attack), está correlacionada entre os tipos de ataques por sulfatos como o mais danoso, por transformar o concreto atacado em uma massa pastosa, sem coesão, haja vista que a pasta de cimento endurecida é substituída parcial ou integralmente pela taumasita, que não possui características cimentantes (SANTHANAM *et al.*, 2002; ZHOU *et al.*, 2006).

A formação da taumasita ocorre em um ambiente com alta umidade, preferencialmente, a temperaturas baixas, entre 5 °C e 15 °C, presença de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), íons carbonatos e sulfatos. Também, pode ocorrer na

massa de concreto de forma conjugada com a brucita ( $Mg(OH)_2$ ) e gipsita secundária (ZHOU *et al.*, 2006; CRAMMOND e HALLIWELL, 1997; CRAMMOND, 2003 e SANTHANAM *et al.*, 2002).

A taumasita, na condição de mineral natural, apresenta forma de cristais aciculares brancos, semelhantes aos de etringita. É um mineral hexagonal com uma célula unitária em que os átomos de silício ocorrem na forma de  $[Si(OH)_6]^{2-}$ . Possui este modo incomum de seis silícios coordenados que ajudam a distinguir a taumasita da etringita, pela semelhança na estrutura química (EDGE; TAYLOR, 1969 *apud* CRAMMOND, 2003).

A TSA pode atacar estruturas de fundação (enterradas), gerando a desagregação da matriz do concreto, a partir da interface concreto/solo. Também, podem precipitar como a etringita em poros, espaços vazios e fissuras, sem necessariamente causar danos ao concreto ou argamassa, indicando um potencial problema futuro. Além disso, a TSA pode ocorrer de forma conjugada com outras reações expansivas, como a RAA (BICKLEY, 1995).

Para Hasparyk *et al.* (2003) e Gomides (2009), no caso de ISA, os principais efeitos identificados no concreto são as fissuras bem orientadas em forma de mapa, manchas superficiais de cor marrom devido à oxidação dos sulfetos e a formação de hidróxido de ferro. Adicionalmente, tem-se as manchas esbranquiçadas (eflorescências) devido aos produtos formados, uma redução considerável do pH do sistema e, já, em estados mais avançados de degradação, o deslocamento do concreto.

Oliveira (2013), em seu estudo referente a ISA, utilizou CPs, contendo agregados diabásicos com sulfetos minerais. Os resultados mostraram um retardo na evolução da resistência à compressão quando eles foram comparados com os obtidos de ensaios para a construção de barragens de concreto compactado com rolo, CCR. O efeito resultante foi atribuído à formação de etringita, em virtude dos sulfetos e sulfatos minerais nos insumos utilizados, com grande área superficial específica

O principal objeto deste trabalho é a formação da DEF ou ISA, essa oriunda de elevadas temperaturas no concreto. Este tema será especificamente abordado em detalhes na sequência.

## 2.2 FORMAÇÃO DE ETRINGITA TARDIA (*DEF*)

Neste subitem, estão apresentados a definição para a *DEF*, fatores influentes em sua ocorrência, casos onde foram identificadas as reações expansivas e estudos realizados a respeito do tema.

### 2.2.1 Definição

A *DEF* pode ser definida como uma reação química que ocorre em compósitos à base de cimento Portland, levando-o à deterioração antecipada. É caracterizada pela expansão gerada internamente à pasta cimentícia devido à formação da etringita tardia, geralmente, devido a processos de cura térmica inicial com temperaturas acima de 60 °C, levando o concreto à fissuração e comprometendo a durabilidade da estrutura atacada (MELO, 2010). A *DEF* também pode ocorrer por meio da geração elevada de calor no interior do concreto, a partir de reações químicas, quando um cimento desenvolve elevado calor de hidratação, altos consumos de aglomerante cimentício, entre outros (HASPARYK; KUPERMAN, 2019).

Em relação às reações de hidratação do cimento, Collepardi (2003), citou que a formação de etringita leva aos processos de expansão, porém, não necessariamente qualquer expansão relacionada à formação de etringita está ligada a ataque por sulfatos. A formação de etringita nas primeiras horas da moldagem de concretos, ainda, no estado plástico, não apresenta expansões prejudiciais, e relaciona-se às reações para a regulação do tempo de endurecimento da pasta cimentícia (gesso e substâncias anidras). Outra aplicação benéfica para a etringita está relacionada aos cimentos expansivos, utilizados no desenvolvimento de concretos para a compensação de esforços de contração, onde a etringita é formada nos primeiros dias e está distribuída de maneira homogênea.

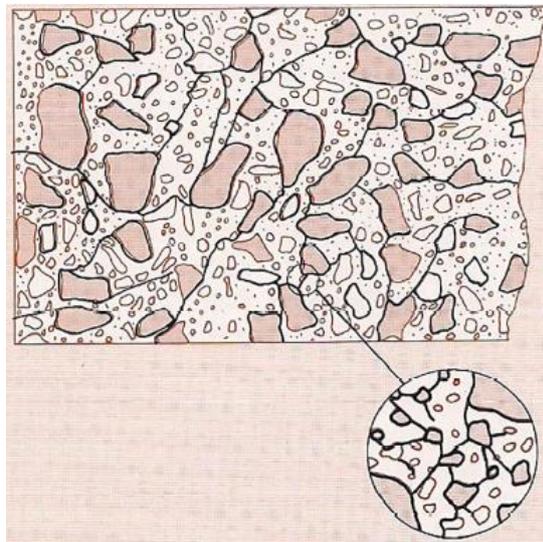
Ainda, a respeito das reações químicas por *DEF*, Collepardi (2003) indicou que são geradas expansões heterogêneas no concreto endurecido, de maneira não uniforme e localizada, ocorrendo depois de meses ou anos após a concretagem, associada a um ataque prejudicial por sulfatos. Os resultados danosos são perdas de

resistência mecânica por fissuração e fragmentação ocasionadas em concretos rígidos.

De forma a ilustrar o exposto, na FIGURA 2.1 está apresentado um desenho esquemático da reação expansiva por *DEF* em argamassas e concretos. O autor (SANCHEZ *et al.*, 2018), tentou representar o fenômeno, considerando a formação de fissuras na pasta e na interface com os agregados (miúdos e graúdos). A etringita e o hidróxido de cálcio se recristalizaram nas fissuras formadas, em um primeiro momento, sem gerar tensões expressivas, pelo provável baixo grau de saturação.

Com o aquecimento, qualquer etringita formada após a hidratação, se decompõem em hidróxido de cálcio e monossulfato, por ter se tornado termodinamicamente instável, liberando íons sulfato para a solução dos poros. Esses íons são adsorvidos pelo C-S-H e liberados após o resfriamento à temperatura ambiente. Na presença de umidade, vão se difundir na solução dos poros, reagindo com compostos ricos em (Al - alumínio) e formando a etringita secundária, já na matriz cimentícia endurecida, gerando as tensões internas (BAUER *et al.*, 2006).

FIGURA 2.1 – Desenho esquemático dos efeitos do mecanismo de expansão – *DEF*.



FONTE: Sanchez *et al.* (2018).

Na FIGURA 2.2, está apresentada a formação de etringita nas bordas de um agregado, indicando um ataque por *DEF*, conforme proposto pelo desenho esquemático apresentado por Sanchez *et al.* (2018).

FIGURA 2.2 – Micrografia, por MEV, de um concreto de cimento Portland, representando a DEF.



FONTE: Hasparyk e Kuperman (2019).

Complementarmente ao modelo apresentado, Brunetaud (2005) citou que a deterioração de argamassas e concretos por DEF pode ocorrer em um momento inicial de maneira uniforme, mais lenta e, posteriormente, pela pressão rápida ocasionada pela geração acelerada de cristais. Segundo o autor, a reação apresenta uma etapa inicial de deterioração correspondente à solubilização da etringita primária devido às altas temperaturas de cura. Sequencialmente, surge a etapa denominada “latente”, com aparente inatividade, fase essa na qual a reação ocorre lentamente, nos poros capilares e no C-S-H. Nesta fase, podem ser verificadas alterações no módulo de elasticidade (fato também verificado por Diamond (1996)), na massa e no volume do material. Em seguida, atribuiu-se o período de aceleração da deterioração, quando aparecem as primeiras fissuras, a interface entre a pasta e o agregado começa a ser preenchida com a etringita, que vai se comprimindo nos espaços abertos com a evolução da sua cristalização, propiciando novas aberturas e preenchimentos consecutivos no interior da pasta.

Conforme citado por Taylor *et al.* (2001), para as combinações químicas relacionadas à DEF formada a partir de ISA, após a cura térmica, ficam especialmente ligados ao C-S-H (silicato de cálcio hidratado –  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) grandes quantidades de trióxido de alumínio (alumina –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e trióxido de enxofre (anidro sulfúrico –  $\text{SO}_3$ ). Nesta fase, o alumínio substitui a sílica no C-S-H e fixa-se entre as suas camadas, também, podendo estar combinado nas fases de aluminatos hidratados. Já, os sulfatos podem estar presentes na solução dos poros, no monossulfato ou adsorvidos no C-S-H.

Na temperatura ambiente e sob alta taxa de umidade, o alumínio continua, em sua maioria, ligado ao C-S-H por ligações químicas fortes. Desta maneira, a sua disponibilização para a solução dos poros é baixa. Assim, considera-se que a maior fonte de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para a reação e a formação da etringita tardia vem do monossulfato, que em conjunto com o C-S-H e a solução dos poros formam os principais reagentes para a *DEF* (MELO, 2010).

Melo (2010) reportou em seu trabalho que os reagentes existentes na solução dos poros, o monossulfato e o C-S-H, iniciam a formação da etringita, em volumes submicrométricos, a partir de processos dinâmicos de dissolução-precipitação.

As reações químicas para a formação da *DEF* tendem a ocorrer em pequenos poros, com pequena interconexão, onde exista fontes de íons e álcalis, principalmente o hidróxido de alumínio, pois nestes pontos ocorre a supersaturação dos reagentes, conseqüentemente, sendo os pontos com maiores pressões expansivas (TAYLOR *et al.*, 2001).

Vários autores correlacionam a relação entre  $(\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3)$  e o teor de sulfatos existentes nos cimentos Portland, considerando uma razão igual ou superior a 0,50 e teores acima de 3%, respectivamente, como indícios para a formação da *DEF* (HEINZ *et al.*, 1999; BAUER *et al.*, 2006). Vale salientar, que a norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018), tem como limite máximo, para todos os tipos de cimento Portland, o teor de 4,5% de sulfatos (na forma de trióxido de enxofre -  $\text{SO}_3$ ).

Bauer *et al.* (2006), comentou, ainda, que relações de  $(\text{SO}_3)^2/\text{Al}_2\text{O}_3$  superiores a 2, também indicam susceptibilidade para a ocorrência de *DEF*, sendo esta relação ainda mais significativa que a anteriormente mencionada.

Com base na relação entre o anidro sulfúrico e a alumina, pode-se inferir que para cimentos com maior quantidade de  $\text{SO}_3$ , existe a potencialidade para a formação da etringita. Caso o teor maior verificado seja de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a formação do monossulfato é favorecida. Estas proporções químicas evidenciam a importância do estudo dos cimentos como medida preventiva em relação à formação de *DEF* (MELO, 2010).

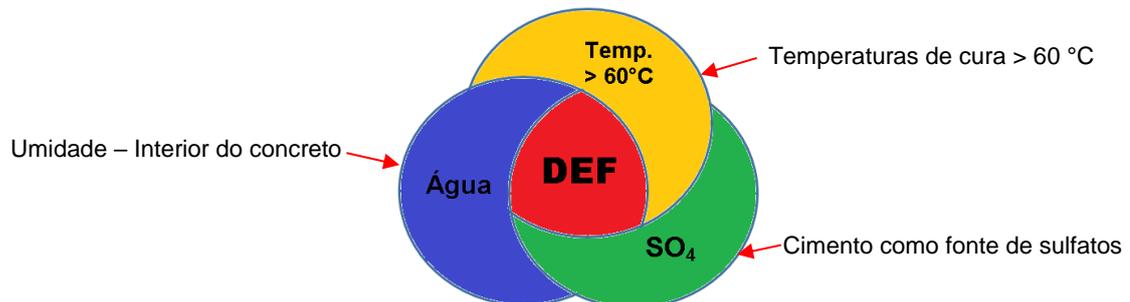
Uma característica da etringita quando avaliada por DRX, são os picos de baixo ângulo, como de 0,973 nm (1010) e de 0,561 nm, plano (1120). A sua identificação não é simples, pois sua cristalinidade pode ser alterada no processo de moagem para a preparação da amostra, além de ser difícil a identificação dos picos após secagem

ou aquecimento, haja vista que perde água com facilidade (a partir de 50 °C), tendendo a possuir nestes casos, características amorfas (TAYLOR, 1997).

Outro parâmetro importante para o estudo da *DEF* foi apresentado por Zhang *et al.* (2002), o qual citou que os CPs curados em ambiente úmido podem apresentar variação de massa de 5%, com cinética similar à expansão, quando em condições normais, esta variação não passaria de 2%.

Neste trabalho, os objetos de estudo são os ataques em concretos e argamassas relacionados à *DEF* por ISA em decorrência de elevadas temperaturas, com fonte dos íons sulfato proveniente dos cimentos utilizados na composição das amostras para ensaio, umidade proveniente da cura úmida final, até as datas de controle. Na FIGURA 2.3, está apresentado um esquema indicando os fatores condicionantes para a ocorrência de *DEF* em estruturas de concreto e argamassas de cimento Portland.

FIGURA 2.3 – Desenho esquemático dos fatores condicionantes para *DEF* em estruturas de concreto e argamassas de cimento Portland.



FONTE: O autor (2020).

### 2.2.2 Fatores influentes

A temperatura é o principal fator acelerador da *DEF*, especialmente quando for acima de 60 °C (BAUER *et al.*, 2006). Nos estudos de Melo (2010), é possível notar a diferença entre um concreto que atingiu 60 °C ao ser comparado com outro submetido a 80 °C. Foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura aos 140 dias de idade. As amostras curadas a 60 °C apresentaram cristais sugestivos de etringita, já as curadas a 80 °C, a presença intensa deste composto. Ainda, a temperatura pode acelerar as reações para a *DEF*. Uma vez ocorrida a cura térmica inicial, elevadas temperaturas de exposição de concretos ao longo do tempo atuam também como fator influente e acelerador do processo expansivo.

Taylor *et al.* (2001), citaram que poucos foram os estudos atribuídos às manifestações patológicas em concretos e argamassas relacionadas a *DEF*, que não passaram por altas temperaturas, inferindo nesses casos a alta concentração de  $SO_3$  no clínquer do cimento, mais precisamente, em fases das quais foram liberados apenas lentamente ao passar do tempo. Em estudo realizado à temperatura acima de  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , atribuíram que a etringita primária foi instável em pastas de cimento, pois o C-S-H e a solução dos poros competiram pelo sulfato de sua composição química.

Heinz *et al.* (1999), em estudo com argamassas, comprovaram a influência da temperatura de cura na formação da *DEF*, sendo que, para as maiores temperaturas aplicadas, mais rapidamente puderam ser observadas as ocorrências expansivas. Na TABELA 2.1, estão apresentados os dados obtidos.

TABELA 2.1 – Temperatura de cura e o início da expansão de argamassas.

| Temperatura de cura ( $^\circ\text{C}$ ) | Início das expansões (dias) |
|--|-----------------------------|
| 100                                      | 14                          |
| 90                                       | 42                          |
| 85                                       | 70                          |
| 80                                       | 180                         |
| 75                                       | 365                         |

FONTE: Heinz *et al.* (1999).

Nas argamassas curadas a  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , submetidas a ciclos de gelo e degelo, também foram observadas expansões e, com isto, o autor concluiu que esta seria a temperatura crítica para a formação de *DEF*.

A umidade é outro fator fundamental para a ocorrência da *DEF*, pois as reações químicas e trocas iônicas acontecem somente no interior dos poros ou fissuras saturadas de compostos cimentícios (GODART *et al.*, 2013). Diversos estudos laboratoriais realizados para a avaliação do desenvolvimento da *DEF*, mantêm as amostras em ambiente de cura úmida durante e após os ciclos térmicos (DAYARATHNE, 2013; KCHAKECH *et al.*, 2016; RASHIDI *et al.*, 2017; SCHOVANZ, 2019). Fato comprovado por Ceary (2007) e Godart *et al.* (2013), por meio de estudos realizados em estruturas de pontes e píer, em contato constante com água, onde as patologias foram identificadas em grau avançado de deterioração.

Vários autores como Ghorab *et al.* (1981); Heinz *et al.* (1986) e Taylor *et al.* (2001), confirmaram que para a formação da *DEF* em concretos e argamassas foram necessários, pelo menos, temperaturas internas superiores a 70 °C, por um período suficiente para a decomposição da etringita primária e, posteriormente, seu resfriamento, mantidos, em cura úmida ou ciclos intermitentes contínuos de molhagem e secagem.

Segundo Gambale *et al.* (2019), o aumento do consumo de cimento em misturas de concreto testadas, aliado a uma baixa relação água/cimento, tenderam a reduzir a permeabilidade, porém, ajudaram na elevação da temperatura interna, devido às reações exotérmicas decorrentes do aglomerante, fazendo com que a etringita primária ficasse instável, disponibilizando maior quantidade de íons sulfatos na solução dos poros, que contribuíram para a formação da *DEF* por ISA.

Diante do exposto, o tipo e o consumo do cimento utilizado nas misturas são fatores intervenientes para as reações expansivas por *DEF*. Muitos autores atribuem em seus estudos a ocorrência da *DEF* em combinações utilizando o cimento Portland de alta resistência inicial, CP V ARI (KCHAKECH *et al.*, 2016; RASHIDI *et al.*, 2017; GAMBALE *et al.*, 2019). Tal aglomerante possui alto calor de hidratação, principalmente quando ensaiado pela NBR 16697 (ABNT, 2018) e apresenta resultados acima de 270 J/g, em 41 h, nesses casos contribuindo para o aumento da temperatura interna das misturas cimentícias, conforme comentado anteriormente no início deste tópico.

Além dos fatores citados, que influenciam na reatividade potencial dos agregados para a RAA e *DEF*, tem-se a finura do cimento, que pode gerar um calor de hidratação mais elevado, em menor tempo e a formação de produtos menos estáveis, de maior área superficial e mais porosos (TOSUM, 2006; TAYLOR *et al.*, 2001; BÉRUBÉ e FOURNIER, 1993; e HASPARYK *et al.*, 2007; 2011).

O teor de aluminatos de cálcio e o seu tipo presente no cimento (C<sub>3</sub>A) também afetam o desenvolvimento da *DEF*. Cimentos com C<sub>3</sub>A elevados são mais propícios ao ataque, segundo Crammond (2003). Em estudos realizados com pastas de cimento, Older e Chen (1995) *apud* Melo (2010), concluíram que as amostras que apresentavam 10% de C<sub>3</sub>A e 5% de SO<sub>3</sub>, apresentaram expansões superiores às aquelas com 7% e 3,4% respectivamente.

Outro fator interveniente nos processos de expansão por *DEF*, é a adição de materiais pozolânicos às misturas. Em estudos realizados com argamassas curadas a 90 °C, Hobbs (1999), verificou a redução das expansões devidas a *DEF*, com a substituição de 35% do cimento por escória de alto forno, bem como para 20% do aglomerante por cinza volante. Nguyen *et al.* (2013), em seus estudos com argamassas, verificaram além das proporções de materiais pozolânicos na substituição do cimento, a influência da finura destas adições, e quanto maior foi a área específica, maior foi a mitigação observada. Os pesquisadores apresentam como justificativa para a redução das reações expansivas por *DEF* a diminuição do teor de sulfato nas misturas, provenientes do clínquer, devido à sua substituição parcial, as reações pozolânicas, reduzindo o teor de hidróxido de cálcio disponível, e devido ao elevado teor de ( $Al_2O_3$ ) dos materiais pozolânicos.

Leklou *et al.* (2016), atribuem a redução das expansões por *DEF*, quando adicionados teores de pozolana (na faixa de 20% a 30%) às misturas cimentícias, à quantidade de ( $Al_2O_3$ ) nas cinzas, que geralmente são maiores que no cimento, levando à redução da relação ( $SO_3/Al_2O_3$ ), diminuindo assim a capacidade de adsorção de sulfato pelo C-S-H e o grau do potencial de reação para a *DEF*. Na mesma linha, Ramlochan *et al.* (2003), atribui a eficiência para controlar as expansões, aos teores de ( $Al_2O_3$ ) existentes nas adições.

### 2.2.3 Ocorrências de *DEF*

Diversos autores como Mielenz (1995), Chandra *et al.* (1988), Oberholster (1992), Ozol (2002) e Hasparyk e Kuperman (2019), relataram a ocorrência de *DEF* em peças de concreto pré-moldadas, muitas vezes pré-tensionadas, curadas a vapor, como o caso de dormentes para linhas férreas. Foram verificadas trincas, rachaduras e prejuízos significativos nas propriedades mecânicas dos elementos atacados.

Na FIGURA 2.4, estão mostradas imagens de dormentes de concreto produzidos em diversas regiões do mundo (Suécia, Portugal e Brasil), atacados por *DEF*, onde se verificam fissuras tipo mapa e rachaduras no concreto. São suscetíveis ao ataque pelo fato de geralmente tratar-se de peças pré-moldadas, curadas à vapor a altas temperaturas (acima de 60 °C) e por utilizar elevado consumo de cimento para

o atendimento aos requisitos mecânicos e por favorecer a desforma em curto intervalo de tempo (HASPARYK e KUPERMAN, 2019).

FIGURA 2.4 – Fotos ilustrativas de dormentes de concreto atacados por DEF

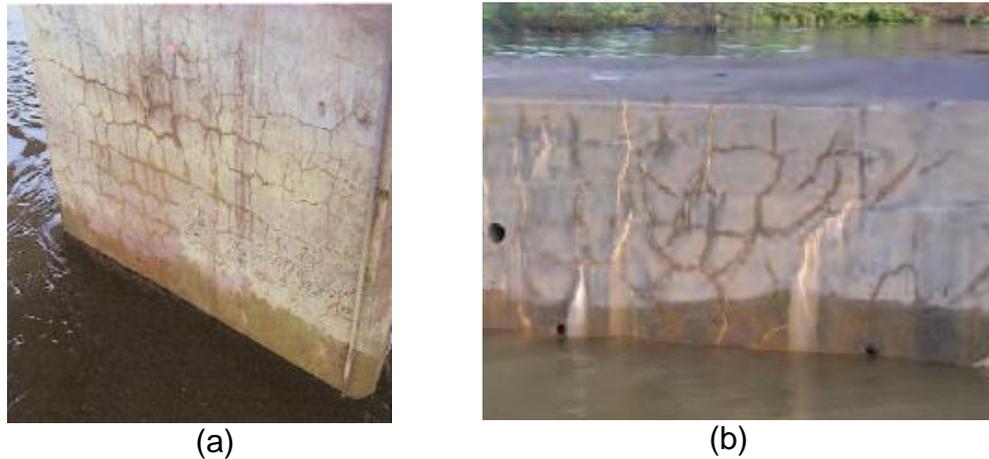


FONTE: Hasparyk e Kuperman (2019).

Colunas de sustentação de um viaduto na região sul dos Estados Unidos, construído na década de 80, apresentaram deterioração antecipada por *DEF* decorrente de fissuras antes da primeira década após a construção, segundo Thomas (2008). Com base em relatos, o cimento utilizado na construção foi o de alta resistência inicial, com consumo médio de 450 kg/m<sup>3</sup>. Em vistoria realizada após 15 anos de uso, foram identificadas trincas nos elementos estruturais com aberturas de até 3 mm.

De maneira a observar as consequências do ataque pela *DEF* em diferentes estruturas de concreto, está apresentada na FIGURA 2.5, transcrita de Godart *et al.* (2013), imagens resultantes de elementos estruturais em contato com umidade, apresentando fissuras tipo “mapa” decorrentes dos processos expansivos por *DEF*. Segundo os autores, uma característica para o ataque nestes tipos de construções é a existência de umidade ao redor das fissuras. Em (a), tem-se uma estrutura de sustentação de ponte nos Estados Unidos e em (b), uma base de pír de uma ponte na França.

FIGURA 2.5 – Elementos estruturais em contato constante com a água atacados por *DEF*.



FONTE: Godart *et al.* (2013).

Ceary (2007), avaliou em seu estudo oito pontes no estado de Maryland nos Estados Unidos, confirmando a presença de *DEF* em todos os elementos, não submetidos a cura térmica, sendo que somente em quatro existiam evidências visuais tipo mapa. O autor identificou também trechos com características visuais diferentes em uma mesma ponte, conforme representado na FIGURA 2.6. Em (a), um local com poucas evidências dos ataques expansivos, em (b), um trecho da mesma obra, porém com muitas fissuras e evidência de produtos neoformados.

FIGURA 2.6 – Estruturas de ponte atacada por *DEF*.



FONTE: Ceary (2007).

#### 2.2.4 Estudos para avaliar o potencial para a *DEF*

Como não existem métodos normatizados para a realização de testes laboratoriais, de forma a identificar o potencial para ocorrência da *DEF*, foram levantados os métodos desenvolvidos no meio acadêmico/laboratorial, que estão

apresentados em ordem cronológica a seguir, de forma a evidenciar as metodologias aplicadas, e devidamente publicadas.

Taylor *et al.* (2001), apresentaram resultados laboratoriais executados com prismas de argamassa nas dimensões de (40 x 40 x 160) mm, curados inicialmente entre 80 e 100 °C e, sequencialmente, mantidos em água à temperatura ambiente, onde foram visualizados indícios da formação de *DEF* em alguns meses após a moldagem, porém mais substancialmente após 1 e 2 anos, com expansões em torno de 0,45%.

Brunetaud (2005), por meio de dados experimentais, mostrou oportuno o uso da microsonda de energia dispersiva (EDS) para a identificação de elementos químicos, de maneira a caracterizar a etringita, visualizada preenchendo os poros das pastas cimentícias. Método utilizado de maneira complementar aos ensaios laboratoriais, conforme citado por Taylor *et al.* (2001). Ainda, nos estudos de Brunetaud (2005), foi observada redução da ordem de 50% na resistência à compressão após 700 dias de avaliação, quando a expansão atingiu 1% devido ao fenômeno da *DEF*.

Dayarathne (2013), em estudo realizado com barras de argamassa nas dimensões de (25 x 25 x 285) mm, para a avaliação da *DEF*, utilizou a metodologia de moldagem padrão para os ensaios de RAA, seguindo a ASTM C 1260 (2014), deixando uma amostra referência, sendo curada em temperatura ambiente e as demais submetidas ao aquecimento. O ciclo térmico consistiu na manutenção das amostras por uma hora em temperatura ambiente, em seguida, devidamente selados, foram aquecidos até 95 °C em uma hora, mantidas nesse patamar por mais 12 h. Posteriormente, deixando a temperatura reduzir por 4 h, foram desmoldadas e mantidas em temperatura ambiente por 6 h até a primeira leitura de comprimento. Na sequência, as amostras foram submetidas por mais dois ciclos de 24 h em estufa a 85 °C e 24 h em água e cal. O autor conseguiu conforme suas conclusões, avaliar a formação da *DEF* nas variações de materiais estudados, e até os 140 dias de idade.

Kchakech *et al.* (2016), realizaram um estudo a respeito de *DEF* em concreto, utilizando cimento de alta resistência inicial, CP V ARI, com elevado teor de sulfato, aluminatos e álcalis. Complementaram o teor equivalente alcalino para obter a taxa de 1% de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> na mistura, além de utilizar agregados potencialmente inócuos para

a RAA e com uma relação água/cimento de 0,46. Os CPs prismáticos moldados, possuíam dimensões de (11 x 11 x 22) cm e foram curados a 20 °C durante os primeiros 100 dias, envoltos por papel alumínio. Posteriormente, foram aquecidos com uma taxa de 5 °C/h até a temperatura próxima de 80 °C, onde, permaneceram de 1 a 14 dias, conforme as combinações do estudo. Posteriormente, foram resfriados na mesma taxa até a temperatura de 38 °C. Ao final, foram verificadas importantes formações de *DEF* nas amostras ensaiadas.

Leklou *et al.* (2016), em estudo realizado em CPs de argamassa, nas dimensões de (40 x 40 x 160) mm, com substituição parcial de cimento por cinzas volantes, nas proporções de 10, 20 e 30%, obtiveram resultados que atenuaram ou até eliminaram os processos de expansão devidos a *DEF*. Os traços de argamassa foram padronizados em uma parte de aglomerante e três de areia natural. A relação água/cimento utilizada foi de 0,56. De forma a potencializar as reações expansivas, foi adicionado às misturas o teor de equivalente alcalino de 3,1%, complementando às características químicas do cimento, totalizando nos traços 5% de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ . Os ciclos de cura para os CPs seguiram 4 etapas, sendo 2 h à 20 °C, posterior aquecimento com taxa de 30 °C/h até o patamar de 80 °C, ao qual permaneceram por 10 h e o resfriamento final, até 20 °C, com taxa de 5,5 °C/h, quando foram mantidos em tanques com água deionizada até a idade de 650 dias. Os autores atribuíram tal resultado ao teor de  $(\text{Al}_2\text{O}_3)$  nas cinzas, que foi maior que no cimento, levando à redução da relação  $(\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3)$ , diminuindo assim a capacidade de adsorção de sulfato pelo C-S-H e o grau de expansão da *DEF*.

Rashidi *et al.* (2017), estudaram por métodos acústicos não-lineares a detecção e a quantificação dos mecanismos de degradação causados por *DEF* em argamassas de cimento Portland, utilizando CPs na forma de barras prismáticas, nas dimensões de (25 x 25 x 285) mm, sendo estes submetidos a duas condições de cura, a metade considerada como referência, a  $(23 \pm 1,5)$  °C e, a outra, em um ciclo térmico de 4 h no patamar de 23 °C, sendo então aquecidos na sequência até 95°C, e mantidos neste patamar por 12 h, utilizando neste processo uma taxa de aquecimento e de resfriamento igual a 20 °C/h, quando, então, foram resfriados novamente até 23 °C, para se efetuar a medida de suas dimensões em estado inicial de degradação. Os CPs foram mantidos imersos em solução aquosa de cal. Para tanto, na dosagem, foram trabalhados cimentos tipo I, com relação  $(\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3)$  de 0,70, 0,87 e de 0,74;

tipo III, com relação ( $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ), de 0,96; e tipo V, com uma relação de 0,76, com areia natural à base de sílica (com densidade específica de 2,66 e módulo de finura de 2,43). A relação a/c foi de 0,50 e de areia/cimento de 2,75. O tempo de estudo foi até próximo de 500 dias. Pelos resultados obtidos, os autores inferiram que a *DEF* danificou todas as argamassas em estudo.

Gambale *et al.* (2019), em seu trabalho referente a estudos térmicos e microestruturais em blocos de concreto, constituídos por diferentes tipos e consumos de cimento Portland, constataram em análises microscópicas (MEV/EDS) após o período de 2 anos de cura ambiente, a presença de etringita em amostras que foram submetidas a temperaturas acima de 65 °C, provenientes dos processos exotérmicos de hidratação dos aglomerantes utilizados. Vale ressaltar que a formação da etringita foi evidenciada de forma mais expressiva nos concretos produzidos com cimento tipo CP V e CP II F, porém, também foram identificadas, no concreto contendo CP IV.

Nguyen *et al.* (2019), realizaram estudo utilizando corpos de prova de argamassa, submetidos a ciclos de cura térmica para o desenvolvimento da *DEF*, avaliando a mitigação das reações expansivas com o uso de Metacaulim em substituição à massa de cimento (10, 20 e 30) %. Foram moldados CPs nas dimensões de (40x40x160) mm, providos de pinos para a medição das expansões. Foram curados inicialmente por 2 h a 20 °C, então a temperatura foi elevada a 80 °C a uma taxa de 30 °C/h, permanecendo por 10 h. Posteriormente, foram resfriados até 20 °C, a uma taxa de 5,5 °C/h. Foram armazenados em tanques com água deionizada, com renovação periódica da água do tanque. Ao final do estudo, 650 dias, foi evidenciado que a adição de Metacaulim na proporção de 10% não foi suficiente para eliminar as expansões por *DEF*, porém, as reduziram em 70%, tendo-se como base a amostra de referência (1,7 % de expansão). Já, para as adições de 20 e 30%, até a idade de controle, todas as expansões ficaram abaixo de 0,04%.

Mais recentemente, Schovanz (2019), em estudo da formação de *DEF* em concretos utilizando CP IV e CP V, utilizou um consumo de cimento de 471 kg/m<sup>3</sup>, relação água/cimento de 0,46 e o uso de aditivo plastificante na composição dos CPs estudados em ambiente laboratorial. Os corpos de prova cilíndricos, nas dimensões de (100 x 200) mm, foram submetidos a ciclos térmicos já nas primeiras horas após a moldagem. Permaneceram por 6 h em temperatura de 25 °C, foram aquecidos a uma

taxa de 10 °C/h até o patamar de 85 °C, quando foram mantidos por 12 h. Posteriormente, os CPs foram resfriados na mesma taxa de aquecimento até 38 °C, quando foram inseridos em cura úmida até as datas de controle, a saber: 7, 28, 56, 84, 168 e 252 dias. Foram obtidos importantes resultados referentes à manifestação patológica estudada, indicando promissor o método de cura e ambiente de exposição adotados.

Os estudos relatados nesse item contribuíram para a adequação de um método de cura inicial e térmica, além de envelhecimento, a serem utilizados na etapa experimental deste trabalho, em ambos, argamassas e concretos.

## 2.3 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

### 2.3.1 Definição

A RAA é definida por reação química que ocorre no interior das estruturas de concreto, ocasionada pela interação entre os hidróxidos alcalinos, provenientes na maioria dos casos do cimento Portland utilizado, os minerais contendo sílica reativa existente nos agregados e a presença de umidade. O produto da reação formado é um gel alcalino instável que na presença de umidade expande, gera tensões internas e conseqüentes fissurações, trincas bem como deslocamentos nos elementos concretados (HASPARYK, 2005).

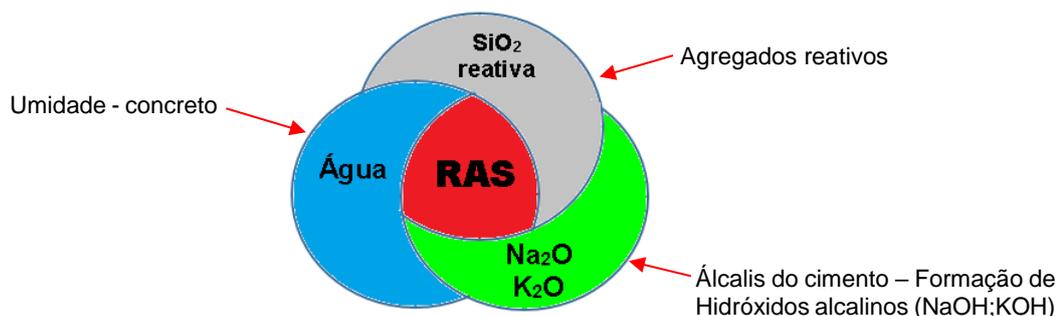
As características visuais desse tipo de reação são as fissurações do tipo “mapa”, preenchidas com material branco ou vítreo, em poros próximos dos agregados e em suas bordas exsudação e na superfície do concreto, gel, microfissurações e deslocamentos, além de outras, conforme citado e direcionado a estruturas de UHEs, como a abertura ou o fechamento de juntas de dilatação, abertura de juntas de construção, que podem vir acompanhadas de fissuras horizontais, fissuração de vigas e lajes, além de desalinhamento e movimentações por expansões que podem interferir na operação de equipamentos essenciais para a manutenção do funcionamento das usinas, como turbinas e comportas (PAULON, 1981; ANDRIOLO, 1997; HASPARYK, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2014); HASPARYK, 2011).

Segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), existem dois tipos principais de processos químicos relacionados a RAA, a RAS e a reação álcali-carbonato. Esta última relacionada à interação entre os hidróxidos alcalinos e os agregados com origem calcária (dolomíticos argilosos). Nos referidos documentos foi citada, também, a reação álcali-silicato, classificada como um tipo mais lento de RAS.

A RAS, que será estudada neste trabalho, independentemente do tipo de reação, álcali-sílica ou álcali-silicato, é a mais conhecida e difundida no meio técnico, definida de maneira geral pela interação entre as várias formas de sílica reativa existentes na composição dos agregados e álcalis do concreto na presença de umidade (HASPARYK, 2011).

Na FIGURA 2.7, estão registrados os fatores condicionantes que levam a ocorrer a referida reação expansiva, as fases reativas de sílica dos agregados, os hidróxidos alcalinos formados principalmente a partir dos álcalis provenientes do cimento Portland utilizado (também podem ter origem de minerais dos agregados) e a umidade no interior do concreto. Com esses fatores e a sua interação, a RAA ocorre. A partir dela, são gerados produtos, que na presença de umidade, adsorvem água e expandem.

FIGURA 2.7 – Desenho ilustrativo dos fatores condicionantes para RAA (RAS).



FONTE: O autor (2020).

### 2.3.2 Fatores influentes à RAA

São vários os fatores influentes para a ocorrência da RAA, que podem atuar isolados ou em conjunto, fato este que atribui características distintas para cada

combinação, precisando ser melhor entendidos, para posteriores conclusões quanto ao grau de agressividade e tempo para o desenvolvimento da reação. Os principais fatores que podem ser citados são as características dos agregados, cimento, argamassa, concreto, condições ambientais e tempo de exposição (HASPARYK, 2011).

### 2.3.2.1 Características dos agregados

Diversos foram os documentos que citaram a reatividade potencial pela presença do dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), na composição mineralógica da maioria dos agregados utilizados em concretos (ACI COMMITTEE 221. ACI 221.1R-98; BÉRUBÉ; FOURNIER, 2004; BICZOK, 1972; COUTO, 2008; HASPARYK, 1999 e 2005; KIHARA, 1986; VALDUGA *et al.*, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2014; BAUER *et al.*, 2006). Porém, nem todas as formas da sílica são reativas, sendo esta característica relacionada, principalmente, com a sua cristalinidade.

Na NBR 15577-3 (ABNT, 2018), estão apresentadas, de maneira abrangente, as formas de avaliação e de classificação de agregados para um concreto quanto a sua potencialidade de ser reativos ou inócuos para RAA. Atribuiu-se, neste documento, a reatividade potencial às características como a baixa cristalinidade e a presença de sílica metaestável e/ou vidros vulcânicos. Também, estão classificados pelo tipo da rocha de origem os materiais com potencial para contribuir nas reações químicas expansivas, como o caso das sedimentares e vulcânicas, que podem possuir a opala, a tridimita ou a cristobalita e o vidro vulcânico. Já, para as rochas contendo quartzo, os materiais reativos podem ser a calcedônia, quartzo micro e criptocristalino além do quartzo fraturado e/ou deformado. Estes, podendo ser originários de rochas ígneas como o granito, sedimentares como o siltito, o argilito e o calcário e as metamórficas, como o caso do gnaisse.

Vários autores confirmaram que a reatividade de um mineral está relacionada ao grau de desorganização e de instabilidade de sua estrutura atômica (grau de cristalinidade), tornando a fase cada vez mais reativa. Os materiais com maior tendência à reação geralmente possuem estrutura amorfa, como a opala e os vidros vulcânicos (HASPARYK, 2005; HASPARYK, 2011).

Segundo Leming (1996), a sílica cristalina pode conter elevadas taxas de energia de deformação armazenadas em sua rede cristalina, oriundas de processos de transformação às elevadas temperaturas e pressão, como podem ser citados os processos de formação das rochas ígneas de origem vulcânica. Assim, mesmo os minerais de sílica estáveis, podem levar à RAA (RAS) pelo seu estado interno de tensões, mesmo que de forma mais lenta, como é o caso dos silicatos.

A reatividade potencial de um agregado depende do grau de cristalização da sílica, da quantidade de energia armazenada na estrutura cristalina, além da área de exposição de sílica reativa e o seu teor disponível no mineral. A seguir, estão apresentadas as porcentagens limites para alguns minerais existentes nos agregados às quais levam a consideração de potencialmente reativos (ABNT NBR 15577-3, 2018; FARNY e KOSMATKA, 1997):

- Calcedônia, acima de 3%;
- Quartzo microcristalino, acima de 5%;
- Opala (ou sílica amorfa), acima de 0,5% em massa;
- Tridimita ou cristobalita, acima de 1%; e os
- Vidros vulcânicos naturais, acima de 3%.

Além das características químicas citadas, as propriedades físicas dos agregados também podem interferir no seu grau de reatividade, como o tamanho e a forma do grão. Hobbs (1988) comprovou por meio de experimentos, que um mesmo agregado reativo pode apresentar diferentes comportamentos de expansão, quanto maior for sua superfície específica (mais finos). Já, Valduga *et al.* (2005), apresentaram resultados, comprovando a diferença nas expansões com variação do grau de arredondamento das partículas, sendo maior o potencialmente reativo quanto maior for a sua esfericidade.

### 2.3.2.2 Características do cimento

Os álcalis (sódio e potássio), geralmente fornecidos às misturas de argamassas e concretos pelos aglomerantes utilizados, são fatores condicionantes para a RAA. Podem ser considerados solúveis ou insolúveis, sendo os primeiros relacionados aos sulfatos e os insolúveis aos silicatos e aluminatos do clínquer. Como a reação tende

a ser lenta, todos os álcalis existentes podem contribuir para a expansão (POOLE, 1992; GLASSER, 1992; HASPARYK, 2011).

A pasta de cimento Portland é alcalina, mantendo pH em torno de 12, sendo que tal característica pode ser atribuída às soluções com altos teores em álcalis contidas nos poros microscópicos isolados e interconectados existentes, o que facilita a migração dos íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ), que em contato com fases reativas de sílica, favorecem a RAS (HOBBS, 1988; BAUER *et al.*, 2006; HASPARYK, 2011).

A NBR 15577-1 (ABNT, 2018), define para efeito da contribuição na RAS, além da sílica reativa, os álcalis como o sódio e o potássio provenientes de fonte interna ou externa aos concretos e argamassas, que em contato com água, são solubilizáveis, independentemente, se de maneira imediata ou ao longo do tempo. Fato também citado por Bérubé e Fournier (2004), a respeito da possível contribuição de álcalis às misturas de fontes que não sejam os aglomerantes, como o ingresso de umidade ou água alcalina.

O teor equivalente alcalino total do cimento Portland ( $\text{Na}_2\text{O}_{eq}$ ) é calculado estequiometricamente pela média ponderada entre os íons sódio e potássio, conforme apresenta a EQUAÇÃO 4, NBR 15577 (ABNT, 2018).

$$Na_2O_{eq} = 0,658 K_2O (\%) + Na_2O (\%) \quad \text{EQUAÇÃO 4}$$

Conforme a ASTM C-150 (2007), teores de equivalente alcalino abaixo de 0,60 % representam cimentos com baixo teor de álcalis. Para o ACI Committee 221 (1998), esse teor deve ser de no máximo 0,40%, fato que não garante a inexistência da RAS, que pode ocorrer quando associada a agregados altamente reativos. Na maioria dos casos, o potencial para a formação da RAA aumenta com o acréscimo da alcalinidade na solução dos poros, sendo os processos de molhagem e secagem uma das formas para o aumento de tal concentração. Também, pode ser citado que quanto maior o teor de álcalis do cimento e o consumo deste no concreto, maiores serão as expansões (HASPARYK, 2011; BAUER *et al.*, 2006).

Outro fator interveniente para a ocorrência da RAA é a finura do cimento, quanto mais fino, maior é sua reatividade. Dados comprovados por estudos realizados por Bérubé e Fournier (1993) e Hasparyk *et al.* (2007), contribuindo para a padronização do cimento especificado na NBR 15577 (ABNT, 2018), para unificar os métodos de ensaio, independentemente do local de sua realização, identificado na

normativa como “cimento padrão”. A finura padronizada é de  $(4.900 \pm 200)$  cm<sup>2</sup>/g, determinada pela NBR 16372 (ABNT, 2015).

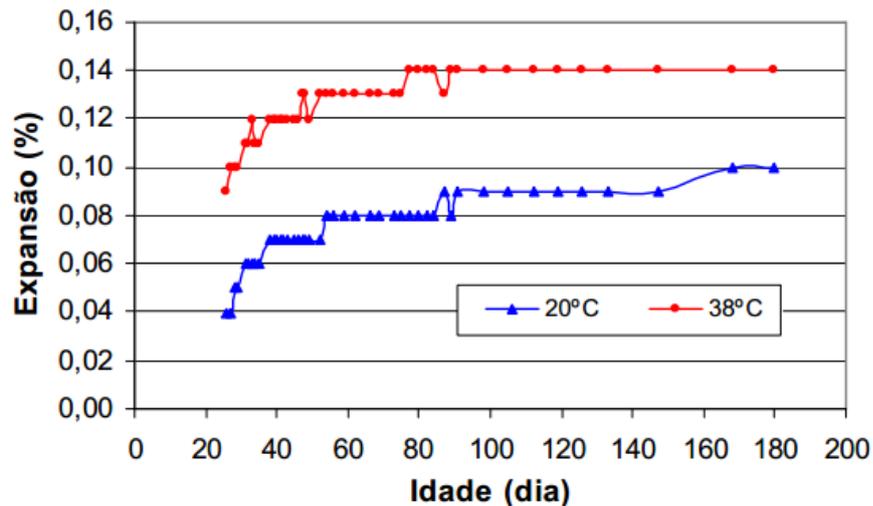
### 2.3.2.3 Condições ambientais

A existência de umidade relativa no concreto é um fator necessário para a ocorrência da RAA, sendo que para teores acima de 80%, são provocados aumentos em sua magnitude, pois aceleram a migração de íons alcalinos na solução dos poros e até os locais da reação. Outro papel importante da umidade no processo envolve a sua absorção pelo gel formado, resultando no fenômeno expansivo. Partindo deste princípio, pode-se afirmar que estruturas secas não estão susceptíveis ao ataque e aquelas localizadas em ambientes úmidos são mais sujeitas a este tipo de deterioração (HASPARYK, 2011; BAUER *et al.*, 2006; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Na norma brasileira (ABNT NBR 15577-1, 2018) encontra-se apresentado que na sua análise de risco o tipo de estrutura e o ambiente/meio no qual ela está exposta de forma a trabalhar preventivamente.

O aumento da temperatura também é um fator interveniente, porém, não somente para a RAA e sim para a maioria das reações químicas, que geralmente são ativadas ou aceleradas em temperaturas elevadas (BICZOK, 1972; HASPARYK, 2005).

A ação da temperatura no acréscimo de expansões devidas às reações químicas para um mesmo tipo de material, foi evidenciada por Hasparyk (2011) por meio da submissão de barras de argamassa a curas distintas, sendo uma a 21 °C em banho termorregulador e outra a 38 °C, até a idade de 180 dias. Mesmo nos exemplares tendo experimentado o processo descrito pelo método acelerado para RAA (30 dias), antes no início das avaliações, foram observadas expansões em torno de 40% superiores em comparação aos curados a 21 °C, conforme apresentando na FIGURA 2.8.

FIGURA 2.8 – Influência da temperatura em reações químicas pela RAS.



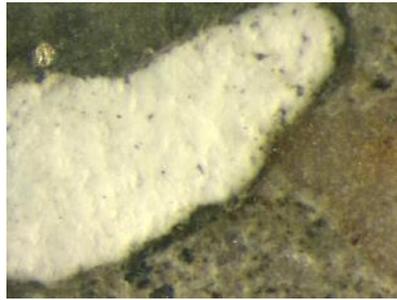
FONTE: Hasparyk (2011).

#### 2.3.2.4 Solução dos poros do compósito

Segundo Thomas *et al.* (2007), para ocorrer a RAA, inicialmente, os poros do concreto precisam dispor dos hidróxidos alcalinos de sódio e potássio, com a presença de cálcio. A concentração de íons cálcio no meio é um fator determinante para os processos de expansão, devendo ser inferior ao teor de álcalis presentes (OLIVEIRA, 2013). Na presença da sílica reativa dos agregados ( $\text{SiO}_2$ ), haverá, possivelmente, a reação com os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) e, na sequência, com os álcalis disponíveis ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ), formando um gel alcalino, com altos teores em Na, K, Ca e Si (elementos comumente identificados em investigações microscópicas). O gel formado se difunde pelos poros conectados, preenchendo os volumes de vazios e as interfaces entre os agregados e a pasta, locais onde se concentram as tensões internas e, conseqüente, fissuração após absorver água da pasta de cimento.

Na FIGURA 2.9 está apresentando um poro totalmente preenchido por produtos de reação (RAA), em testemunho de concreto deteriorados.

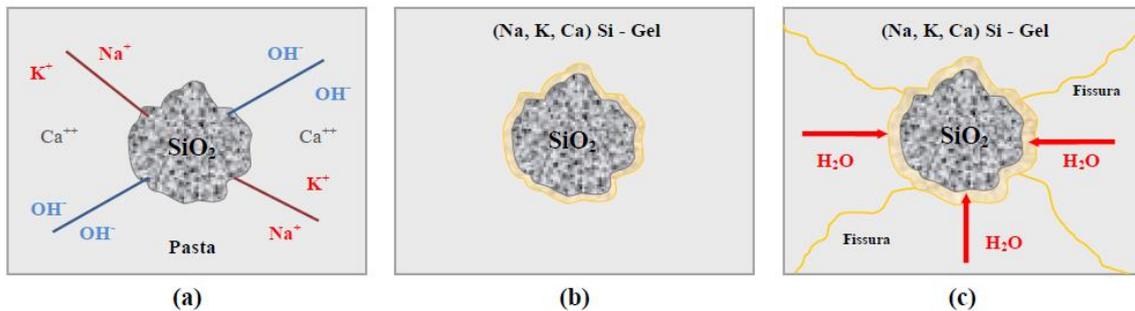
FIGURA 2.9 – Poro preenchido em concreto afetado por RAA.



FONTE: Hasparyk (2011).

Na FIGURA 2.10, estão exemplificados alguns dos mecanismos de reação da RAA, citados anteriormente. Em (a), está ilustrada a solução dos poros com a presença dos álcalis ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ), íons hidroxila e cálcio, além da presença de sílica reativa. Em (b), está representada a formação do gel, rico em  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Si}^{4+}$ , depositado ao redor de um grão de agregado reativo. Já, em (c), está esquematizado o processo de absorção de água pelo gel formado, levando ao aumento de volume e a consequente geração de tensões no interior do concreto, resultando na formação de fissuras.

FIGURA 2.10 – Sequência de reação – RAA.



FONTE: Silva (2009), adaptado de Thomas *et al.* (2007).

### 2.3.3 Casos de RAA

São vários os casos de degradações de estruturas de concreto em decorrência da RAA.

As estruturas hidráulicas são obras muito suscetíveis a experimentar reações expansivas como a RAA. Essas, são constituídas por grandes volumes de concreto, com agregados geralmente produzidos das rochas de fundação, processadas em grandes volumes no próprio canteiro de obras, fato que dificulta seu controle quanto a potencialidade reativa, haja vista a possível heterogeneidade do meio ao longo do

avanço das escavações, bem como por estarem em contato com água, uma vez que os álcalis estão disponíveis nos aglomerantes (HASPARYK, 1999).

Com base no referencial teórico levantado, a RAA é uma reação química expansiva, de maneira geral lenta, sendo este parâmetro função de seus fatores intervenientes e que apresentam um processo evolutivo, relativamente lento de deterioração, pois continuam em operação, mesmo após vários anos de sua constatação (PAULON, 1981; ANDRIOLO, 1997; HASPARYK, 1999; MEHTA e MONTEIRO, 2014; HASPARYK, 2011).

Na TABELA 2.2, estão apresentadas algumas das estruturas hidráulicas com RAA no Brasil relatadas por Hasparyk (1999).

TABELA 2.2 - Estruturas hidráulicas no Brasil com RAA.

| <b>Estruturas hidráulicas</b> | <b>Ano construção</b> | <b>Período para identificar a RAA (anos)</b> |
|-------------------------------|-----------------------|--|
| Paulo Afonso IV - Barragem    | 1979                  | 6  |
| Moxotó - Casa de força        | 1977                  | 3  |
| Tapacurá - Barragem           | 1975                  | 15   |
| Porto Colômbia - Vertedouro   | 1973                  | 12   |
| Paulo Afonso III - Barragem   | 1973                  | 5  |
| Jaguara - Barragem            | 1971                  | 17   |
| Furnas - Barragem             | 1963                  | 13   |
| Peti - Barragem               | 1945                  | 19   |
| Ilha dos Pombos - Barragem    | 1924                  | 67   |

FONTE: Adaptado a partir de Hasparyk (1999).

Na FIGURA 2.11 está mostrado um dos pilares do vertedouro da barragem de Furnas e na FIGURA 2.12 o topo de um dos pilares do vertedouro da barragem Porto Colômbia. Ambas as estruturas apresentaram fissuração tipo mapa e a segunda, com deslocamento nas bordas (HASPARYK, 2011).

FIGURA 2.11 – Pilar Vertedouro – Barragem Furnas.



FIGURA 2.12 - Pilar Vertedouro – Porto Colômbia.



FONTE: Hasparyk (2011).

Na FIGURA 2.13 estão registrados três tipos de manifestações decorrentes da RAA já observadas em estruturas de concreto de usinas hidrelétricas: (a) fissuras mapeadas, (b) abertura de junta de contração entre blocos e (c) abertura expressiva de fissura em estrutura de concreto.

FIGURA 2.13 – Casos de RAA em usinas hidroelétricas (UHEs).



(a)



(b)



(c)

FONTE: Hasparyk (2011).

Os casos mais expressivos e comentados pelo meio técnico, no Brasil, a partir do ano 2000 envolvendo edificações residenciais e comerciais situam-se na região metropolitana de Recife/PE. Após várias vistorias realizadas de maneira abrangente, constataram a manifestação patológica instalada em grande parte das fundações avaliadas, com grau de deterioração elevado (ANDRADE *et al.*, 2006).

Na FIGURA 2.14, estão apresentados alguns blocos de fundação com elevado grau de degradação devido a RAA. Percebeu-se, pelas imagens, que o lençol freático na região é superficial, mantendo as estruturas com água, fator positivo para o

desencadeamento das reações expansivas, além dos demais fatores influentes citados no item 2.3.2. (ANDRADE *et al.*, 2006).

FIGURA 2.14 – Imagens de dois blocos de fundação, em concreto de cimento Portland, em local não identificado pelo autor, na região de Recife-PE, atacados por RAA.



FONTE: Andrade *et al.* (2006).

#### 2.3.4 Normatização

O assunto RAA está bem apoiado por meio de normas nacionais e internacionais ao meio técnico, o que difere bastante da *DEF*.

A análise petrográfica, descrita pelas normas NBR 15577-3 (ABNT, 2018), ASTM C 295 (2019) e ASTM C 856 (2020), tem por definição o método para investigar a presença ou a ausência de minerais e fases deletérias à RAA, estado microfissural e alteração em rochas, no caso de minerais. No caso do concreto, além do descrito para os agregados constituintes, também está o da formação do gel nos poros e em torno nos minerais e a formação de microfissuras geradas por tensões internas. Seu uso é necessário e deve ser utilizado combinado com demais metodologias laboratoriais para possibilitar a conclusão do diagnóstico (HASPARYK, 1999).

Os métodos acelerados em barras de argamassa no Brasil, executados conforme a NBR 15577-4 e 5 (ABNT, 2018), e que são similares à ASTM C1260 (2014), referem-se à investigação de agregados e de cimentos, com ou sem adições suplementares, e os da mitigação de tais reações, respectivamente. Consistem na moldagem de barras de argamassas nas dimensões de (25 x 25 x 285) mm e submetê-las a uma solução de NaOH, com concentração de 1 N, na temperatura de

80 °C, com o controle da variação do comprimento por 30 dias, por meio de relógios comparadores e de barras de referência.

Na NBR 15577-6 (ABNT, 2018), está preconizado o método para a avaliação de prismas de concreto, nas dimensões de (75 x 75 x 285) mm, por meio da variação de comprimento. Nela, está considerada a determinação da suscetibilidade de agregados participarem da RAA, fazendo uso de cimento padrão. O método também possibilita a investigação de estudos da mitigação, fazendo uso de materiais cimentícios que não sejam o padrão, porém, nesse caso, a duração do ensaio passa de 365 dias, para 2 anos. Os CPs não ficam saturados no decorrer do ciclo de cura, e sim, em ambiente com umidade providenciada por uma película de água de 20 mm no fundo dos recipientes que os contém, sem contato com a água, mantidos hermeticamente fechados em câmara térmica a 38 °C.

Tanto a NBR 15577 (2018) quanto pesquisadores como Thomas *et al.* (2006) e Sanchez *et al.* (2008), indicam o método dos prismas de concreto, citado anteriormente, compatível com o preconizado pela ASTM C1293 (2020), como o mais confiável para representar as condições de campo quanto a potencialidade reativa para RAA dos agregados utilizados em concreto, se comparado ao método acelerado em barras de argamassa. Neste contexto, pode-se citar também a ASTM C1778 (2020), que trata de um guia orientativo a respeito da potencialidade reativa de agregados (RAA) na produção de concreto.

Na NBR 15577-7 (ABNT, 2018), está previsto o método acelerado para os prismas de concreto. A execução do ensaio é a mesma citada para a parte 6 da norma, porém, com a diferença na temperatura de cura dos CPs, passando a ser 60 °C e, conseqüentemente, o tempo de duração reduzindo para 20 semanas.

O método acelerado de prismas foi desenvolvido depois de diversos estudos mostrarem uma boa relação entre as expansões verificadas para o método a 38 °C aos 365 e a 60 °C aos três meses. Porém, existe a recomendação na avaliação da lixiviação no desenvolvimento do ensaio, que pode aumentar ao passo que a temperatura é acrescida, podendo distorcer os resultados obtidos (THOMAS *et al.*, 2006; COUTO, 2008; SANCHEZ *et al.*, 2010; ASTM C 1293, 2020; RILEM TC 106-3, 2000).

Os ensaios citados para barras de argamassa possuem limite de expansão de 0,19% aos 30 dias, de maneira a classificar os agregados avaliados como potencialmente inócuos ou reativos. Para os métodos com prismas de concreto, o limite normativo passa a ser de 0,04% aos 365 dias (ABNT NBR 15577-1, 2018). Atualmente, limite diferenciado já vem sendo proposto para o método dos prismas, como o de 0,03% e, em especial, para agregados graníticos dada a complexidade da reação envolvida (CUSTÓDIO *et al.*, 2020).

## 2.4 ATAQUES COMBINADOS

No que diz respeito a reações químicas expansivas, esse item destaca os ataques conjugados possíveis de ocorrer envolvendo a RAA e a *DEF*.

Conforme apresentado nos itens anteriores, relacionando a formação da RAA e da *DEF*, a umidade é um fator comum, favorecendo seu ataque combinado (HASPARYK, 2005; MELO, 2010; GODART, 2017).

Segundo Melo (2010) e Hasparyk e Kuperman (2019), a ocorrência conjugada de *DEF* e RAA, pode ser, em parte, explicada pela redução do pH do concreto para facilitar a formação da etringita ao invés do monossulfato, fato que pode ser propiciado pela lixiviação em ambientes com alta umidade ou pela RAA, também, por esta última reação ser acelerada em altas temperaturas, fator preponderante para a formação da *DEF*.

O ataque combinado é verificado em diversas estruturas de concreto, muitas vezes àquelas em contato com água, como no caso de barragens. Tal fato, foi apresentado por Hasparyk e Kuperman (2019), conforme investigação realizada em obra brasileira com mais de 50 anos, que apresentava fissuras generalizadas em alguns elementos estruturais, inclusive dificultando a operação de equipamentos como as comportas. O ataque combinado foi evidenciado pela análise de testemunhos de concreto, submetidos às análises petrográficas. Na FIGURA 2.15 está mostrado um dos elementos atacados no Brasil e na FIGURA 2.16 um caso similar, porém em barragem localizada em Portugal.

FIGURA 2.15 – Fissuras por ataque combinado – DEF e RAA – Brasil.



FONTE: Hasparyk e Kuperman (2019).

FIGURA 2.16 – Fissuras por ataque combinado – DEF e RAA – Portugal.



FONTE: Fernandes *et al.* (2008) *apud* Hasparyk e Kuperman (2019).

Blanco *et al.* (2019), em estudo referente às manifestações patológicas em barragens, citaram casos onde foram constatadas evidências de degradação devido às reações químicas expansivas no interior do concreto. A seguir serão retratados dois dos casos onde foram diagnosticados ataques combinados.

O primeiro caso chama a atenção pela presença de deslocamentos horizontais de 249 mm e verticais de 115 mm na crista da barragem, que possui 28,5 m de altura total. Após inspeções de campo e investigações laboratoriais, os autores concluíram que se trata de um ataque combinado por ISA e RAA, sendo o ISA originado inicialmente e posteriormente a reação entre os agregados e álcalis do cimento. Tal constatação foi possível pela identificação microscópica de gel depositado sobre a formação da etringita nos poros e pasta do concreto. Neste caso, foi atribuída à oxidação dos sulfetos de ferro dos agregados utilizados, como principal contribuição para os íons sulfato disponíveis na solução dos poros. Na FIGURA 2.17 e na FIGURA 2.18 tem-se mostrados exemplos na barragem citada.

FIGURA 2.17 – Vista geral à jusante da barragem – indícios de produtos neoformados.



FONTE: Blanco *et al.* (2019).

FIGURA 2.18 – Fissuras por ataque combinado – Galeria da barragem.



FONTE: Blanco *et al.* (2019).

Outra barragem apresentada por Blanco *et al.* (2019), mostrou evidências do ataque combinado (*DEF* e *RAA*), gerando fissuras tipo mapa e falhas estruturais. Após as inspeções em campo, análise laboratorial em testemunhos de concreto, quanto às características mecânicas e microestruturais, foi constatada a ação conjunta entre etringita tardia e reação álcali-silica. Pelo levantamento histórico da construção e simulações térmicas realizadas, estima-se o calor de hidratação gerado no concreto acima de 70 °C. Na FIGURA 2.19 estão demonstradas fissuras horizontais no vertedouro e na FIGURA 2.20, fissuras tipo “mapa” nas paredes dos diques.

FIGURA 2.19 – Vista geral à jusante – Fissuras horizontais no vertedouro.



FONTE: Blanco *et al.* (2019).

FIGURA 2.20 – Fissuras observadas nas paredes dos diques da barragem.



FONTE: Blanco *et al.* (2019).

Hasparyk e Kuperman (2019), relataram outro caso ocorrido no Brasil envolvendo ataque combinado por *RAA* e *DEF*, desta vez não atribuído às estruturas

de barragens, mas sim a um bloco de fundação (edificações). O elemento estrutural apresentava fissuras com aberturas médias de 5 mm. Pelas investigações realizadas, verificou-se que o agregado utilizado era potencialmente reativo para RAA e estimativas baseadas no consumo de cimento, condições de aplicação e volume de concreto, levaram a concluir que a temperatura máxima experimentada pelo bloco foi da ordem de 80 °C. Na FIGURA 2.21 está mostrado o bloco avaliado.

FIGURA 2.21 – Fissuras em bloco de fundação – DEF e RAA.



FONTE: Hasparyk e Kuperman (2019).

Lu *et al.* (2016), realizaram estudo em elemento de concreto pré-moldado e pré tensionado na China, após quatro anos de sua construção. Tal estrutura apresentava fissuras tipo mapa e indícios de reações expansivas. Após a extração de testemunhos de concreto, investigações por meio de petrografia dos agregados, análise microscópica da pasta e a determinação das fases por DRX, foram evidenciados agregados microfraturados, gel de RAA e a presença de produtos neoformados decorrentes de DEF. O ataque conjugado foi possibilitado, segundo os autores, pelo uso de agregados graúdos e miúdos classificados como potencialmente reativos, alto consumo de cimento e utilização de cura térmica superior a 65 °C.

Em seus estudos, Diamond e Ong (1994) constataram que as argamassas curadas a vapor e, posteriormente, armazenadas em ambiente úmido, induziram a ocorrência de RAA quando utilizados agregados reativos. Também, foram identificadas evidências de DEF nas amostras, sendo em um período de seis meses de estudo, encontrada em porcentagem acima de 50% em relação aos corpos de prova submetidos aos mesmos processos de cura, porém, utilizando agregados potencialmente inócuos para a RAA. Os autores atribuíram tal ocorrência à facilidade de formação da DEF em microfissuras ocasionadas, inicialmente, pela RAA.

O fato anterior foi reforçado por Diamond (1996), citando que a formação de *DEF* foi favorecida pela existência de fissuras prévias no concreto, induzidas por vários fatores, como a RAA, o congelamento ou a retração.

As duas reações expansivas, *DEF* e RAA, podem ser relacionadas principalmente por sua afinidade. Em um meio com alto teor em álcalis a etringita primária tende a ficar instável, formando o monossulfato e os aluminatos hidratados conforme apresentado anteriormente neste trabalho. Quando a RAA ocorre, consumindo os hidróxidos alcalinos, a alcalinidade reduz, favorecendo a formação da etringita secundária (HASPARYK e KUPERMAN, 2019).

Owsiak (2008) realizou estudos com argamassas dosadas com aglomerante possuindo 4% de  $SO_3$  em sua composição, e que foram curadas a 90 °C, por um período de 12 h. As misturas variaram em relação ao teor de álcalis disponíveis de 0,77 a 1,63% ( $Na_2O_{eq}$ ). Na pesquisa, foi utilizada areia de quartzo (referência não reativa) e misturas com a substituição de parte da areia por mineral reativo (opala), onde foi observado que os resultados desta última combinação mostraram a RAA como a principal reação de deterioração das amostras, estando a *DEF* em segundo lugar, porém, também contribuindo para a expansão.

Martin, Sanchez (2011), preocupados com as ocorrências deletérias em estruturas de concreto atacadas, principalmente, por *DEF* e RAA, estudaram métodos alternativos de laboratório para a sua identificação, mostrando-se promissores o teste de dano de rigidez (SDT – Stiffness Damage Test) e o índice de avaliação de danos (DRI – Damage Rating Index), além do ensaio de expansão residual. O SDT está baseado na aplicação de cargas cíclicas de compressão em CPs, onde os carregamentos são impostos, geralmente, até 40% da carga estimada para a ruptura; os dados de saída são o índice de dano (SDI) e o índice de deformação plástica (PDI), que são calculados a partir da área de histerese originada nos carregamentos e descarregamentos, relacionada à energia dissipada durante o ciclo inicial e a deformação plástica final. Já, o DRI trata-se de uma análise microscópica semi-quantitativa, que a partir da aplicação de pesos dados pelas análises de danos podem ser correlacionados com o grau de expansão do concreto.

Para o desenvolvimento dos estudos, envolvendo *DEF* e RAA, Martin; Sanchez (2011) moldaram em laboratório vigas de concreto nas dimensões de (0,25 x 0,50 x

3,00) m, utilizando agregados potencialmente reativos para RAA e curando os elementos a 80 °C por três dias. Posteriormente, as manteve em cura úmida a 38 °C, com a face inferior imersa em água e, a superior, com umidade relativa controlada de 30%. Como resultados, observaram depois de 6 meses, variações dos parâmetros analisados em função das expansões devidas à *DEF* e à RAA, sendo estas condizentes com o observado pelos métodos empregados SDT e DRI.

No Brasil, Schovanz (2019), que aplicou mais recentemente o ensaio SDT para a *DEF*, mostrou que os seus resultados indicaram boa relação com as expansões ocorridas pelo ataque químico ao longo do tempo. Fato que pode ser atribuído à sensibilidade do método frente a fragilização do concreto em decorrência da *DEF*. Como resultados, utilizando CP V ARI, o SDI variou de 0,40, aos 28 dias, para 1,86, aos 252 dias, e o índice de deformação plástica, PDI, foi de 0,01 a 0,27, respectivamente, pelos quais a autora inferiu maior efeito *DEF* e RAA para este tipo de cimento na dosagem. Já, para o cimento CP IV, a variação nas mesmas datas foi de 0,27 para 0,24, no SDI e de 0,06 a 0,01, no PDI, ou seja, mostrando haver uma possível menor degradação com este tipo de cimento, no mesmo período.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO

A revisão bibliográfica realizada serviu para o melhor entendimento a respeito das reações químicas expansivas que ocorrem nos mais diversos tipos de estruturas de concreto, desde peças pré-fabricadas às barragens e elementos de concreto de usinas hidrelétricas.

Em especial, o estudo da *DEF* e o seu ataque conjugado com a RAA que motivaram a elaboração desta pesquisa, por ainda não existirem muitos estudos a seu respeito e, principalmente, pela necessidade do desenvolvimento de tecnologias que possam ajudar a entender os mecanismos das reações e contribuir para um futuro método de análise laboratorial que favoreça às ações preventivas e até mitigatórias para as patologias citadas.

Com relação ao levantamento bibliográfico realizado envolvendo a *DEF*, pode-se destacar a maior agressividade e o curto prazo em que ocorrem as suas manifestações patológicas e prejuízos às estruturas de concreto, quando comparadas com a RAA, reação já bem difundida e estudada pelo meio técnico.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental teve como objetivo investigar a suscetibilidade de concretos e das argamassas, dosados em laboratório, com dois tipos de cimentos Portland, CP V e CP IV, além de dois tipos de agregados graúdos, um potencialmente reativo e outro potencialmente inócuo para RAA, frente aos ataques individuais e mistos de DEF e RAA ao longo do tempo.

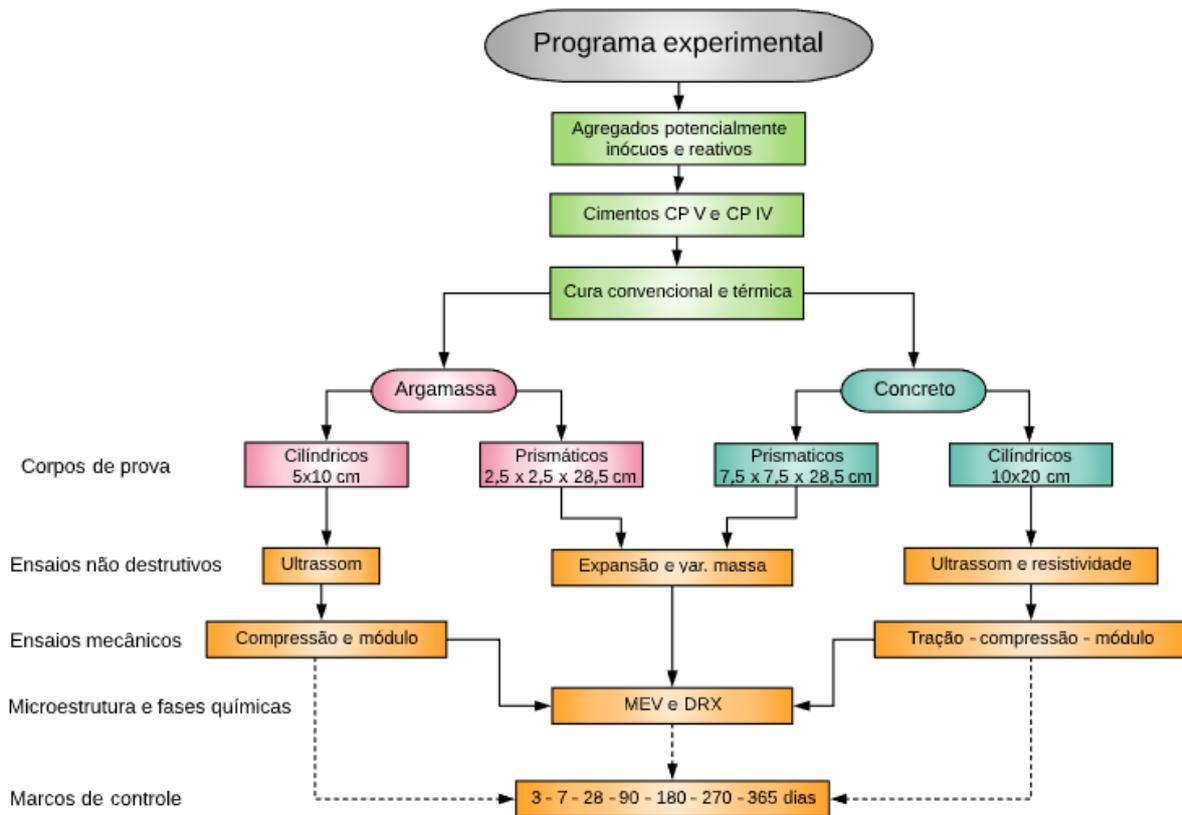
Para o desenvolvimento do programa, foi selecionado um agregado miúdo proveniente de cava natural, potencialmente inócuo, e foram moldados CPs cilíndricos para a avaliação das propriedades mecânicas, nas dimensões de (5 x 10) cm para as argamassas e (10 x 20) cm para os concretos, além de prismas para a avaliação dos processos de expansão e variação de massa ao longo do tempo, nas dimensões de (2,5 x 2,5 x 28,5) cm e de (7,5 x 7,5 x 28,5) cm, respectivamente.

De maneira a atingir os objetivos deste estudo, foram idealizados dois tipos de cura para os CPs cilíndricos e prismáticos, identificados como “cura convencional” e “cura térmica”. Tais procedimentos estão apresentados em detalhes na sequência deste capítulo.

De maneira geral, as argamassas e concretos moldados no laboratório foram submetidos nas idades de controle (de 3 a 365 dias) à avaliação do potencial de expansão e de variação de massa, desempenho em relação aos ensaios não-destrutivos, END, como ultrassom e resistividade, e destrutivos, pela determinação das características mecânicas à compressão, tração indireta e módulo de elasticidade, além das investigações microscópicas por MEV/EDS e das fases químicas por DRX, com foco na incidência de produtos neoformados decorrentes dos ataques patológicos.

No FLUXOGRAMA 3.1, está apresentado, de maneira esquemática, o programa experimental desenvolvido neste trabalho.

FLUXOGRAMA 3.1 – Programa Experimental.



Fonte: O autor (2020).

Na TABELA 3.1 e na TABELA 3.2 estão representados por idade de controle, os tipos de ensaio/avaliações para uma condição (referência, RAA, DEF e RAA + DEF). As rotinas de ensaios foram multiplicadas por 8 no desenvolvimento desta pesquisa para cada material, conforme registrado na TABELA 3.3, sendo realizadas para a argamassa e o concreto, totalizando 224 CPs cilíndricos de concreto, 192 de argamassa, e mais 24 prismas de cada compósito.

No item ensaios e análises deste capítulo, estão apresentadas as quantidades de exemplares por avaliação executada.

TABELA 3.1 – Idades por ensaios/avaliações nos concretos.

| <b>CORPOS DE PROVA DE CONCRETO</b> |   |                     |          |           |           |            |            |            |
|------------------------------------|---|---------------------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>Avaliações</b>                  | <b>Ensaio e análises</b>                    | <b>Idade (dias)</b> |          |           |           |            |            |            |
|                                    |   | <b>3</b>            | <b>7</b> | <b>28</b> | <b>90</b> | <b>180</b> | <b>270</b> | <b>365</b> |
| Não destrutivas                    | Ultrassom                                   | x                   | x        | x         | x         | x          | x          | x          |
|                                    | Resistividade                               | x                   | x        | x         | x         | x          | x          | x          |
| Mecânicas                          | Resistência à compressão                    | x                   | x        | x         | x         | x          | x          | x          |
|                                    | Resistência à tração indireta               |                     |          | x         | x         |            | x          |            |
|                                    | Módulo de elasticidade                      | x                   | x        | x         | x         | x          | x          | x          |
| Microestruturais                   | Microscopia Eletrônica de Varredura MEV/EDS |                     |          | x         | x         | x          | x          | x          |
|                                    | Difração de Raios X                         |                     |          | x         | x         | x          | x          | x          |
| Prismas*                           | Expansão e variação de massa                | x                   | x        | x         | x         | x          | x          | x          |

\* Para as avaliações nos prismas, foram realizadas leituras intermediárias, sendo uma vez a cada 15 dias nos 3 primeiros meses e uma vez ao mês nos subsequentes.

FONTE: O autor (2020).

TABELA 3.2 – Idades por ensaios/avaliações nas argamassas.

| <b>CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA</b> |   |                     |          |           |           |            |            |            |
|-------------------------------------|---|---------------------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>Avaliações</b>                   | <b>Ensaio e análises</b>                    | <b>Idade (dias)</b> |          |           |           |            |            |            |
|                                     |   | <b>3</b>            | <b>7</b> | <b>28</b> | <b>90</b> | <b>180</b> | <b>270</b> | <b>365</b> |
| Não destrutivas                     | Ultrassom                                   | x                   |          | x         | x         | x          | x          | x          |
| Mecânicas                           | Resistência à compressão                    | x                   |          | x         | x         | x          | x          | x          |
|                                     | Módulo de elasticidade                      | x                   |          | x         | x         | x          | x          | x          |
| Microestruturais                    | Microscopia Eletrônica de Varredura MEV/EDS |                     |          | x         | x         | x          | x          | x          |
|                                     | Difração de Raios X                         |                     |          | x         | x         | x          | x          | x          |
| Prismas*                            | Expansão e variação de massa                | x                   | x        | x         | x         | x          | x          | x          |

\* Para as avaliações nos prismas, foram realizadas leituras intermediárias, sendo duas vezes por semana no primeiro mês, uma vez por semana no segundo mês e 1 vez a cada 15 dias nos meses subsequentes.

FONTE: O autor (2020).

TABELA 3.3 – Combinações utilizadas nas dosagens – Concreto e Argamassa.

| <b>Nº</b> | <b>Combinações</b> | <b>Cimento</b> | <b>Agregado graúdo</b> | <b>Tipo de cura</b> |
|-----------|--------------------|----------------|------------------------|---------------------|
| 1         | <b>Referência</b>  | CP V           | Potencialmente inócuo  | Convencional        |
| 2         |                    | CP IV          |                        |                     |
| 3         | <b>RAA isolada</b> | CP V           | Potencialmente reativo | Convencional        |
| 4         |                    | CP IV          |                        |                     |
| 5         | <b>DEF isolada</b> | CP V           | Potencialmente inócuo  | Térmica             |
| 6         |                    | CP IV          |                        |                     |
| 7         | <b>RAA + DEF</b>   | CP V           | Potencialmente reativo | Térmica             |
| 8         |                    | CP IV          |                        |                     |

FONTE: O autor (2020).

A seguir, estão apresentados os detalhes referentes ao estudo, como a caracterização físico-química dos insumos utilizados, dosagem, caracterização mecânica e avaliação visual das amostras de concreto e argamassa ao longo do tempo.

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram cuidadosamente selecionados com base em suas características físicas e, principalmente, químicas, conforme apresentados a seguir:

- a) Agregado graúdo granítico, brita 9,5/25,0 mm, procedente da região de Recife/PE, potencialmente inócuo para RAA;
- b) Agregado graúdo granítico, procedente da região de Recife/PE, potencialmente reativo para RAA;
- c) Agregado miúdo, areia natural média, procedente do município de Cristalina/GO, potencialmente inócuo para RAA;
- d) Cimento Portland CP V-ARI;
- e) Cimento Portland CP IV-32;
- f) Água para amassamento proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Curitiba/PR;
- g) Aditivo polifuncional modificador de viscosidade.

Na escolha dos agregados e dos aglomerantes foi considerada a potencialidade, devido principalmente às suas características químicas, em proporcionar as reações expansivas relacionadas à *DEF* e à RAA.

#### 3.1.1 Cimentos

Na escolha dos aglomerantes utilizados na pesquisa, foram consideradas como premissas básicas, o emprego de:

- Um cimento Portland tipo CP V-ARI, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), como de alta resistência inicial, constituído de 90 a 100% de clínquer mais sulfatos de cálcio, isentos de adições pozolânicas ou escória de alto forno;
- Um cimento Portland pozolânico, tipo CP IV-32 RS, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), constituído de 45 a 85% de clínquer, mais sulfatos de cálcio, isentos de escória de alto forno e possuindo adições pozolânicas de 15 a 50% em sua composição. Tal aglomerante foi utilizado para avaliar as

possíveis mitigações das reações expansivas estudadas e possuía em sua composição aproximadamente 26 % de cinza volante.

- Um cimento com o maior calor de hidratação possível, fator observado para o CP V-ARI, preferencialmente, acima de 270 J/g, em 41 h, conforme citado na NBR 16697 (ABNT, 2018), sendo este o limite para os aglomerantes classificados como de baixo calor de hidratação. Com esta característica, estimou-se haver um favorecimento do aumento da temperatura nas misturas, durante o período de pega do concreto, de modo a propiciar a *DEF*, conforme foi detalhado na revisão bibliográfica desta pesquisa;
- Uma relação entre as porcentagens de sulfato e de alumínio ( $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o teor de sulfatos total, pelo menos para o CP V, superior a 0,5 e 3%, respectivamente. Característica citada por Taylor (2001), como sendo favorável para a formação da *DEF*;
- Dois tipos de cimentos produzidos pelo mesmo fabricante, para que o clínquer utilizado fosse de mesma origem e facilitasse a comparação.

Na TABELA 3.4, estão apresentados os resultados obtidos para a caracterização mecânica à compressão do cimento CP V-ARI e do CP IV-32 utilizados nesta pesquisa, incluindo os requisitos mínimos normativos para as idades de controle.

TABELA 3.4 – Resultados da caracterização mecânica dos cimentos.

| Caracterização mecânica                                 |              | Tipos de Cimento Portland |            |           |            |
|---|--------------|---------------------------|------------|-----------|------------|
|   |              | CP V-ARI                  |            | CP IV-32  |            |
|   | Idade (dias) | Resultado                 | Requisito* | Resultado | Requisito* |
| Resistência à compressão<br>ABNT NBR 7215:2019<br>(MPa) | 1            | 27,2                      | ≥ 14,0     | -         | -          |
|   | 3            | 32,2                      | ≥ 24,0     | 24,9      | ≥ 10,0     |
|   | 7            | 40,5                      | ≥ 34,0     | 28,1      | ≥ 20,0     |
|   | 28           | -                         | -          | 41,6      | ≥ 32,0     |

\* Requisitos estipulados pela ABNT NBR 16697:2018

FONTE: O autor (2020).

Na TABELA 3.5, estão apresentados os resultados obtidos para a caracterização física dos cimentos, incluindo requisitos mínimos normativos quando aplicável.

TABELA 3.5 – Resultados da caracterização física dos cimentos.

| Caracterização física |                    | Tipos de Cimento Portland |            |           |            |
|-----------------------|--------------------|---------------------------|------------|-----------|------------|
|                       |                    | CP V-ARI                  |            | CP IV-32  |            |
| Parâmetros            |                    | Resultado                 | Requisito* | Resultado | Requisito* |
| Massa específica      | g/cm <sup>3</sup>  | 3,08                      | -          | 2,82      | -          |
| Expansão à quente     | mm                 | 0,00                      | ≤ 5,00     | 0,00      | ≤ 5,00     |
| Tempo início de pega  | h:min              | 03:20                     | ≥ 1,00     | 04:20     | ≥ 1,00     |
| Tempo fim de pega     | h:min              | 05:25                     | ≤ 10,00    | 05:40     | ≤ 12,00    |
| Consistência normal   | %                  | 29,90                     | -          | 31,20     | -          |
| Finura Blaine         | cm <sup>2</sup> /g | 4.720                     | ≥ 3.000    | 4.280     | -          |
| Resíduo peneira # 200 | %                  | 0,00                      | ≤ 6,00     | 0,50      | ≤ 8,00     |
| Resíduo peneira # 325 | %                  | 0,30                      | -          | 2,80      | -          |

\* Requisitos estipulados pela ABNT NBR 16697:2018

FONTE: O autor (2020).

Na TABELA 3.6, estão apresentados os resultados obtidos para a caracterização química dos cimentos, incluindo, além dos requisitos mínimos normativos, quando aplicável, a relação entre o teor de sulfato e de alumínio e o valor obtido para o equivalente alcalino para cada aglomerante.

TABELA 3.6 – Caracterização química dos cimentos.

| Caracterização química  |            | Tipos de Cimento Portland |            |           |            |
|---|------------|---------------------------|------------|-----------|------------|
|   |            | CP V-ARI                  |            | CP IV-32  |            |
| Parâmetros  |            | Resultado                 | Requisito* | Resultado | Requisito* |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | %          | 4,50                      | -          | 8,40      | -          |
| SiO <sub>2</sub>  | %          | 19,10                     | -          | 27,00     | -          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | %          | 2,90                      | -          | 3,50      | -          |
| CaO   | %          | 61,30                     | -          | 48,20     | -          |
| MgO   | %          | 2,80                      | ≤ 6,50     | 2,50      | ≤ 6,50     |
| SO <sub>3</sub>   | %          | 3,50                      | ≤ 4,50     | 2,50      | ≤ 4,00     |
| K <sub>2</sub> O  | %          | 0,70                      | -          | 1,10      | -          |
| Na <sub>2</sub> O   | %          | 0,20                      | -          | 0,30      | -          |
| Perda ao fogo   | %          | 4,03                      | ≤ 4,50     | 3,60      | ≤ 4,50     |
| CaO livre   | %          | 0,79                      | -          | 0,67      | -          |
| Resíduo insolúvel   | %          | 0,98                      | ≤ 1,00     | 26,07     | -          |
| SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                             | -          | 0,78                      | -          | 0,30      | -          |
| Na <sub>2</sub> O <sub>eq.</sub> = 0,658.K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O | %          | 0,66                      | -          | 1,02      | -          |
| Calor de hidratação**   | J/g (41 h) | 376,3                     | -          | 271,6     | -          |

\* Requisitos estipulados pela ABNT NBR 16697:2018

\* \*A ABNT NBR 16697:2018 classifica cimentos de baixo calor de hidratação com resultados menores que 270 J/g em 41 horas

FONTE: O autor (2020).

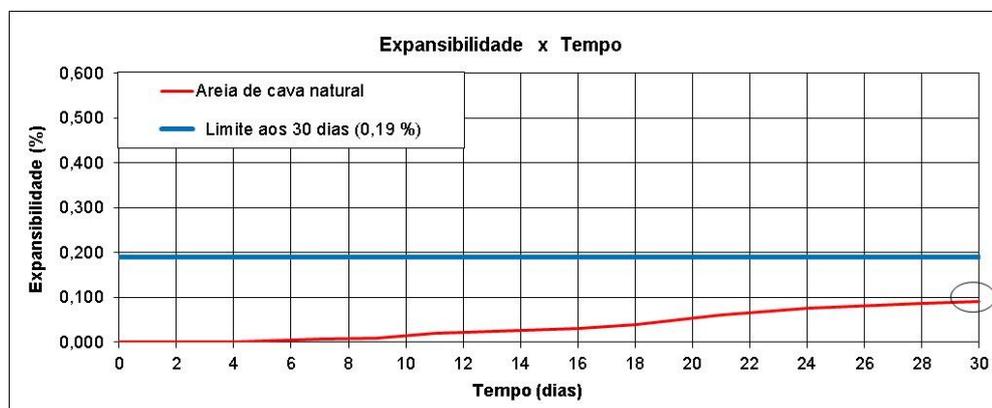
Com base no referencial teórico levantado e a caracterização física e química dos cimentos, foi possível verificar que ambos poderiam ser utilizados no desenvolvimento da pesquisa, pois estes (CP V e CP IV) atenderam aos requisitos mínimos estipulados na NBR 16697 (ABNT, 2018) e, principalmente, pelas características químicas do CP V, com alto calor de hidratação, relação ( $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) superior a 0,5 (0,78) e teor de sulfato superior a 3% (3,5%).

### 3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a confecção dos traços de argamassa e concreto foi originário da região de Cristalina/GO. Trata-se de uma areia de cava natural, composta, principalmente, por quartzo em fragmentos isolados, de tamanhos irregulares e variados, preponderantemente, nas frações médias a grossas, com baixo ângulo de extinção ondulante, provavelmente obtida a partir da britagem de cascalho aluvionar, conforme descrição petrográfica apresentada no APÊNDICE A.

A areia tem as características de areia média e, principalmente, é potencialmente inócua para a RAA. Dessa forma, foi realizada a avaliação, seguindo a metodologia da NBR 15577-4 (ABNT, 2018) para a obtenção da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, curadas em um banho de NaOH (1 N) a 80 °C, obtendo-se o resultado médio de 0,09%, aos 30 dias. O limite definido para a classificação do agregado como potencialmente inócuo é de 0,19% na data de controle (ABNT NBR 15577-1, 2018). O resultado do ensaio está ilustrado na FIGURA 3.1. No APÊNDICE B, estão apresentados os resultados tabelados de expansão ao longo do período de ensaio.

FIGURA 3.1 – Expansão ao longo de 30 dias – Areia natural.



FONTE: Furnas (2019).

A areia possui módulo de finura de 2,72 e dimensão máxima característica ( $D_{máx}$ ) de 4,8 mm, conforme os resultados apresentados no APÊNDICE C. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), um módulo de finura entre 2,20 e 2,90 representa uma classificação para o agregado miúdo na faixa identificada como zona ótima para a utilização na produção de concretos. Além da composição granulométrica, foram realizadas a determinação da absorção de água, massa específica, teor de material pulverulento e teor de argila em torrões (ABNT NBR NM 30, 2001; ABNT NBR NM 52, 2009; ABNT NBR NM 46, 2003 e ABNT NBR 7218, 2010).

### 3.1.3 Agregados graúdos

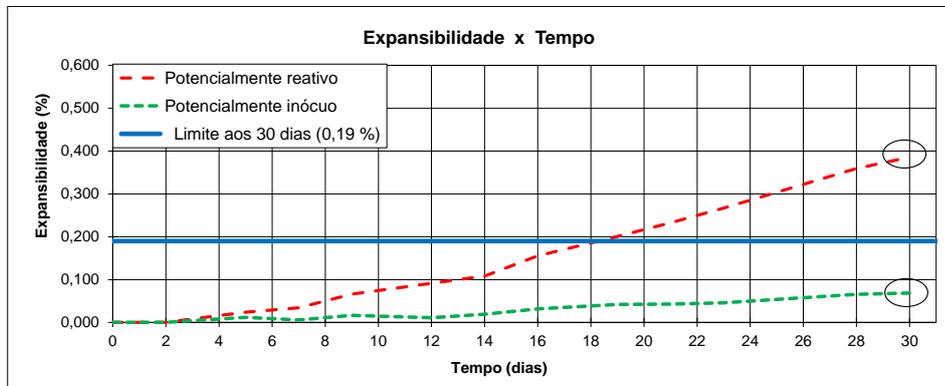
Para o desenvolvimento do estudo, foram selecionados dois tipos de agregado graúdo com  $D_{máx}$  de 25 mm. Um dos agregados, de origem granítica e coloração cinza clara a rosada, é constituído por feldspato alcalino, quartzo, plagioclásio e biotita, sendo classificado como rocha pouco alterada e inócua para RAA, conforme apreciação petrográfica (APÊNDICE D). Segundo o ensaio acelerado em barras de argamassa (NBR 15577-4, 2018), o agregado apresentou expansão média de 0,07%, aos 30 dias. Os resultados individuais desse ensaio estão apresentados no APÊNDICE F.

O outro agregado graúdo utilizado na pesquisa também é de origem granítica, e originário da região de Recife/PE. Possui coloração cinza clara, estrutura maciça e é constituído principalmente por feldspato alcalino envolto por uma matriz muito fina de quartzo. Esse agregado foi classificado como potencialmente reativo para RAA por apresentar teor superior a 5% de quartzo deformado e mais de 15% de quartzo microgranular, conforme petrografia (APÊNDICE E) além de elevadas expansões no ensaio acelerado (0,39%), conforme a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), suplantando o limite de 0,19% (FIGURA 3.2 e APÊNDICE F).

As caracterizações físicas para o agregado classificado como potencialmente inócua demonstraram um  $D_{máx}$  de 19,0 mm e módulo de finura de 6,32. Já, para o potencialmente reativo, os resultados obtidos foram DMC de 19,0 mm e um módulo de 6,60 (ver APÊNDICES H e I). Além da classificação granulométrica, foram executadas as seguintes determinações com os agregados graúdos: massa específica e absorção de água; teor de material pulverulento, índice de forma e de

abrasão Los Angeles (ABNT NBR NM 53, 2009; ABNT NBR NM 46, 2003; ABNT NBR 7809, 2019; ABNT NBR NM 51, 2001).

FIGURA 3.2 – Resultados do ensaio de expansão, ao longo de 30 dias, dos agregados estudados.



FORNTE: Lactec (2019).

#### 3.1.4 Água para amassamento

A água para amassamento utilizada nas misturas das argamassas e dos concretos foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Curitiba/PR. O pH da água utilizada foi 7,0.

#### 3.1.5 Aditivo químico

Para a manutenção da trabalhabilidade requerida tanto para os traços de argamassa como do concreto elaborados em laboratório, nesta pesquisa, utilizou-se um aditivo químico, polifuncional modificador de viscosidade, à base de policarboxilato. Esse produto possibilita elevada redução de água sem alteração dos tempos de pega do concreto. Os ensaios para a caracterização do aditivo químico seguiram as diretrizes da NBR 10908 (ABNT, 2008) e o resultados estão apresentados na TABELA 3.7.

TABELA 3.7 – Caracterização do aditivo químico.

| Caracterização do aditivo      | Resultados |
|--------------------------------|------------|
| pH                             | 5,41       |
| Teor de sólidos (%)            | 43,97      |
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,187      |

FORNTE: Furnas (2019).

### 3.2 DOSAGEM

Para a definição das características dos traços utilizados nesta pesquisa, como consumo de cimento por metro cúbico e relação água/cimento, tomou-se como base os trabalhos de Melo (2010) e Schovanz (2019). Assim, foram dosados traços de concreto em laboratório, conforme apresentado na TABELA 3.8, com as mesmas características entre si, onde foram fixados os consumos de cimento e agregados por m<sup>3</sup>, relação água/cimento, teor de argamassa e porcentagem de aditivo químico plastificante, variando-se somente o módulo de finura das misturas.

TABELA 3.8 – Características dos concretos.

| Propriedades                              | Tipos de agregado graúdo |                        |
|---|--------------------------|------------------------|
|   | Potencialmente inócuo    | Potencialmente reativo |
| Cimento (kg/m <sup>3</sup> )              | 471                      | 471                    |
| Tipo de cimento                           | CP V e CP IV             | CP V e CP IV           |
| Água (Kg/m <sup>3</sup> )                 | 217                      | 217                    |
| Água/Cimento                              | 0,46                     | 0,46                   |
| Areia natural lavada (Kg/m <sup>3</sup> ) | 754                      | 754                    |
| Agregado Graúdo (kg/m <sup>3</sup> )      | 838                      | 838                    |
| Aditivo plastificante (%)                 | 0,14                     | 0,14                   |
| Abatimento (mm)                           | 200 ± 20                 | 200 ± 20               |
| % de areia natural                        | 47,9                     | 47,9                   |
| Teor de argamassa (%)                     | 59,4                     | 59,4                   |
| Teor de ar incorporado (%)                | 1,3                      | 1,3                    |
| Traço unitário                            | 1 : 1,6 : 1,8 : 0,46     | 1 : 1,6 : 1,8 : 0,46   |
| Materiais secos "m"                       | 3,38                     | 3,38                   |
| Módulo de finura da mistura               | 4,639                    | 4,785                  |

FONTE: Lactec (2019).

As variações consideradas no estudo referem-se à utilização de dois tipos de cimento (CP V e CP IV) e dois tipos de agregados graúdos, um potencialmente inócuo e outro potencialmente reativo para RAA. Como as características físicas dos agregados graúdos foram similares e o agregado miúdo, também potencialmente inócuo, foi o mesmo em todas as combinações, a trabalhabilidade de todas as misturas se manteve na faixa de (200 ± 20) mm, determinada conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Com a intenção de comparar as suas propriedades, os traços de argamassa desenvolvidos foram obtidos tomando como base os traços de concreto. A diferença entre eles está basicamente no processo de britagem dos agregados graúdos, em britador de mandíbulas, utilizando o material passante na peneira com abertura de malha de 4,75 mm para a obtenção de uma segunda areia, (além da areia de cava natural), no caso das argamassas.

Para a obtenção de misturas trabalháveis, foi aumentado o teor de aditivo plastificante em relação ao concreto, obtendo-se abatimentos “flow table” na faixa de  $(210 \pm 20)$  mm, resultados para o índice de consistência, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). As características dos traços de argamassa estão apresentadas na TABELA 3.9.

TABELA 3.9 – Resultados e características das dosagens das argamassas.

| Propriedades                                 | Tipos de agregado graúdo britado |                        |
|--|----------------------------------|------------------------|
|  | Potencialmente inócuo            | Potencialmente reativo |
| Cimento (kg/m <sup>3</sup> )                 | 471                              | 471                    |
| Tipo de cimento                              | CP V e CP IV                     | CP V e CP IV           |
| Água (Kg/m <sup>3</sup> )                    | 217                              | 217                    |
| Água/Cimento                                 | 0,46                             | 0,46                   |
| Areia natural lavada (Kg/m <sup>3</sup> )    | 754                              | 754                    |
| Agregado Graúdo britado (kg/m <sup>3</sup> ) | 838                              | 838                    |
| Aditivo plastificante (%)                    | 0,60                             | 0,60                   |
| Abatimento (Flow Table) (mm)                 | 210 ± 20                         | 210 ± 20               |
| % de areia natural                           | 47,9                             | 47,9                   |
| % de areia de britagem                       | 52,1                             | 52,1                   |
| Traço unitário                               | 1 : 1,6 : 1,8 : 0,46             | 1 : 1,6 : 1,8 : 0,46   |
| Materiais secos "m"                          | 3,38                             | 3,38                   |
| Módulo de finura da mistura                  | 2,800                            | 2,805                  |

FONTE: Lactec (2019).

Uma vez definidos os traços, as misturas foram realizadas em uma sala de dosagens com temperatura e umidade controladas, uma betoneira de eixo inclinado com capacidade para 300 l e uma de 120 l para os de argamassas, além de uma balança calibrada para a determinação das massas dos insumos, com capacidade máxima de 150 kg e resolução de 100 g.

Inicialmente, para cada condição dosada, foram preparados os agregados, deixando-os na condição de saturado com superfície seca (SSS). Posteriormente, foram determinadas as umidades dos agregados (grãos e miúdo), levando-se em consideração a absorção de água para as correções necessárias antes de cada dosagem. (TABELA 3.8 e TABELA 3.9).

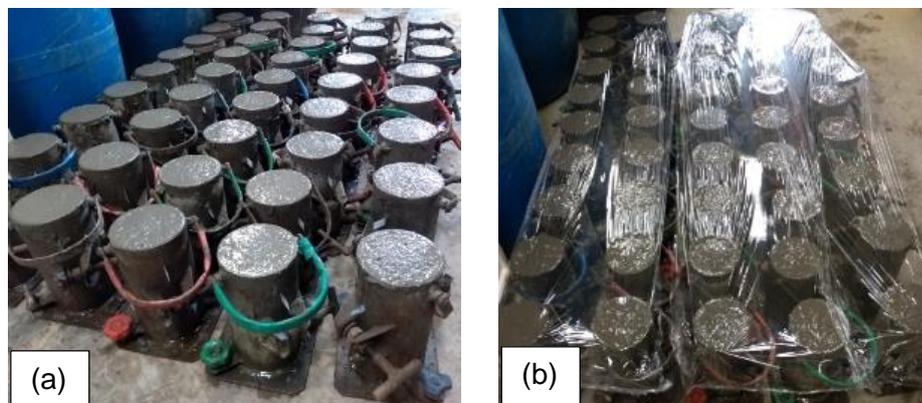
Para as moldagens dos CPs cilíndricos, foram seguidas as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015) e da NBR 7215 (ABNT, 2019), para o concreto e a argamassa, respectivamente. Já, para os CPs prismáticos, foram utilizadas a NBR 15577-6 (ABNT, 2018) e a NBR 15577-4 (ABNT, 2018). Na FIGURA 3.3 e na FIGURA 3.4, estão apresentadas algumas imagens das moldagens.

FIGURA 3.3 – Fotos ilustrativas dos momentos de dosagem dos CPs: (a) determinação do abatimento; (b) moldagem de CPs de concreto.



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 3.4 – Fotos ilustrativas dos CPs, sendo (a) após moldagem; (b) com filme plástico.



FONTE: O autor (2019).

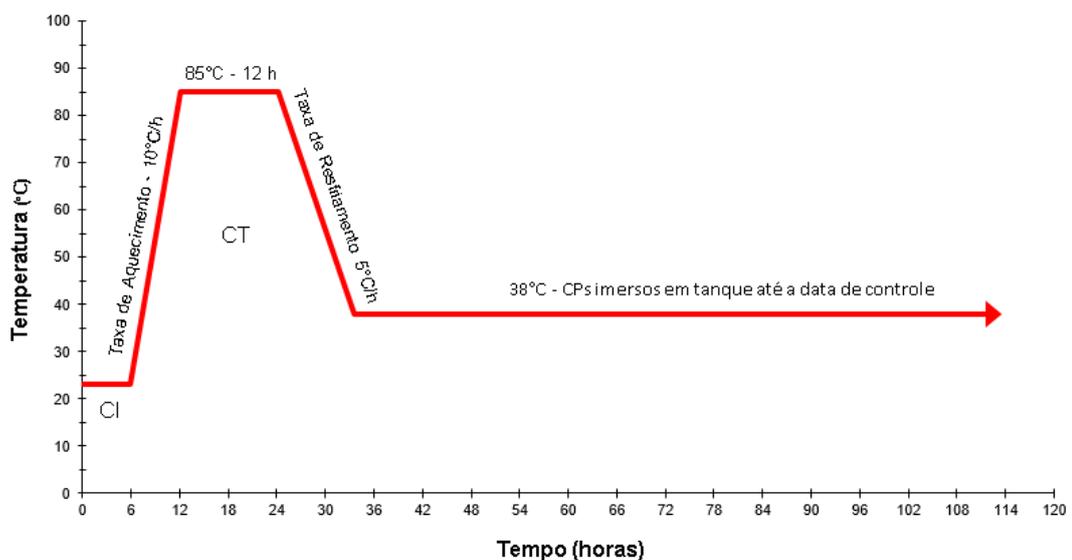
### 3.3 CURA E AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO

Foram realizados, nesta pesquisa, dois tipos de cura para os CPs cilíndricos e prismáticos de argamassas e concretos, sendo executados em CPs distintos, para a avaliação dos ataques químicos individuais e/ou combinados.

O primeiro, identificado como “cura convencional”, refere-se à permanência dos CPs após a moldagem em ambiente laboratorial, com temperatura controlada de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e umidade relativa acima de 50%, com a superfície protegida por filme plástico por 24 h. Após esse período, foram inseridos em tanques de cura com água potável a  $38 ^\circ\text{C}$ , sem a adição de hidróxido de cálcio, até as idades de controle.

O segundo tipo de cura, identificado como “cura térmica”, foi elaborado com base na literatura (KCHAKECH *et al.*, 2016; RASHIDI *et al.*, 2017; DAYARATHNE, 2013 e SCHOVANZ, 2019). Esta cura consistiu na elevação da temperatura, em ambiente controlado, dos CPs de concreto e argamassa, antes do atingimento do seu tempo de fim de pega, até um patamar especificado, permanecendo neste por um período até o resfriamento a  $38 ^\circ\text{C}$ , quando também foram armazenados em tanques com água, de maneira análoga à cura convencional citada. Estão ilustradas na FIGURA 3.5 e em tópicos, detalhadamente, as etapas referentes à cura térmica, apresentadas na sequência.

FIGURA 3.5 – Processo de cura térmica aplicada aos CPs desenvolvidos no processo de identificação de DEF e RAA.



FONTE: O autor (2020).

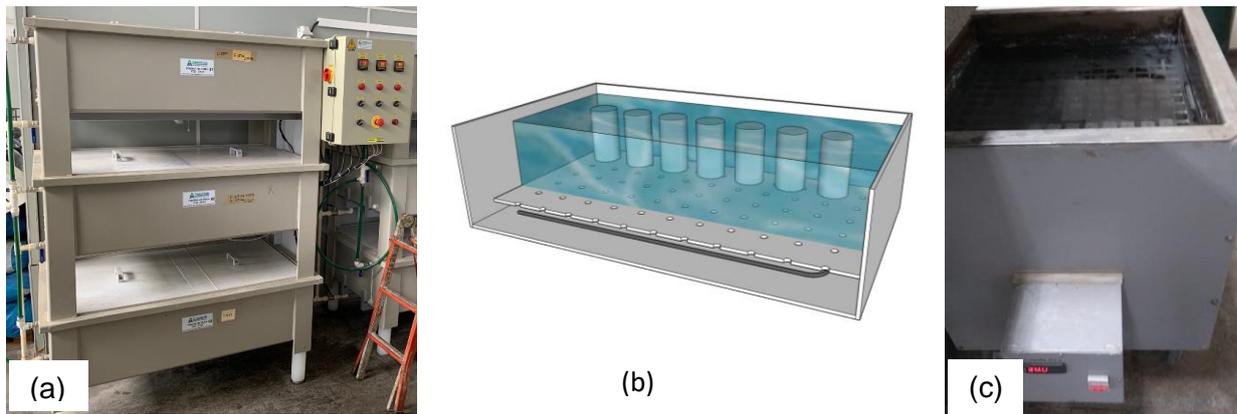
Após a moldagem, os CPs foram mantidos em ambiente laboratorial ( $23 \pm 2$ ) °C e ( $UR \geq 50\%$ ), com suas faces protegidas por plástico filme por 6 h. Esse período foi identificado como cura inicial ou pré-cura, e está representado na FIGURA 3.5 pelas letras “CI”;

- Sequencialmente, os corpos de prova foram inseridos em uma câmara climática, de envelhecimento artificial (marca ESPEC), conforme ilustrado na FIGURA 3.8. Desta maneira, a temperatura interna partiu de 23 °C a uma taxa de aquecimento de 10 °C/h, com umidade controlada de 98%, até o patamar de 85 °C;
- No interior da câmara, ainda dentro dos moldes e com a superfície protegida por plástico filme, permaneceram no patamar controlado de 85 °C e 98% de umidade relativa por 12 h;
- Depois de 12 h no patamar de temperatura, iniciou-se o seu resfriamento, a uma taxa de 5 °C/h, até a temperatura de 38 °C. O ciclo térmico completo teve duração de 27,5 h e está representado na FIGURA 3.5 pelas letras “CT”;
- Por fim, os CPs (cilíndricos e prismáticos) foram imersos em tanques com água a 38 °C, até as idades de controle.

Os prismas de concreto foram curados em recipientes hermeticamente fechados, armazenados na posição vertical e mantidos a 38 °C, conforme recomendado na NBR 15577-6 (ABNT, 2018), porém, com o ajuste no método, mantendo-os imersos em água ao invés de ambiente úmido, de forma que todos os CPs avaliados nesta pesquisa permaneceram nas mesmas condições de cura.

Na FIGURA 3.6, estão mostrados os tanques utilizados para a cura imersa dos CPs a 38 °C, além de um desenho esquemático da disposição no interior de um deles.

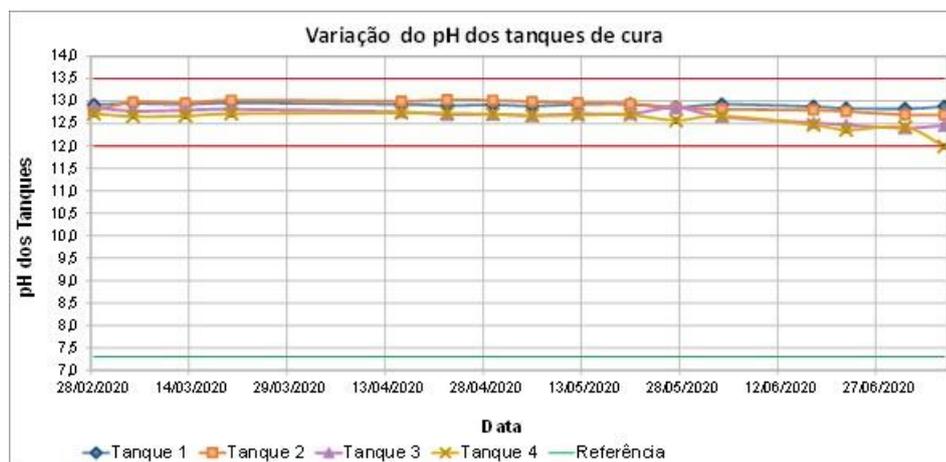
FIGURA 3.6 – Fotos ilustrativas do tanque de cura CP's de concreto (a); esquema da disposição no tanque (b); e tanque de cura para prismas de argamassa (c).



FONTE: O autor (2019).

Como a água dos tanques de cura não possuía agentes para o aumento de sua alcalinidade, e esse fato poderia propiciar processos de lixiviação pela liberação do hidróxido de cálcio dos CPs, foi realizado ao longo do tempo de cura o monitoramento do pH da solução a 38 °C por meio de um pHmetro. Na FIGURA 3.7 estão apresentados os resultados do pH ao longo do tempo, sendo todos mantidos entre as faixas de 12,0 e 13,5. A FIGURA 3.7 também ilustra a linha correspondente à referência, sendo o valor de pH da água no início do processo (7,3).

FIGURA 3.7 – Gráfico resultante das medidas de pH dos tanques de cura dos corpos de prova ao longo do tempo de sua exposição.



FONTE: O autor (2020).

Para a definição das taxas de aquecimento e resfriamento, foram considerados os levantamentos bibliográficos citados anteriormente, em trabalhos laboratoriais similares, como Schovanz (2019), que utilizou uma taxa de aquecimento de 10 °C/h e Kchakech (2015), que fez uso de taxas de aquecimento e de resfriamento de 5 °C/h.

além da instrução técnica de FURNAS (HASPARYK *et al.*, 2020). Também, foram levadas em consideração os alertas apontados por Thaulow *et al.* (1997) *apud* Melo (2010) em relação aos riscos de microfissuras, principalmente, nas extremidades em contato com o ambiente, além de fraturas entre a pasta e o agregado, ocasionadas principalmente pela diferença entre os coeficientes de dilatação dos materiais, como agregados, cimento, água e ar, sendo recomendada a taxa de variação máxima de 20 °C/h.

FIGURA 3.8 – Câmara climática utilizada na cura térmica.



FONTE: O autor (2019).

A manutenção dos CPs em um patamar de 85 °C por 12 h teve como base estudos de diversos autores, sendo consenso o fato da formação da *DEF* ter relação à exposição em ambientes com temperatura acima de 70 °C, como Ghorab *et al.* (1981); Heinz *et al.* (1986); Hobbs (1999); Heinz *et al.* (1999); Taylor *et al.* (2001); Melo (2010); Kchakech *et al.* (2016); Rashidi *et al.* (2017); Godart (2017); Martin *et al.* (2017) e Giannini *et al.* (2018), mas, principalmente Dayarathne (2013) e Schovanz (2019), que utilizaram a temperatura de 85 °C em suas avaliações e estudos a respeito do tema.

### 3.4 ENSAIOS E ANÁLISES

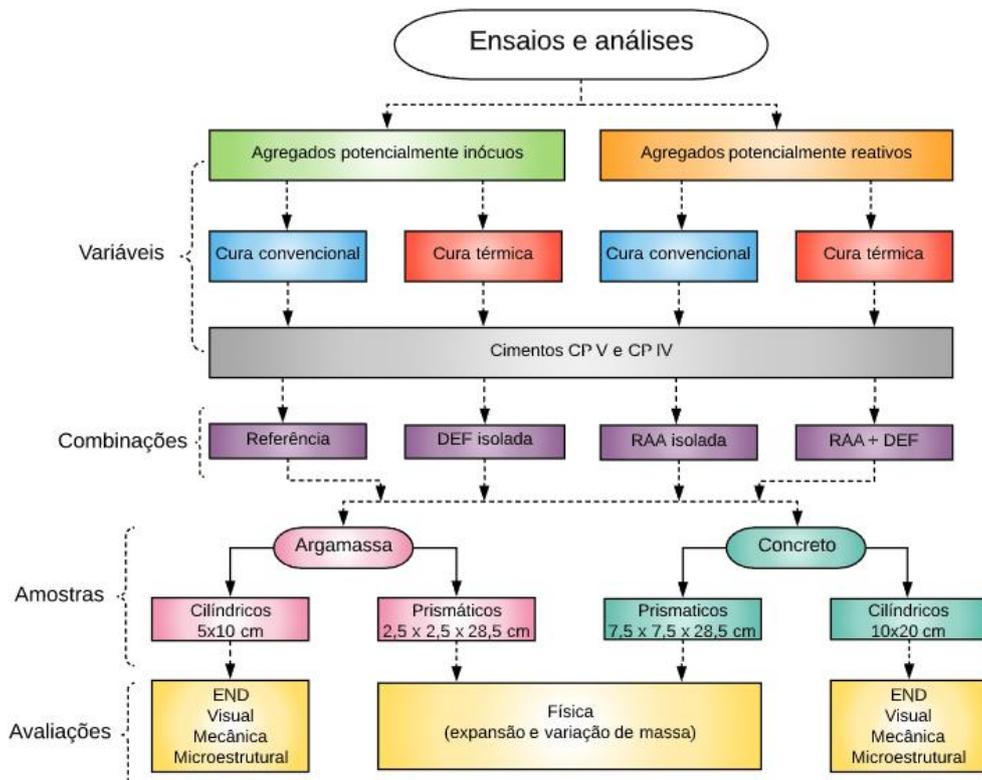
Os ensaios não-destrutivos (END), foram realizados com os CPs cilíndricos, antes da execução dos ensaios mecânicos, em cada idade de controle. Foi determinada tanto a velocidade de onda ultrassônica como a resistividade elétrica nos CPs de concreto e somente a avaliação por ultrassom nos CPs de argamassa. A

análise visual, contemplando registros fotográficos, também foi realizada em cada marco de controle, nos mesmos CPs citados, para observar possíveis formações macroscópicas sugestivas de produtos neoformados.

Com relação às avaliações mecânicas, foram executados os ensaios para a determinação da resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade nas idades de controle, para os CPs cilíndricos de concretos e argamassas, conforme indicados na TABELA 3.1 e na TABELA 3.2. Após a ruptura mecânica, os fragmentos foram separados e preparados para as avaliações microestruturais (conforme 5.4.4). Já, as determinações de expansão e variação de massa foram executadas com os CPs prismáticos, para cada condição estudada.

No FLUXOGRAMA 3.2, estão apresentadas, de forma esquemática, as variáveis contempladas no estudo, as combinações obtidas, bem como as avaliações executadas para cada tipo de amostra preparada em laboratório, de forma a complementar o entendimento do programa experimental do FLUXOGRAMA 3.1.

FLUXOGRAMA 3.2 – Análises e combinações empregadas no estudo.



FONTE: O autor (2020).

### 3.4.1 END

As avaliações por ensaios não-destrutivos (END) realizadas nesta pesquisa, referem-se à velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e à resistividade elétrica em corpos de prova cilíndricos.

#### 3.4.1.1 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A determinação da velocidade de propagação de ondas, a partir de leituras diretas, obtidas por pulsos ultrassônicos, foram realizados com os CPs cilíndricos de concreto e de argamassa antes da realização dos ensaios mecânicos, logo após a retirada dos tanques de cura a 38 °C e a secagem superficial, seguindo a metodologia da NBR 8802 (ABNT, 2019).

A velocidade de propagação de ondas foi calculada conforme a EQUAÇÃO 5.

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{EQUAÇÃO 5}$$

Onde:

$V$  = Velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s);

$L$  = Medida entre as faces dos transdutores – altura dos CPs (m);

$t$  = Tempo desde a emissão até a recepção da onda (s).

Nesta pesquisa, foi utilizado um aparelho de ultrassom (marca Proceq, modelo Pundit PL 200) com transdutores de 54 kHz de frequência e um paquímetro digital, da marca Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm para a determinação da altura dos corpos de prova, determinada ao centro dos CPs, após terem suas faces retificadas. O resultado obtido para cada CP referiu-se à média de três determinações da velocidade de propagação. Na FIGURA 3.9 está apresentada uma leitura realizada em CPs de concreto.

FIGURA 3.9 – Foto ilustrativa em um dos momentos de leitura de ultrassom em CPs de concreto.



FONTE: O autor (2020).

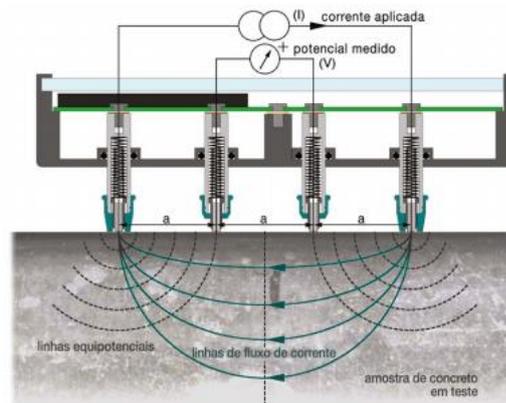
#### 3.4.1.2 Resistividade elétrica

A determinação da resistividade elétrica foi realizada apenas com os CPs cilíndricos de concreto, pois os de argamassa não possuíam altura compatível com a aplicação do método.

A avaliação consistiu no contato superficial dos CPs por quatro sondas, das quais duas delas (das extremidades), aplicam uma corrente elétrica e a diferença de potencial foi medida entre as demais sondas internas. O método baseia-se no princípio dos quatro eletrodos de Wenner, apresentado pela ASTM G 57 (2012), porém utiliza-se de forma adaptada para o concreto, haja vista que ainda não existe norma publicada para tal fim. O princípio de funcionamento é o mesmo, sendo o posicionamento de quatro eletrodos de metal em linha reta, igualmente separados, onde a aplicação da corrente é realizada nas extremidades, porém, para o concreto existem equipamentos comerciais, com eletrodos separados por distâncias fixas, sendo o resultado apresentado de forma direta em seu leitor após o acionamento para liberação das correntes de leitura.

No desenvolvimento deste estudo, utilizou-se o equipamento da marca Proceq, (identificado comercialmente por Resipod), com princípio de funcionamento conforme a FIGURA 3.10.

FIGURA 3.10 – Princípio de funcionamento equipamento Resipod.



FONTE: Proceq (2020).

Como a corrente na superfície depende da saturação dos poros do concreto, as leituras foram realizadas imediatamente após retirada dos tanques de cura, com as superfícies ainda saturadas, obtendo-se a média de três determinações para cada corpo de prova nas idades de controle (FIGURA 3.11).

FIGURA 3.11 – Foto ilustrativa de uma das leituras da resistividade elétrica em corpos de prova das amostras submetidas aos processos de formação e de caracterização da DEF e RAA ao longo do tempo.



FONTE: O autor (2019).

## 3.4.2 COMPORTAMENTO FÍSICO

### 3.4.2.1 Expansão linear

O método consiste na medida da variação de comprimento de prismas, sejam de argamassa ou concreto, por meio de relógios comparadores que permitam leituras com menor divisão de 0,001 mm, conforme procedimentos da NBR 15577-4 (ABNT, 2018) e da NBR 15577-6 (ABNT, 2018). Previamente, foi feita leitura de uma barra padrão, servindo de referência para a variação do comprimento das amostras. O

cálculo da expansão foi feito conforme a EQUAÇÃO 6, para cada prisma, sendo ao final calculada a média das expansões.

$$El = \frac{(L_i - L_0)}{L_n} \times 100 \quad \text{EQUAÇÃO 6}$$

Onde:

$El$  = Expansão linear individual (%);

$L_i$  = Comprimento do corpo de prova prismático na data de ensaio (mm);

$L_0$  = Comprimento inicial do prisma (mm)

$L_n$  = Comprimento efetivo do corpo de prova prismático (250 mm).

Os procedimentos efetuados seguiram as recomendações da NBR 15577 (ABNT, 2018), Partes 4 (barras de argamassa) e 6 (prismas de concreto), com exceção das etapas de fracionamento dos agregados e procedimentos de mistura. Ressalta-se que todos os CPs foram moldados a partir de uma única produção na betoneira para cada condição em estudo, de modo a garantir a homogeneidade dos compósitos.

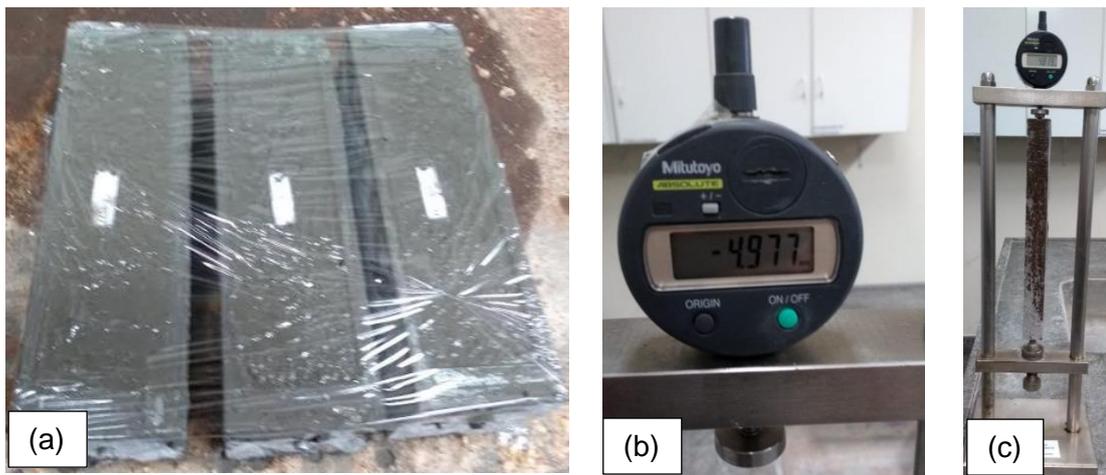
Na FIGURA 3.12 estão mostrados, em (a) os prismas de concreto recém moldados, durante a cura inicial, em (b) o relógio comparador empregado (marca Mitutoyo) com resolução de 0,001 mm, utilizado na determinação das expansões e em (c), um prisma de argamassa durante leitura de expansão.

Nas combinações com cura convencional, os prismas tanto de argamassa quanto de concreto (3 exemplares para cada condição), permaneceram em cura inicial por 24 h em ambiente laboratorial ( $23 \pm 2$ ) °C e ( $U \geq 50\%$ ), com as faces protegidas por plástico filme. Após esse período, foi realizada a leitura de comprimento orientativa e mantidos em tanque com água a 38 °C por 24 h, quando foram realizadas as determinações de comprimento inicial e devolvidos a 38 °C em cura imersa, onde permaneceram até as leituras de controle.

Para as combinações com cura térmica, foram realizados os procedimentos descritos em detalhes no item 3.3. Como o ciclo completo, considerando a CI e CT, levou em torno de 34 h, foi padronizada a permanência dos prismas na câmara de intemperismo, com a manutenção das condições ambientais, após terminados os

ciclos térmicos, de 38 °C e umidade relativa de 98% até o período de 48 h após a moldagem. A partir daí, foram repetidos os passos utilizados para a cura convencional, realizando a leitura de comprimento orientativa e mantidos em tanque com água a 38 °C por 24 h, quando foram realizadas as determinações de comprimento inicial (L0 para cálculo aos 3 dias de idade), retornando-os a 38 °C em cura imersa, onde permaneceram até as demais leituras de controle.

FIGURA 3.12 – Fotos ilustrativas dos prismas de concreto (a), relógio comparador (b), Leitura de expansão argamassa (c).



FONTE: O autor (2019).

As leituras de expansão nos prismas de argamassa foram realizadas duas vezes por semana no primeiro mês, uma vez por semana no segundo mês e 1 vez a cada 15 dias nos meses subsequentes. Para as amostras de concreto, uma vez a cada 15 dias nos 3 primeiros meses e uma leitura mensal até os doze meses de avaliação.

#### 3.4.2.2 *Variação de massa*

A variação de massa foi realizada a cada leitura de expansão dos prismas, com o intuito de avaliar o incremento em relação a determinação inicial, fazendo uso de uma balança digital, devidamente calibrada, com resolução de 0,01 g.

Os procedimentos operacionais utilizados para os prismas de argamassa e concreto foram distintos, sendo apresentados a seguir.

- Determinação da massa – prismas de argamassa

Como a NBR 15577-4 (ABNT, 2018) recomenda que as leituras de expansão sejam realizadas em um período de  $(15 \pm 5)$  s contados a partir da remoção das barras da água, as determinações de massa foram realizadas CP a CP, secando rapidamente com uso de pano úmido as superfícies somente após a leitura de comprimento, colocando o CP sobre a balança posicionada ao lado do local de leitura e retornando imediatamente ao tanque a 38 °C.

- Determinação da massa – prismas de concreto

Tomou-se como base a NBR 15577-6 (ABNT, 2018), que recomenda que as leituras de expansão sejam realizadas em um período inferior a 2 minutos contados a partir da remoção dos prismas do recipiente, por mais que na referida norma o processo de cura seja distinto ao utilizado na pesquisa (ambiente úmido ao invés de saturado). Os três CPs de cada condição foram acomodados sobre uma bancada, um a um, após cada leitura de expansão. Sequencialmente, as determinações de massa foram realizadas, secando as superfícies com uso de pano úmido do primeiro prisma lido, posteriormente o segundo e o terceiro, retornando ao tanque a 38 °C, após a anotação de cada valor apresentado na balança.

Na EQUAÇÃO 7, está mostrado o cálculo para a determinação da variação de massa individual dos prismas.

$$Vm = \frac{(M_i - M_0)}{M_0} \times 100$$

EQUAÇÃO 7

Onde:

$Vm$  = Variação de massa individual (%);

$M_i$  = Massa do prisma na idade de controle (g);

$M_0$  = Massa do prisma na idade de referência (2 dias na cura convencional e 3 dias na térmica) (g).

### 3.4.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO E VISUAL

Para os ensaios mecânicos, foram moldados quatro CPs cilíndricos por idade, sejam de argamassa ou concreto, para que após as avaliações END, pudesse ser determinada a resistência à compressão uniaxial em um CP, cujo resultado serviu de parâmetro para três determinações do módulo de elasticidade, com posterior ruptura mecânica, obtendo-se desta maneira por idade de controle, quatro resultados referentes à compressão e três ao módulo.

Para os concretos, nas idades de 28, 90 e 270 dias, conforme já apresentado na TABELA 3.1 foram realizados ensaios mecânicos referentes à determinação da resistência à tração, sendo moldados para tais datas de controle dois CPs adicionais.

Antes e após a execução dos ensaios mecânicos, foram realizadas avaliações visuais e registros fotográficos dos CPs cilíndricos e, eventualmente, dos prismas, quando durante as leituras foram verificadas manifestações patológicas muito evidentes, como fissuras ou formação de produtos de cor esbranquiçada sobre os CPs. A escolha pela avaliação visual dos CPs cilíndricos ao invés dos prismáticos, por idade de controle, se deu pela intenção em interferir o mínimo possível nestes últimos durante seus ciclos de cura, retornando para os tanques de água a 38 °C o mais rápido possível após suas leituras de expansão e determinação da massa, conforme procedimentos citados em 3.4.2.2.

#### 3.4.3.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão axial em CPs cilíndricos de argamassa foram realizados segundo a NBR 7215 (ABNT, 2019). Já, para a determinação da resistência à compressão axial em amostras cilíndricas de concreto, foi utilizada como base a NBR 5739 (ABNT, 2018).

O cálculo para a determinação da resistência à compressão uniaxial foi realizado conforme a EQUAÇÃO 8.

$$f_c = \frac{F}{A}$$

EQUAÇÃO 8

Onde:

$f_c$  = Tensão de ruptura individual, expressa em MPa, com três algarismos significativos;

$F$  = Força máxima alcançada (N);

$A$  = Área da seção transversal (mm<sup>2</sup>).

Para os CPs de argamassa, foi utilizada uma máquina universal de ensaios (marca EMIC, modelo DL 10.000) com capacidade máxima para 10 t. Para os de concreto, uma máquina universal de ensaios (também marca EMIC, modelo DL 100.000), com capacidade máxima para 100 t foi empregada, ambas devidamente calibradas (Classe 1).

#### 3.4.3.2 Módulo de elasticidade

Os ensaios para a determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação à compressão, foram realizados em CPs cilíndricos de argamassa e concreto, segundo a NBR 8522 (ABNT, 2017), utilizando a metodologia da tensão fixa (método A), para o cálculo do módulo tangente inicial ( $E_{ci}$ ).

Na EQUAÇÃO 9, está mostrado o cálculo para a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad \text{EQUAÇÃO 9}$$

Onde:

$E_{ci}$  = Módulo de elasticidade, expresso em GPa, com três algarismos significativos;

$\sigma_b$  = Tensão no limite superior, com a aplicação da carga de 30% da ruptura estimada (MPa);

$\varepsilon_b$  = Deformação específica no limite superior;

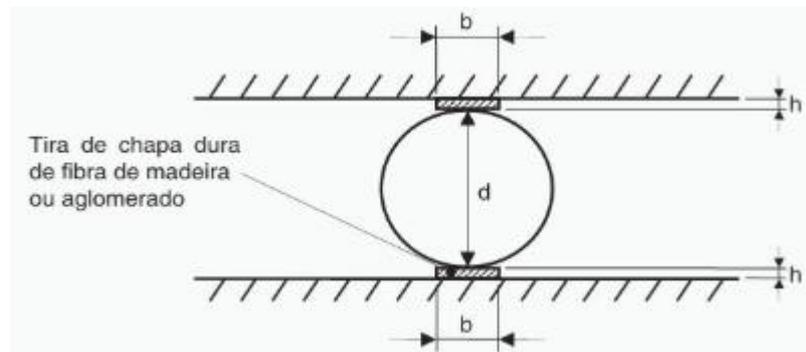
$\varepsilon_a$  = Deformação específica no limite inferior.

Para a coleta das deformações foram utilizados extensômetros eletrônicos, com bases de medida de 50 mm e 100 mm para os CPs de argamassa e concreto, respectivamente.

### 3.4.3.3 Tração por compressão diametral

Os ensaios para a determinação da tração por compressão diametral em amostras cilíndricas de concreto foram realizados segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011). Na FIGURA 3.13, está ilustrada a forma do posicionamento da amostra na máquina de ensaios.

FIGURA 3.13 – Disposição do corpo de prova – Tração indireta.



FONTE: ABNT NBR 7222 (2011).

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios (marca EMIC, modelo DL 30.000) com capacidade máxima para 30 t, devidamente calibrada (Classe 1).

### 3.4.3.4 Análise visual

A análise visual e os registros fotográficos foram realizados com pelo menos um CP de cada condição estudada, em cada marco de controle. Os CPs cilíndricos foram avaliados superficialmente antes dos ensaios mecânicos, para a possível identificação de manifestações visuais, como poros preenchidos, fissuras ou formações em gel. Após a ruptura mecânica, a avaliação seguiu a mesma rotina, porém, para a identificação interna das amostras.

## 3.4.4 MICROESTRUTURA

As características microestruturais dos traços estudados foram determinadas a partir de fragmentos de argamassa e concreto retirados de pelo menos um CP de cada condição estudada. Os CPs procederam dos ensaios mecânicos.

O processo de separação dos fragmentos foi realizado sequencialmente à avaliação visual em cada data de controle, nos mesmos CPs avaliados para os registros fotográficos.

Os protocolos para a coleta foram baseados na identificação visual ou por lupa estereoscópica, de poros preenchidos por possíveis produtos neoformados, tanto na parte externa como interna dos CPs. Também, foram procurados vestígios referentes a bordas de coloração distinta nas interfaces pasta/agregado.

Posteriormente à separação das amostras, estas foram estabilizadas em álcool isopropílico por 24 h para conter os processos de hidratação do cimento. Após a retirada do álcool, prosseguiu-se com a secagem em estufa ventilada a 40 °C, por mais 24 h. Na sequência, devidamente identificadas, as amostras foram armazenadas em dessecador de vidro, com prato perfurado e sílica em gel para evitar umidade, até as análises por MEV em conjunto com a análise química elementar semiquantitativa por EDS.

Para a separação de amostras avaliadas por DRX, os procedimentos foram similares, porém, priorizando a pasta cimentícia, evitando a presença dos agregados, sempre que possível. Após secas em estufa, as amostras foram pulverizadas manualmente, em torno de 1 minuto, para possibilitar a avaliação em DRX pelo método do pó prensado. A granulometria analisada foi de material passante na peneira 100 (abaixo de 150  $\mu\text{m}$ ).

As investigações por MEV foram realizadas em superfícies de fratura, fazendo uso de detector de elétrons secundários (SE) em conjunto com detector de elétrons retroespalhados (BSE). Os fragmentos foram posicionados no porta amostras e aterrados com fita de carbono. Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura tipo FEG (canhão de emissão de campo) com monocristal de tungstênio e camada de zircônio (modelo MIRA 3 LM, marca TESCAN), com uso dos detectores de elétrons (marca TESCAN), além do uso da microsonda de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X da marca OXFORD para obtenção das informações químicas do material. Os parâmetros do equipamento seguiram com a tensão do feixe de elétrons de 15 kV, intensidade do feixe (beam intensity) 18,00 e abertura do feixe (spot size) de 17,0 nm.

O processo de separação dos fragmentos, de argamassa e concreto, para a análise por DRX, foi realizado sequencialmente à avaliação visual em cada data de controle, nos mesmos CPs avaliados para os registros fotográficos.

Os protocolos para a coleta foram baseados na identificação visual ou por lupa estereoscópica, de poros preenchidos por possíveis produtos neoformados, tanto na parte externa como interna dos CPs, priorizando a pasta cimentícia, evitando a presença dos agregados, sempre que possível. Também, foram procurados vestígios referentes a bordas de coloração distinta nas interfaces pasta/agregado.

Após secas em estufa, as amostras foram pulverizadas manualmente por cerca de 1 minuto, para possibilitar a avaliação em DRX pelo método do pó prensado. A granulometria analisada foi de material passante na peneira 100 (abaixo de 150  $\mu\text{m}$ ).

Nas investigações por DRX, realizadas de maneira a complementar às avaliações microestruturais obtidas pelo MEV, foi feito uso de um difratômetro da marca Bruker, modelo D8 Advanced Eco, com varredura de  $2\theta$  de 5 a 70°, e com a identificação das fases químicas minerais a partir da análise em banco de dados no Crystallography Open Database, COD. O método de avaliação consistiu na interação entre o feixe de raios-X e os elétrons de um material (estrutura atômica), sendo identificados os fótons difratados. A difração segue a Lei de Bragg, que relaciona o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram. Como resultados foram determinadas as fases cristalinas presentes, recorrendo ao banco de dados citado.

#### 3.4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Foram aplicadas técnicas estatísticas de maneira a identificar a influência das variáveis obtidas no estudo. Inicialmente, para a detecção de valores espúrios, em seguida, a análise de variância ANOVA, para um nível de significância de 5% e, naqueles casos em que houve diferença significativa pela ANOVA, foram realizados testes de Tukey, para a identificação dos agrupamentos considerando a homogeneidade das médias.

Para os ensaios mecânicos em concretos e argamassas, bem como para os resultados não destrutivos de resistividade elétrica, no caso dos concretos, foi realizada a análise entre os dados, para que o coeficiente de variação entre valores individuais e a média estivesse limitado ao máximo de 10%. Posteriormente, foi realizada a análise de variância e o teste Tukey.

Para os resultados de velocidade de onda ultrassônica, o parâmetro de análise para a identificação de valores espúrios foi a variação máxima de 200 m/s em relação à média (conforme inclusive indicado na norma da ASTM C 597, 2016), posteriormente, também foi realizada a análise de variância e teste Tukey.

Para os resultados de expansão, foi adotado o critério do desvio relativo máximo (DRM) recomendado pela norma brasileira (ABNT NBR 15577-4, 2018); adicionalmente, os resultados foram analisados quanto à sua variância (ANOVA).

No APÊNDICE J são apresentados os valores tabelados referentes à distribuição F (Fischer-Snedecor), e que foram utilizados como valores críticos nas análises estatísticas de variância. Os valores “F” calculados foram comparados com os tabelados ( $F_{\text{crítico}}$ ). Quando  $F_{\text{crítico}}$  é menor que “F”, existe a probabilidade de existirem valores com variância significativa na amostra. O valor “P” calculado (probabilidade de significância), ajuda nesta conclusão, pois demonstra a probabilidade de dispersão entre valores quando for menor que o nível de significância estabelecido no método, 5% (0,05).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, estão apresentados os resultados e as respectivas discussões, obtidos a partir do programa experimental proposto, a fim de alcançar os objetivos geral e específicos desta pesquisa.

Para facilitar a avaliação dos resultados, foram inseridas considerações, contemplando cada tipo de patologia estudada: RAA isolada, DEF isolada e RAA + DEF. Para a apresentação dos gráficos, padronizou-se a seguinte nomenclatura, também apresentada na lista de abreviaturas:

- REF – Combinação entre agregados, aglomerante e tipo de cura considerada como referência em uma avaliação;
- AGN – Agregado graúdo potencialmente inócua para RAA;
- AGR - Agregado graúdo potencialmente reativo para RAA;
- RAA – Trata-se do tipo específico RAS.

No APÊNDICE K, dividido em quadros por ataque, tipos de cimento e material (argamassa ou concreto), estão apresentados todos os resultados individuais obtidos nesta pesquisa, entre as idades de controle de 28 a 365 dias. Também, foram inseridas no referido APÊNDICE, todas as análises de variância calculadas, com a fonte da variação (dentro e entre grupos de dados), a soma dos quadrados (SQ), graus de liberdade (gl), média dos quadrados (MQ), “F” calculado, probabilidade de significância (P) e valores referentes à distribuição Fischer-Snedecor ( $F_{crítico}$ ), além da análise de variância pelo teste Tukey, tomando como parâmetro referência para comparação, os resultados obtidos na idade de 28 dias.

Na discussão dos resultados, foram citados para cada conjunto de resultados, os parâmetros estatísticos apresentados em detalhes no APÊNDICE K.

Devido ao grande volume de dados obtidos nesta pesquisa, oriundos das combinações entre diferentes tipos de ataques, com dois aglomerantes distintos e dois tipos de compósitos (argamassa e concreto), de maneira a facilitar a avaliação dos resultados, estes foram organizados em gráficos, com a evolução das propriedades ao longo do tempo, padronizando a seguinte sequência:

- Iniciando pelos resultados em argamassa (para as propriedades avaliadas para ambos os materiais: argamassa e concreto);
- Três gráficos por propriedade, referentes às combinações: RAA isolada, *DEF* isolada, e mista, *DEF* + RAA, respectivamente;
- Em todos os gráficos, foram apresentados os resultados com os cimentos CP IV e CP V ARI, bem como as respectivas referências para ambos os cimentos;
- Para a variação de massa, foram apresentados gráficos combinados com as expansões lineares. Neste item (4.1.4), foram apresentados gráficos individuais para cada combinação.

#### 4.1 END

Os ENDS foram realizados antes dos ensaios mecânicos com os CPs de argamassa e concreto, para cada condição avaliada.

Para as argamassas, foram realizadas as leituras de velocidade ultrassônica e, para os concretos, os ensaios de ultrassom e de resistividade elétrica. Este procedimento foi diferenciado, como comentado no capítulo anterior, em virtude das menores alturas dos corpos de prova de argamassa, impossibilitando as medidas com os sensores do equipamento de resistividade elétrica. Também, foram calculados os módulos dinâmicos de elasticidade a partir dos dados obtidos por ultrassom, adotando-se um coeficiente de Poisson de 0,2.

##### 4.1.1 ULTRASSOM

###### 4.1.1.1 Argamassa

Da FIGURA 4.1 à FIGURA 4.3 estão apresentados os resultados dos ensaios para a determinação da velocidade de ondas ultrassônicas, em CPs de argamassa.

FIGURA 4.1 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de argamassa – RAA isolada.

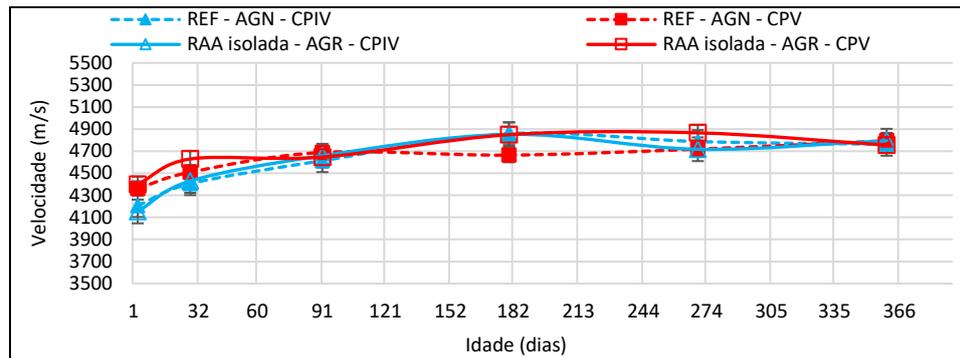


FIGURA 4.2 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de argamassa – DEF isolada.

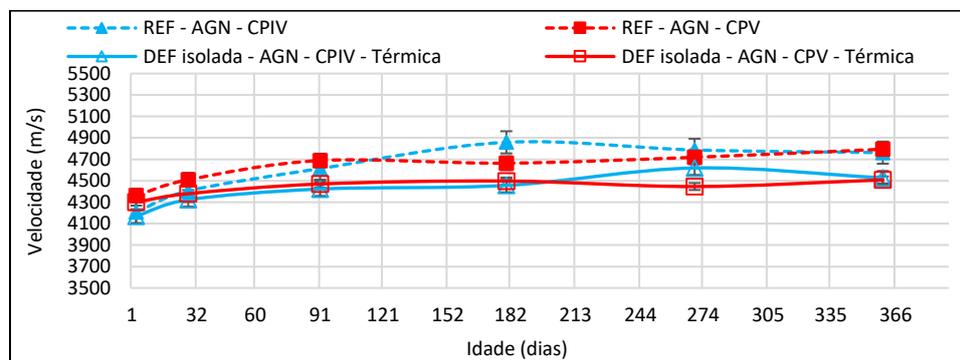
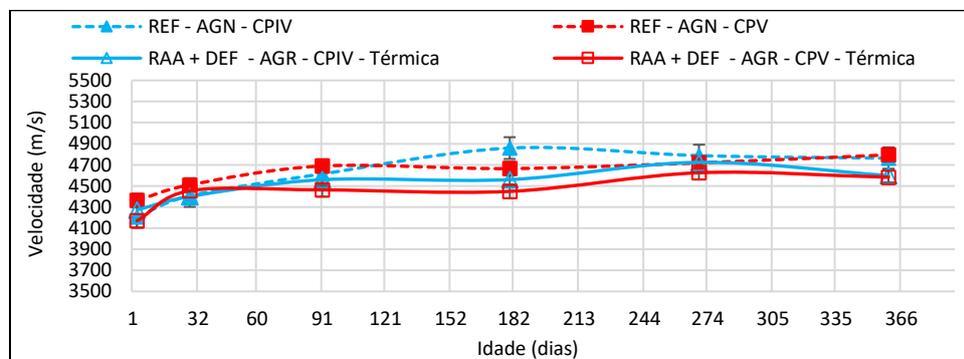


FIGURA 4.3 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de argamassa – DEF + RAA.



Pelos resultados obtidos, pode-se verificar que as argamassas, independente do procedimento térmico efetuado, ainda não apresentaram alterações, em cada condição, superiores a 200 m/s no período de análise (amplitude considerada normal nas medidas - ASTM C 597 (2016), até 365 dias, mesmo sob ataque combinado. Também, pela faixa de valores apresentados, pode-se observar que praticamente todas as dosagens se enquadraram na classificação da qualidade do material como excelente, uma vez que apresentaram velocidade superior a 4500 m/s, porém, vale deixar registrado que esses parâmetros referenciais são empregados para concreto (ABNT NBR 8802, 2019).

#### 4.1.1.2 Concreto

Da FIGURA 4.4 à FIGURA 4.6, se encontram apresentados os resultados dos ensaios para a determinação da velocidade de ondas ultrassônicas, em CPs de concreto.

FIGURA 4.4 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de concreto – RAA isolada.

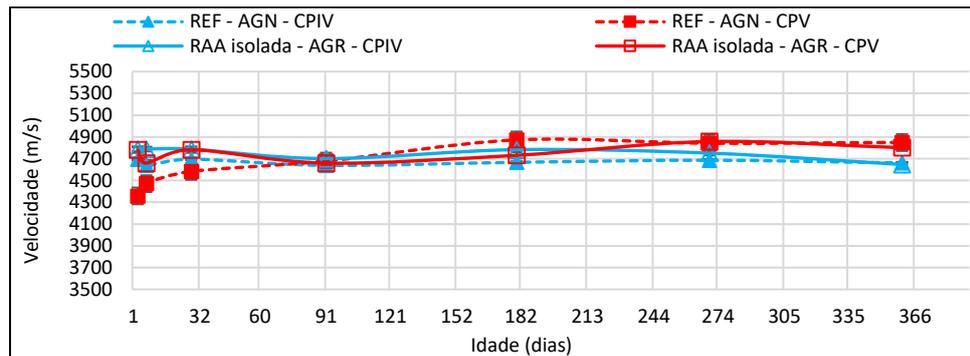


FIGURA 4.5 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de concreto – DEF isolada.

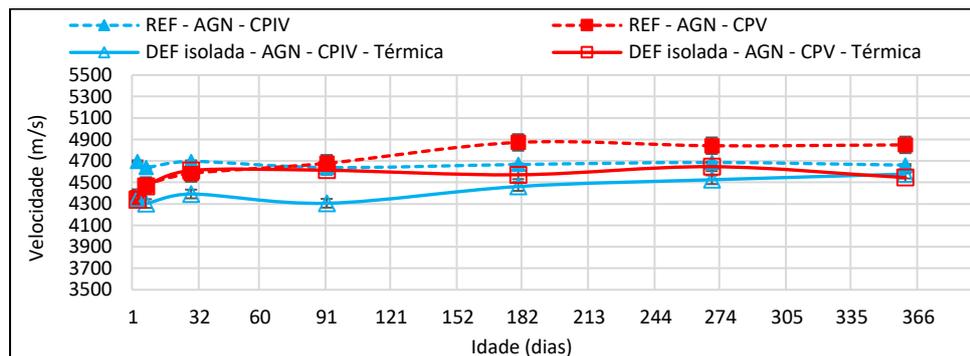
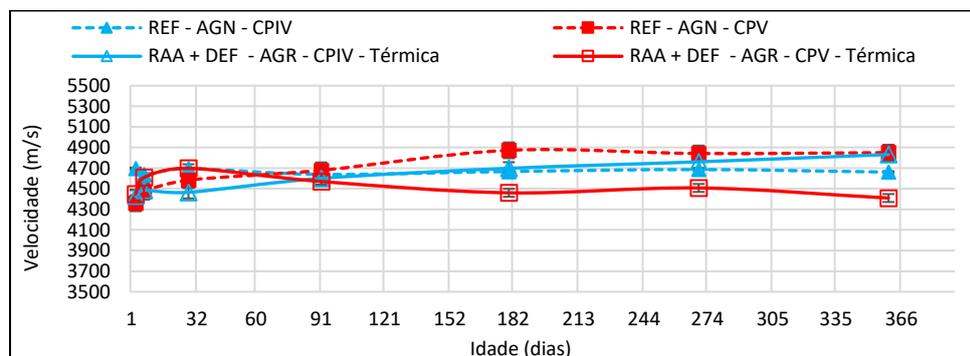


FIGURA 4.6 – Velocidade de ondas ultrassônicas dos CPs de concreto – DEF + RAA.



Os concretos avaliados, apresentaram resultados de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas similares aos das argamassas, independente do procedimento térmico e das diferentes dosagens efetuadas. Também, não foram observadas alterações dos resultados ao longo dos testes realizados até a idade final

de controle desta pesquisa, que foi de 365 dias. Pela análise desses parâmetros, segundo as recomendações da NBR 8802 (ABNT, 2019), os concretos estudados foram enquadrados em qualidade excelente ( $> 4500$  m/s). Entretanto, os resultados obtidos por meio dos demais estudos desta pesquisa foram considerados diferentes dessa classificação, conforme foi discutido mais adiante. Resultados similares foram obtidos por Capraro *et al.* (2017), em concretos com diferentes teores de  $SO_3$ , avaliados entre as idades de 84 a 360 dias, em que a velocidade de ondas ultrassônicas permaneceu estável por todo o período, entre 4800 a 5200 m/s, independente do ataque submetido.

A análise estatística dos dados (APÊNDICE K), constatou diferenças significativas entre os resultados de velocidades ultrassônicas, para as argamassas e os concretos ao longo do tempo. Pelo teste de Tukey, tanto para as condições referência como para a combinação RAA+DEF, foram identificadas as diferenças citadas, apesar de permanecerem com os resultados variando na faixa de 200 m/s até 365 dias, conforme já comentado anteriormente.

#### 4.1.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Da FIGURA 4.7 à FIGURA 4.9 estão apresentados os gráficos referentes aos resultados dos ensaios de resistividade elétrica (em  $k\Omega\text{cm}$ ), para os CPs de concreto. Pela análise dos resultados ao longo do tempo, observou-se que para todas as combinações avaliadas, os resultados se mantiveram constantes, sem variações significativas, da mesma maneira como comentado anteriormente para a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

Verificou-se uma tendência de linearidade entre os resultados utilizando CP V e algumas variações para as combinações utilizando CP IV, como o valor de 91 dias para RAA isolada (FIGURA 4.7) e os valores para 180 e 270 dias para a combinação DEF isolada (FIGURA 4.8). Porém, na idade final (365 dias), pelos resultados pode-se observar uma linha de tendência paralela ao eixo das abcissas.

FIGURA 4.7 – Resistividade elétrica em CPs de concreto – RAA isolada.

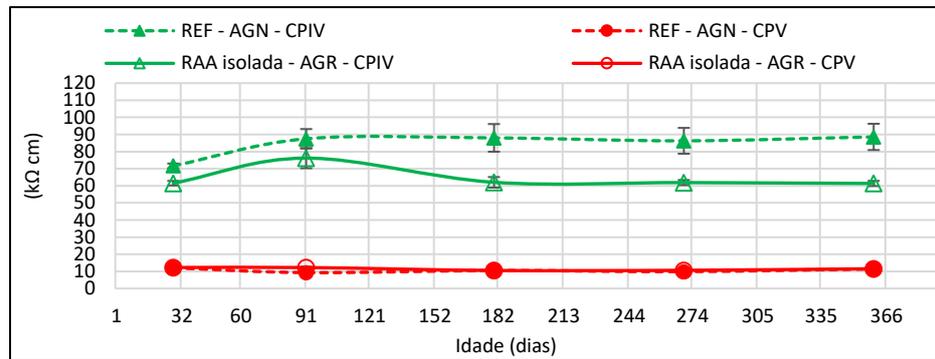


FIGURA 4.8 – Resistividade elétrica em CPs de concreto – DEF isolada.

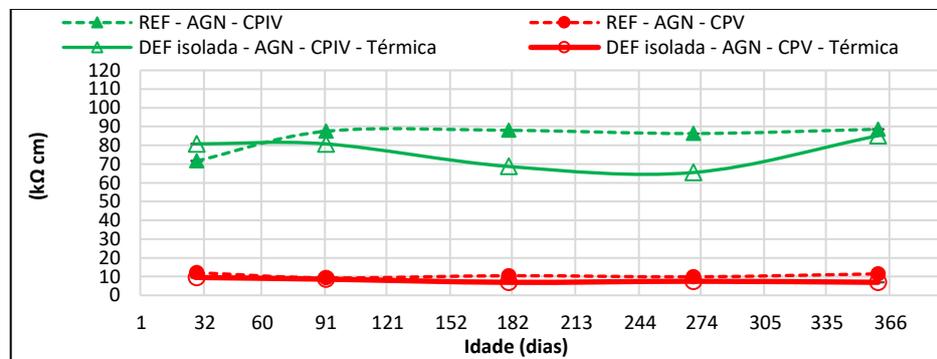
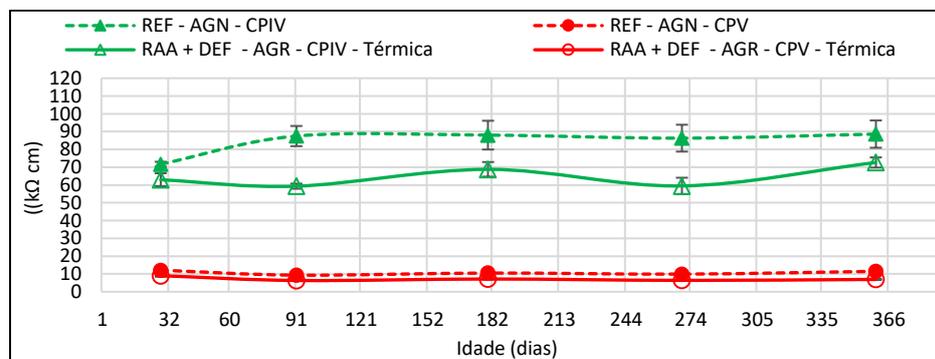


FIGURA 4.9 – Resistividade elétrica em CPs de concreto – DEF + RAA.



Tais resultados médios podem ser justificados por variações de umidade relativa na superfície dos corpos de prova no momento do ensaio, haja vista que foram realizadas determinações externas, obtidas pelo contato dos eletrodos do equipamento medidor sobre a geratriz dos CPs, após serem retirados de tanque de cura a 38 °C. Fato que favoreceu a evaporação superficial. Característica já identificada por Goto *et al.* (2017), em corpos de prova de concreto sob ISA, que indicaram alterações de até 4 vezes nos valores da resistividade elétrica sob a influência de íons no interior dos poros.

As análises de variância apresentadas no APÊNDICE K, serviram para confirmar as diferenças não-significativas entre os resultados para as leituras citadas de resistividade.

Uma variação significativa dos dados foi obtida com relação ao tipo de cimento utilizado. Para os concretos com CP IV, os resultados médios foram cerca de 6 a 7 vezes superiores aos com CP V, pelo que se considerou ter ocorrido uma reação pozolânica, a qual eliminou parte dos íons, provavelmente de cálcio, e contribuiu para o preenchimento de poros e vazios do concreto. Este fato também foi observado por Santor *et al.* (2012), que atribuiu a ocorrência de alterações na microestrutura da pasta, com o refinamento dos poros, devido à presença de adição no aglomerante.

### 4.1.3 EXPANSÃO LINEAR

#### 4.1.3.1 Argamassa

Da FIGURA 4.10 à FIGURA 4.12 estão apresentados os resultados dos ensaios de expansão dos prismas de argamassa.

FIGURA 4.10 – Resultados de expansão, argamassa – RAA isolada.

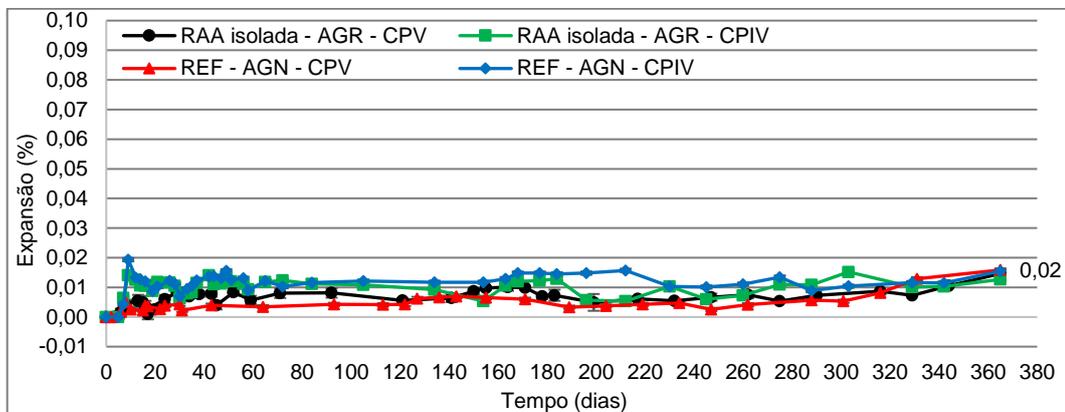
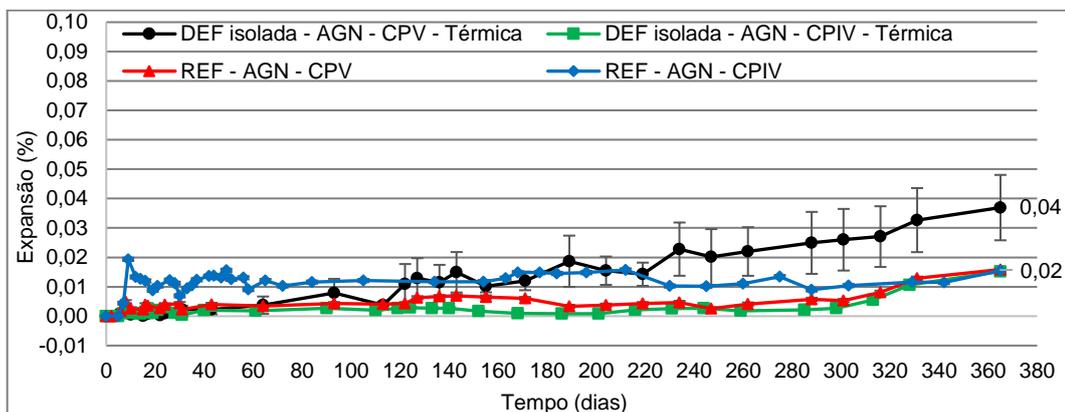
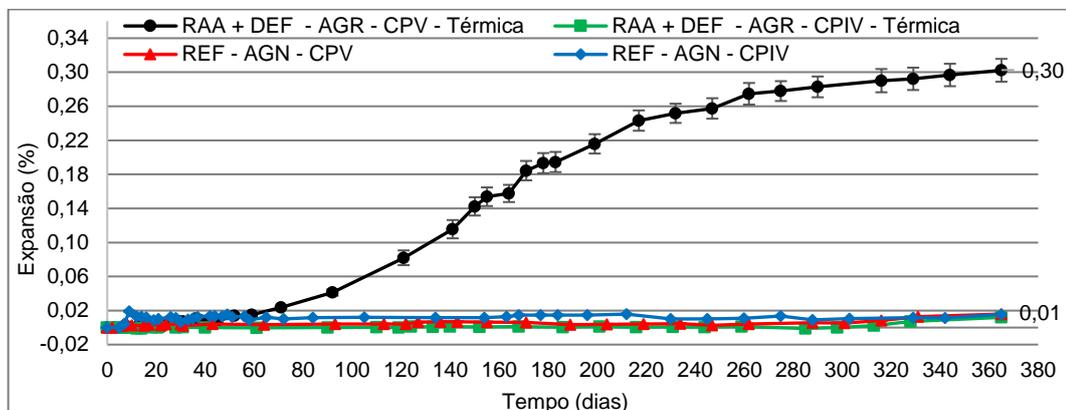


FIGURA 4.11 – Resultados de expansão, argamassa – DEF isolada.



A escala do eixo das ordenadas na FIGURA 4.12 foi diferenciada das apresentadas anteriormente, devido ao maior grau de expansão observado para a combinação *DEF+RAA*.

FIGURA 4.12 – Resultados de expansão, argamassa – DEF + RAA.



Não foram verificadas maiores expansões até os 365 dias de ensaio na combinação isolada de RAA, conforme mostrado na FIGURA 4.10, onde todas as curvas estão na marca de 0,02%. Já para a *DEF* isolada com o CP V, na FIGURA 4.11, é possível perceber a tendência de crescimento da expansão a partir dos 240 dias, atingindo aos 365 dias expansão média de 0,04%. Para a condição de RAA+*DEF*, a expansão foi bem mais expressiva, conforme mostrado na FIGURA 4.12, atingindo 0,30%, em média (30 vezes superior às formas isoladas); pelo que se pode comprovar, de certa forma, existe um efeito sinérgico das reações combinadas já que nem mesmo a variação do agregado, em ambas as composições isoladas, ocasionou diferença na expansão resultante.

Nesse estudo, não foi considerada a referência do limite de expansão da NBR 15577-4 (ABNT, 2018) de 0,19% para barras de argamassa, em virtude dos diferenciados processos de cura, ataques e períodos de exposição.

A hipótese para justificar o resultado obtido de expansão para a RAA isolada corrobora com os dados reportados na literatura, apresentando aos 365 dias resultado pouco expressivo de expansão (0,02%), uma vez que trata-se de uma reação química mais lenta em decorrência da rocha granítica reativa empregada, caracterizando uma reação do tipo álcali-silicato, onde os produtos se formam em idades mais avançadas, devido à necessidade da dissolução da sílica reativa dos agregados, para a posterior

associação com hidróxidos alcalinos, em solução aquosa (HASPARYK, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014; ABNT NBR 15577-1, 2018).

Os resultados de expansão para RAA isolada estão de acordo com a análise de variância executada, mostrando diferenças não-significativas ao longo do tempo (APÊNDICE K).

Os resultados de expansão para as argamassas na condição *DEF* isolada estão de acordo com Heinz *et al.* (1999), quanto ao início das expansões. Em estudo realizado, o autor por meio de testes em argamassas curadas a diferentes temperaturas, atribuiu períodos em dias para o início das expansões, sendo de 70 dias para cura a 85 °C, data aproximada onde percebeu-se acréscimo das expansões para o CP V na FIGURA 4.11.

As combinações referência e com o CP IV para a condição *DEF* isolada permaneceram estáveis até os 365 dias, com a mesma expansão visualizada para a RAA isolada (0,02%). Já, para a combinação com o CP V, os resultados estão alinhados com os obtidos por Dayarathne *et al.* (2013), que obteve expansão de, aproximadamente, 0,02% em barras de argamassa curadas com ciclos térmicos aos 100 dias de idade, valor similar ao mostrado na FIGURA 4.11 para a mesma idade (100 dias). Os resultados de expansão para a *DEF* isolada são coerentes com a análise de variância realizada, que mostrou diferenças significativas de variação ao longo do tempo.

Os resultados de expansão para a condição *DEF+RAA* em argamassa (FIGURA 4.12), apresentaram expansões mais expressivas utilizando o CP V, neste caso, atingindo o patamar de 0,30% aos 365 dias conforme comentado anteriormente. A análise de variância (ANOVA) e teste Tukey validaram os resultados obtidos e comprovaram a diferença significativa ao longo do tempo.

Uma hipótese adicional, mas que não foi confirmada nos estudos, uma vez que se trabalhou com os procedimentos similares tanto nas reações isoladas quanto combinadas, está relacionada a uma possível lixiviação iônica ocorrida pela imersão dos corpos de prova em solução aquosa, em conjunto com a mais elevada temperatura do ensaio, conforme reportado na literatura (THOMAS *et al.*, 2006; COUTO, 2008; SANCHEZ *et al.*, 2010; ASTM C 1293, 2020; RILEM TC 106-3, 2000).

Segundo os autores, o processo de percolação pode influenciar amenizando a manifestação patológica pelo efeito da diluição dos produtos formados.

#### 4.1.3.2 Concreto

Da FIGURA 4.13 à FIGURA 4.15 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de expansão dos prismas de concreto.

Apesar dos ensaios não seguirem, em sua totalidade, a metodologia citada pela NBR 15577-6 (ABNT, 2018), principalmente, quanto ao fracionamento dos agregados e condições de cura, foi considerado o limite de expansão estipulado pela referida norma para a RAA aos 365 dias de idade, sendo 0,04%, para servir unicamente de parâmetro orientativo. Vale ressaltar que o referido limite a um ano é válido para as misturas utilizando o cimento CP V, visto que para o CP IV, a idade de avaliação passa a ser 2 anos.

FIGURA 4.13 – Resultados de expansão, concreto – RAA isolada.

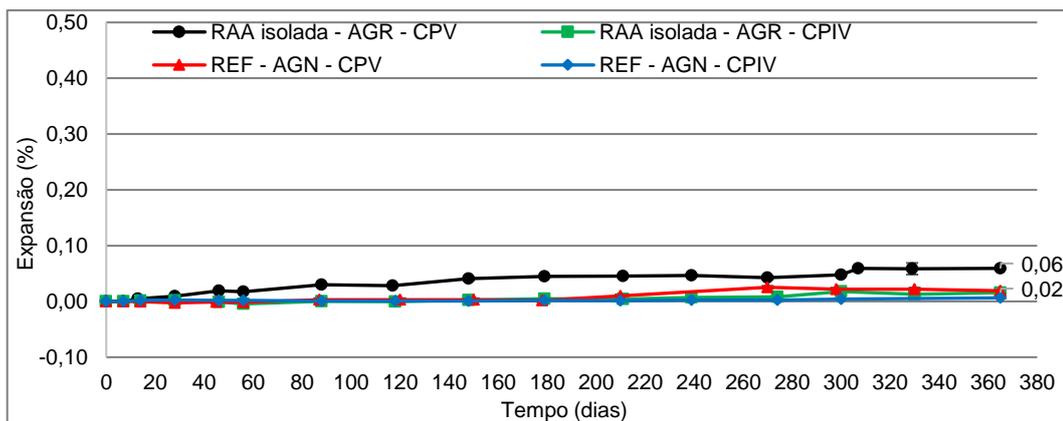


FIGURA 4.14 – Resultados de expansão, concreto – DEF isolada.

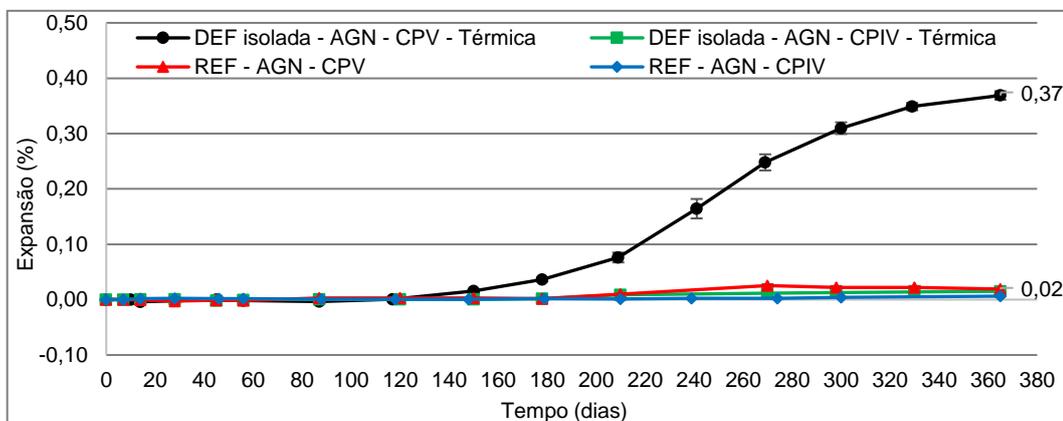
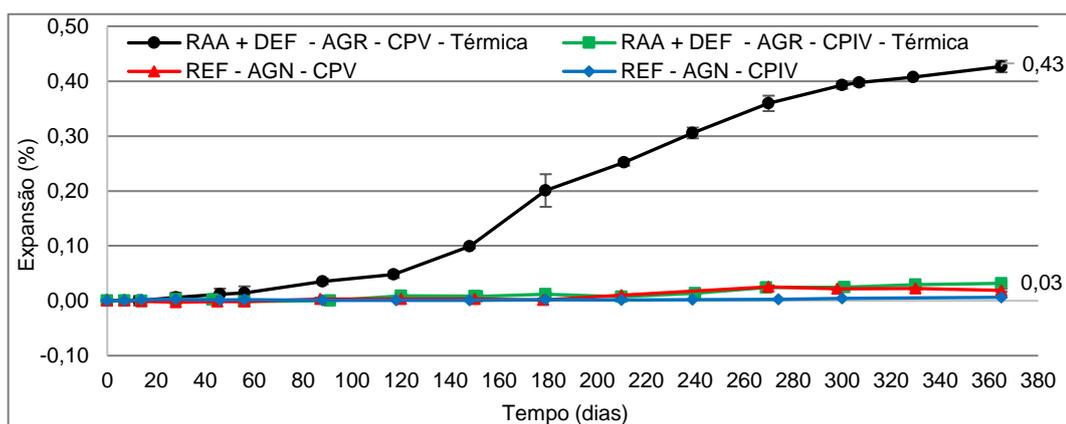


FIGURA 4.15 – Resultados de expansão, concreto – DEF + RAA.



Observou-se, pelos resultados, que na condição RAA isolada com CP V, o concreto apresentou aos 365 dias expansão média de (0,06%), portanto, acima do limite de (0,04%) estipulado pela NBR 15577-6 (ABNT, 2018), como potencialmente reativa. Os prismas com o CP IV e agregado reativo (AGR) mostraram menores expansões, com certa tendência de crescimento ao longo do tempo, atingindo 0,02% na mesma idade avaliada.

Na FIGURA 4.14, pode-se observar que no estudo da DEF isolada, com o CP V, a expansão do concreto também superou 0,04% aos 150 dias e, aos 270 dias, a média atingiu valor elevado, e da ordem de 0,30%. Aos 365 dias a média chegou a 0,37%. A condição com CP IV com o AGR, no estudo da DEF, mostrou comportamento semelhante àquele obtido no estudo da RAA, com taxas de expansão inferiores e abaixo de 0,02%.

Na FIGURA 4.15, pode-se observar que na condição conjugada RAA + DEF, com o CP V, os valores foram mais elevados de expansão (0,43% aos 365 dias), bem acima de 0,04%, já, a partir dos 88 dias (3 meses). A condição envolvendo o CP IV, e ambos os agregados (AGN e AGR), se comportou de forma similar aos comportamentos anteriores com esse cimento.

Os resultados obtidos para as combinações com CP IV estão alinhados com os obtidos por Amine (2017). O pesquisador conseguiu controlar expansões devidas à DEF, por período superior a 650 dias, utilizando cimento com 15% de adição de cinzas volantes em sua constituição.

A utilização de cimento pozolânico para mitigar as expansões devidas à RAA também foi citada por vários autores, entre eles Hasparyk (2011) e Mehta e Monteiro

(2014). Também, Figueira *et al.* (2019), atribuiu ao efeito dos produtos pozolânicos gerados no interior do concreto ou da captura dos íons cálcio disponíveis no meio pelo uso de CP IV.

Pelas análises de variância foram confirmados os resultados não significativos ao longo do tempo para as combinações RAA isolada e REF com CP IV (APÊNDICE K). Porém, para as condições *DEF* isolada e *DEF*+RAA, apesar de apresentarem expansões baixas com CP IV (0,02%), apresentaram diferenças significativas pela análise ANOVA, principalmente, para as últimas idades.

Os resultados de expansão em concretos atacados por *DEF*, submetidos aos processos de cura térmica, similares aos relatados nesta pesquisa, foram apresentados por Schovanz (2019). Porém, a autora obteve aos 252 dias de idade resultados muito superiores, sendo na faixa de 1,0% para o CP V e 0,2% para o CP IV.

De forma resumida, na avaliação da RAA isolada, as expansões chegaram a um patamar de 0,06% aos 365 dias, enquanto que nas condições *DEF* isolada e RAA+*DEF* com CP V as expansões foram bem mais expressivas, da ordem de 0,40%, aos 365 dias, indicando um fenômeno bem mais expansivo ao ser comparado com o da RAA, nessa isolada.

#### 4.1.4 VARIAÇÃO DE MASSA

Foram avaliadas as variações de massa dos prismas de argamassa e concreto para cada condição estudada a partir do monitoramento em relação ao tempo de exposição até a idade de controle.

##### 4.1.4.1 Argamassa

Da FIGURA 4.16 à FIGURA 4.23 estão apresentados os resultados da variação de massa, em conjunto com as expansões dos CPs, ao longo do seu tempo de exposição.

FIGURA 4.16 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo - REF - CP IV.

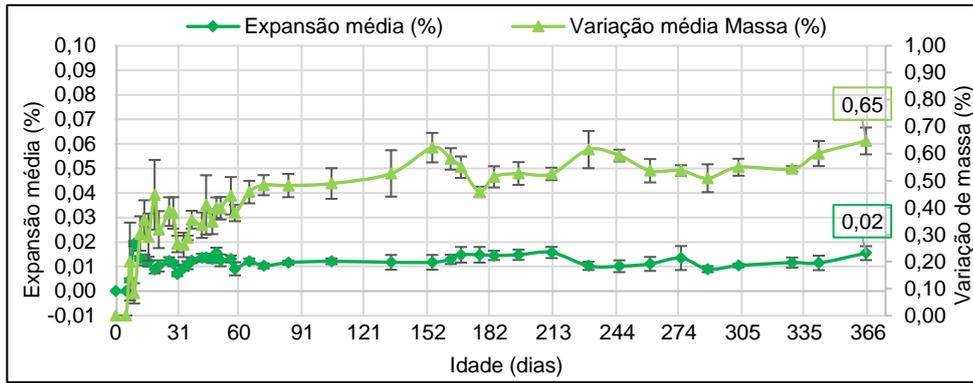


FIGURA 4.17 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo - REF - CP V.

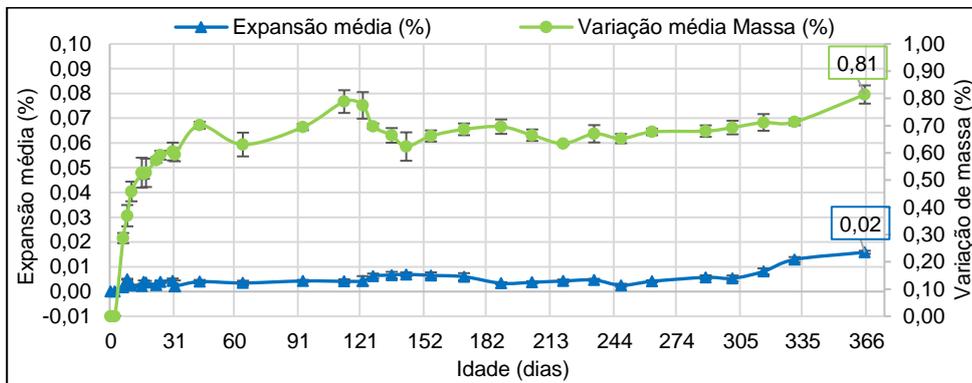


FIGURA 4.18 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo - RAA isolada – CP IV.

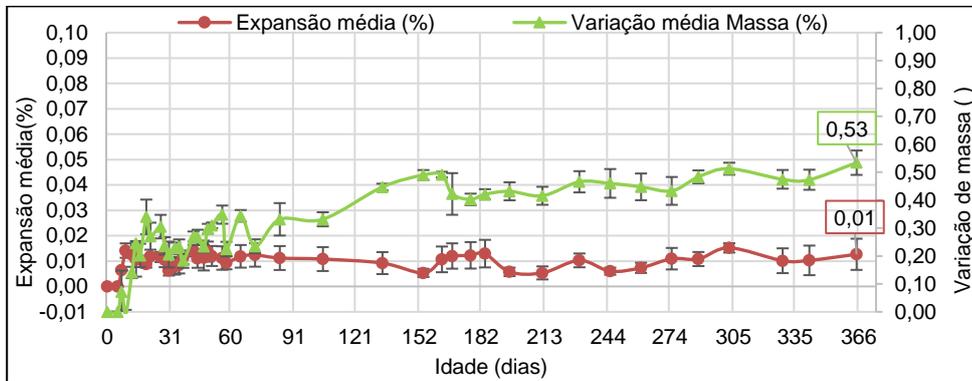


FIGURA 4.19 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo -RAA isolada – CP V.

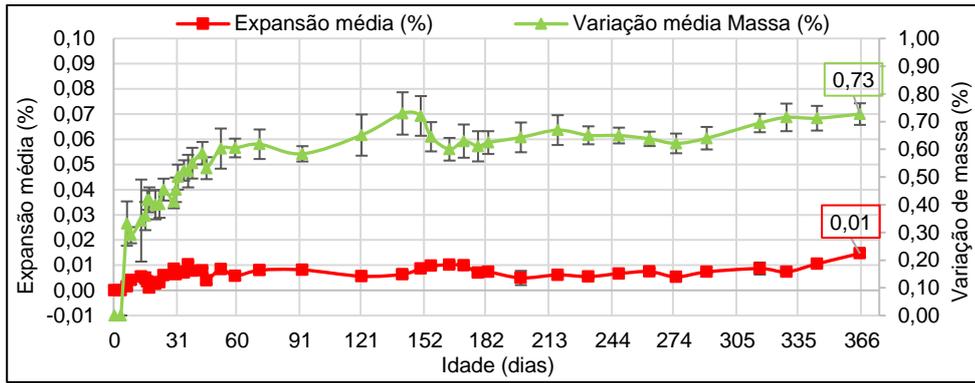


FIGURA 4.20 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo -DEF isolada - CP IV – Térmica.

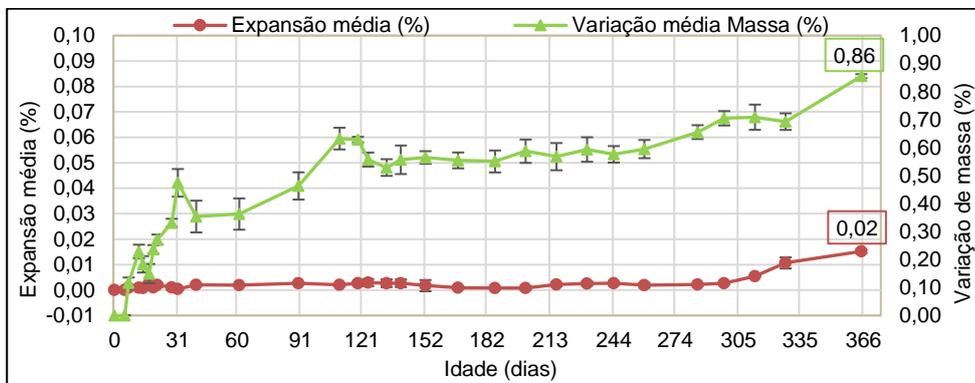


FIGURA 4.21 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo -DEF isolada - CP V – Térmica.

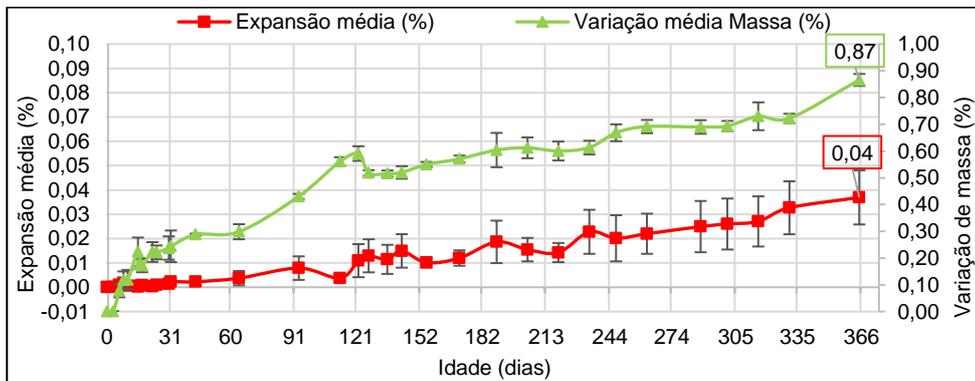


FIGURA 4.22 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo - RAA + DEF - CP IV – Térmica.

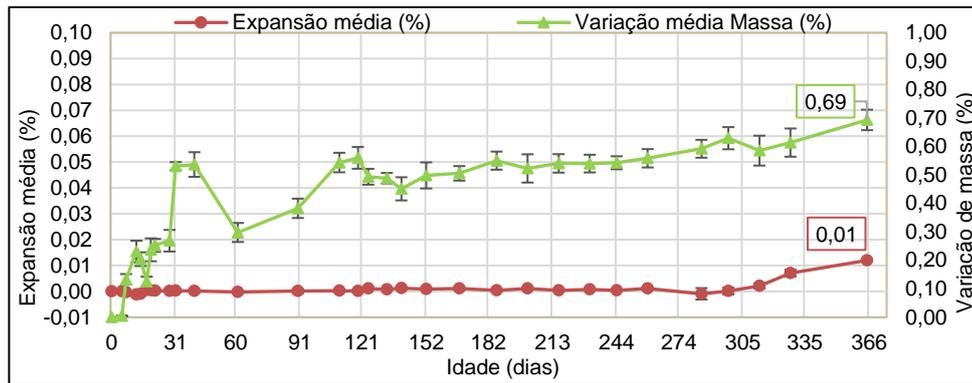
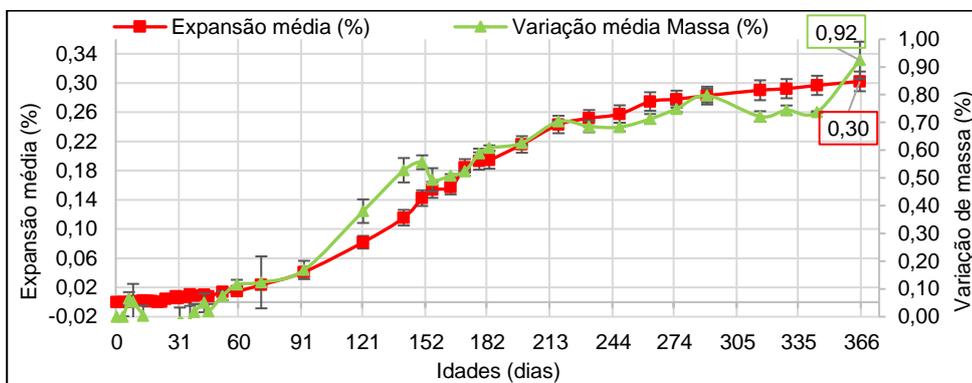


FIGURA 4.23 – Argamassa - Expansão x Variação de massa x Tempo - RAA + DEF - CP V – Térmica.



Pela análise dos resultados das condições de referências com CP IV e CP V, apresentados na FIGURA 4.16 e na FIGURA 4.17, visualizou-se que mesmo com pouca expansão linear, a variação de massa observada foi em média 0,7% e 0,8%, respectivamente, aos 365 dias de exposição, em tanques de cura a 38 °C.

Para os concretos com o CP IV, nas condições REF, RAA isolada e DEF+RAA, o valor médio observado foi de  $(0,62 \pm 0,1)$  %. Já, a condição DEF isolada, apresentou maior variação de massa, de 0,86%, valor alinhado com a mesma condição da amostra com o CP V, com valor de 0,87%.

Para as condições REF, RAA isolada e DEF isolada com CP V, os resultados médios de variação de massa foram superiores aos obtidos para o CP IV nessas condições, permanecendo na faixa de  $(0,80 \pm 0,1)$  %. Destaca-se a condição DEF+RAA com CP V, que apresentou maior variação de massa, 0,92%, condição com maior percentual de expansão observado no período avaliado (0,30%), enquanto as expansões das demais condições permaneceram com valor médio de (0,02%).

Pela análise de variância realizada (APÊNDICE K), todos os resultados obtidos para a variação de massa apresentaram diferenças significativas ao longo do tempo, para ambos os cimentos.

Independente dos valores obtidos, foi identificada uma tendência em todos os comportamentos analisados, da estabilização do ganho de massa ao longo do tempo para as condições com menores percentuais de expansão, e o acréscimo para as combinações com visível aumento de expansão, mostrando uma sinergia entre as duas propriedades medidas. Ou seja, a variação de massa foi correspondente aos produtos de reação *DEF* e *RAA*, as quais dependem de água para as suas formações, conforme reportado na literatura, como por Zhang *et al.* (2017), Schovanz (2019) e Sanchez *et al.* (2018), que atribuíram o ganho de massa às neoformações geradas na matriz cimentícia.

#### 4.1.4.2 Concreto

Da FIGURA 4.24 até a FIGURA 4.31 estão apresentados os resultados da variação de massa, em conjunto com as expansões dos CPs de concreto, ao longo do seu tempo de exposição.

FIGURA 4.24 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - REF – CP IV.

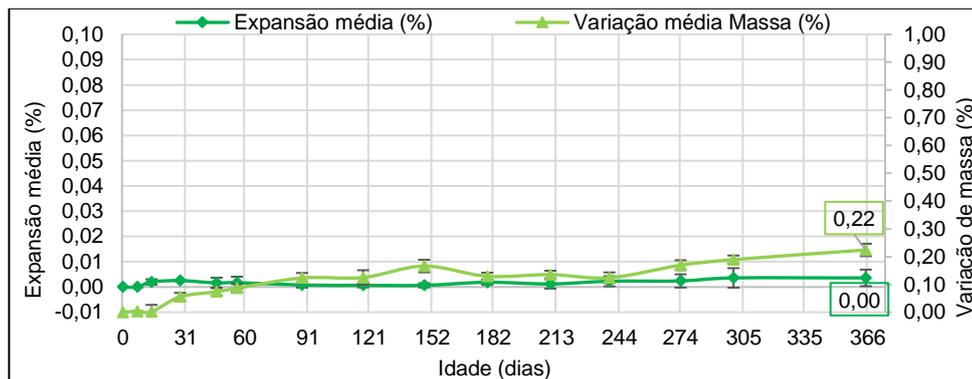


FIGURA 4.25 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - REF – CP V.

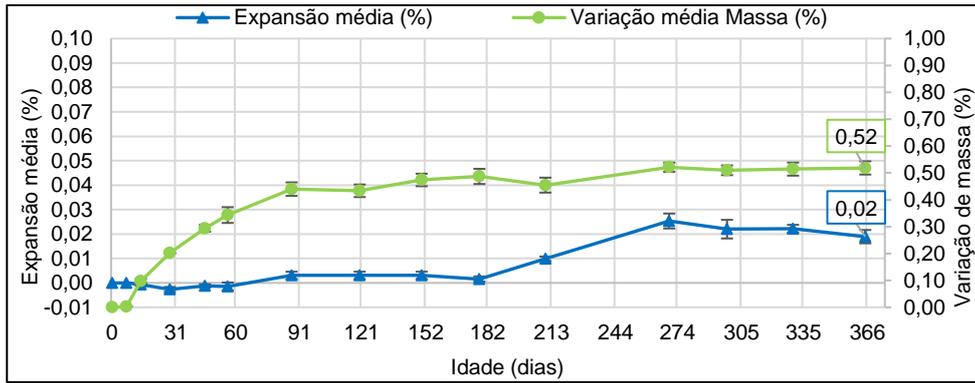


FIGURA 4.26 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - RAA isolada – CP IV.

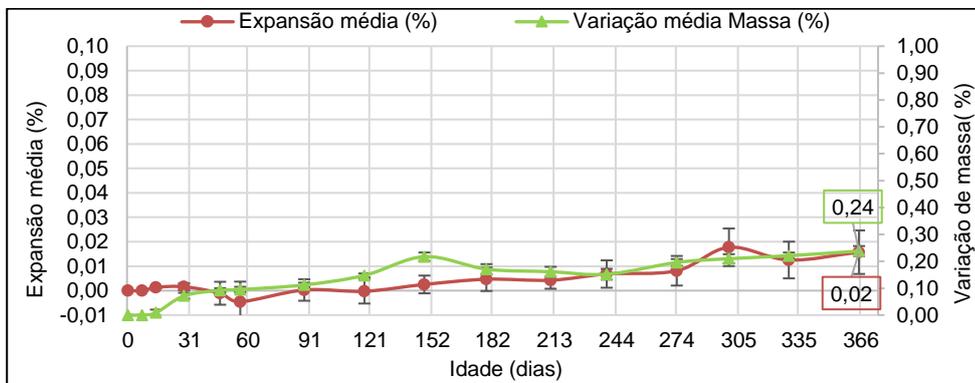


FIGURA 4.27 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - RAA isolada – CP V.

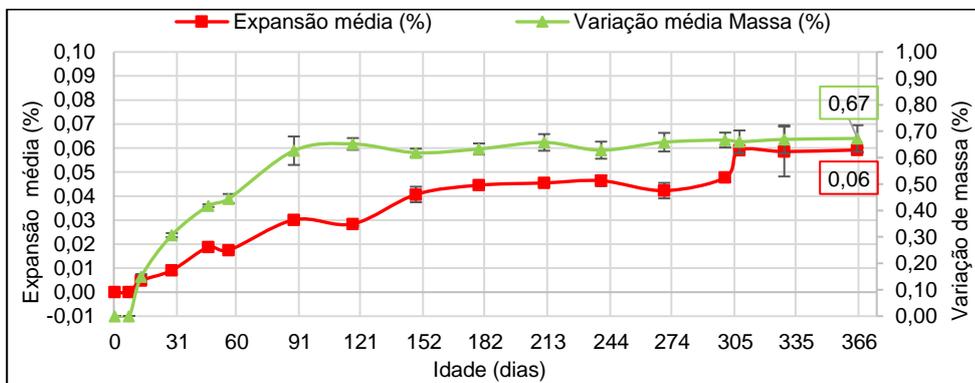


FIGURA 4.28 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - DEF isolada - CP IV – Térmica.

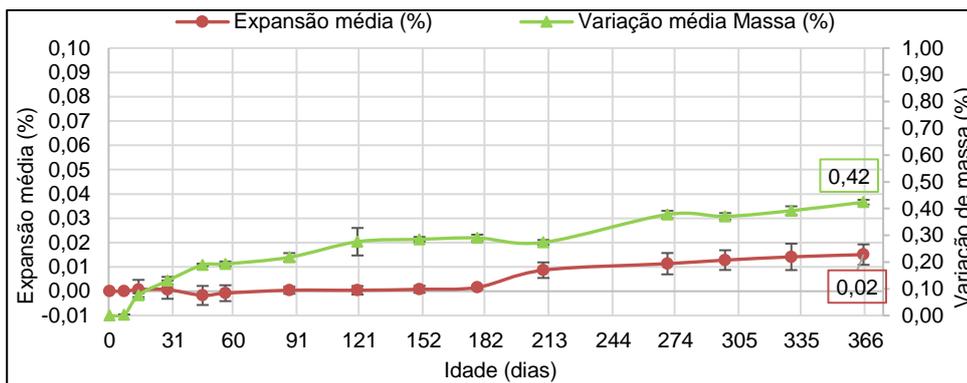


FIGURA 4.29 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo - DEF isolada - CP V – Térmica.

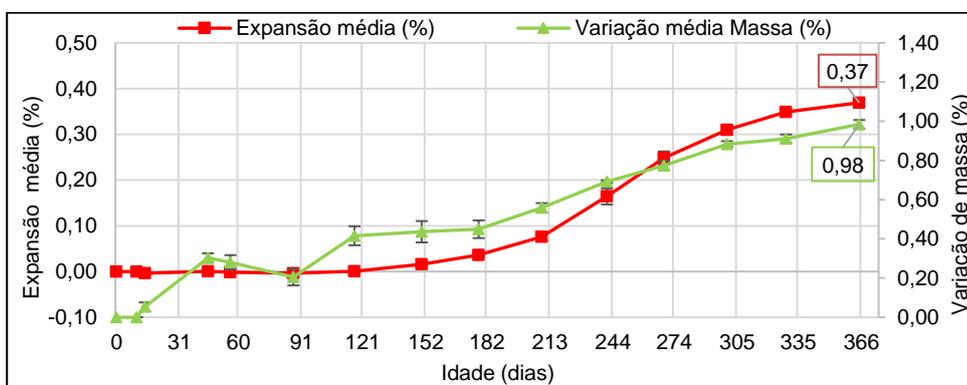


FIGURA 4.30 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo – DEF + RAA - CP IV – Térmica.

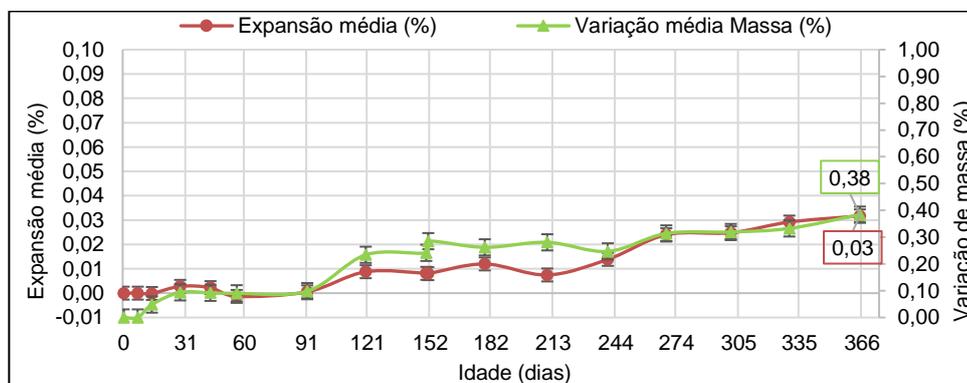
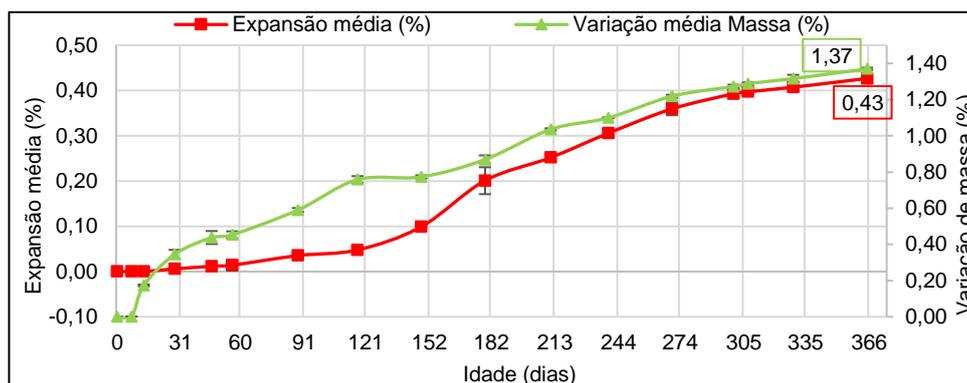


FIGURA 4.31 – Concreto - Expansão x Variação de massa x Tempo – DEF + RAA - CP V – Térmica.



Pela análise dos resultados apresentados na FIGURA 4.24 e na FIGURA 4.25, que tratam das condições referência, com CP IV e CP V, perceberam-se os menores resultados obtidos para a expansão linear, bem como menores variações de massa, com médias de 0,22 e 0,52%, respectivamente, aos 365 dias de exposição, em tanques de cura a 38 °C.

Para os concretos com o CP IV, nas condições REF, RAA isolada, DEF isolada e DEF+RAA, o valor médio observado foi de  $(0,32 \pm 0,1)$  %, mostrando comportamentos similares para todas as condições até os 365 dias de idade.

Para as condições REF e RAA isolada com o CP V, os resultados médios de variação de massa foram superiores aos obtidos para o CP IV (assim como no caso das argamassas), permanecendo na faixa de  $(0,60 \pm 0,1)$  %.

As condições DEF isolada e DEF+RAA com o CP V, apresentaram maior variação de massa, (0,98%) e (1,37%) respectivamente. As expansões obtidas para as referidas combinações também foram as maiores observadas (0,37 % e 0,43%), enquanto as expansões das demais condições permaneceram com valor médio de (0,03%).

Assim, como no caso das argamassas, a análise de variância realizada (APÊNDICE K), indicou diferenças significativas de variação de massa ao longo do tempo, para ambos os cimentos.

Os resultados de variação da massa dos CPs em concreto, apresentados em forma gráfica, juntamente com as expansões observadas ao longo do tempo, confirmaram as hipóteses da literatura, já apresentada na análise dos dados de

argamassa, em que são propriedades proporcionais, no qual o crescimento está ligado à formação de produtos internos expansivos, com maior absorção de água, na matriz cimentícia e, principalmente, no interior dos poros (HASPARYK, 2011).

## 4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO

### 4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

#### 4.2.1.1 Argamassa

Da FIGURA 4.32 até a FIGURA 4.34 estão apresentados os resultados de resistência à compressão dos CPs de argamassa.

FIGURA 4.32 – Resultados de resistência à compressão, argamassa – RAA isolada.

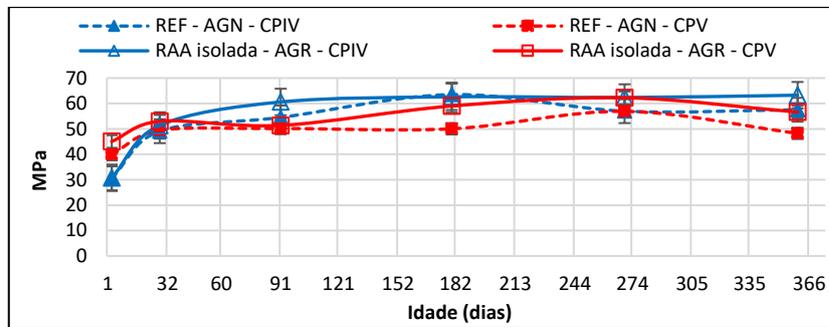


FIGURA 4.33 – Resultados de resistência à compressão, argamassa – DEF isolada.

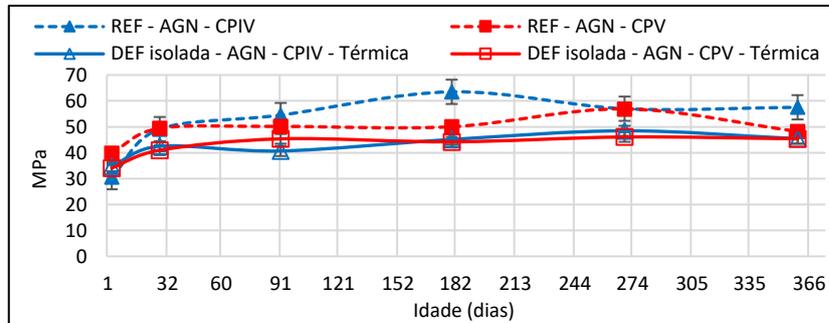
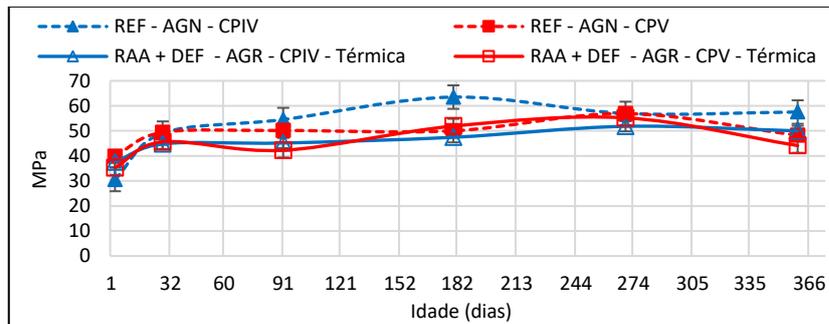


FIGURA 4.34 – Resultados de resistência à compressão, argamassa – DEF + RAA.



As condições de referência com CP V e CP IV, apresentaram variações entre os valores médios obtidos nas idades de 180 e 270 dias, respectivamente, provavelmente, inerentes aos processos de moldagem, fato comprovado pela análise de variância (ANOVA) e teste Tukey (APÊNDICE K), onde perceberam-se diferenças significativas somente nas referidas datas.

Analisando a evolução da resistência entre os 28 e 365 dias de idade, para as condições de referência, percebeu-se o crescimento de 15% para o CP IV (partindo de 49,1 MPa até 57,5 MPa) e, praticamente, a estabilização da resistência final aos 28 dias para o CP V, permanecendo na faixa de  $(49,0 \pm 1,0)$  MPa.

As combinações com CP IV também apresentaram comportamento similar entre as idades de 28 e 365 dias, sendo observado o crescimento de 19% para a RAA isolada, 6% para *DEF* isolada e 10% para *DEF*+RAA, com os resultados finais da idade de controle, de 63,3 MPa, 45,4 MPa e 50,0 MPa, respectivamente. Os dois últimos valores médios citados, menores em geral, podem ser resultantes, não só dos produtos neoformados, mas, adicionalmente, dos processos de cura térmica que geralmente são resultados escalares inferiores quando comparados com concretos que não foram submetidos à elevação de temperatura (NEVILLE, 1997; MELO, 2010; AL SHAMAA *et al.*, 2014).

Para a condição RAA isolada com CP V (FIGURA 4.32), o comportamento ao longo do tempo foi similar ao descrito para as amostras referência e combinações com CP IV, apresentando crescimento de 6 % (28 aos 365 dias), atingindo 56,6 MPa. Resultados coerentes com o apresentado por Hasparyk (2011) para o caso de concretos com RAA, por se tratar de uma reação expansiva mais lenta, com alterações na resistência à compressão somente em estágios avançados de degradação, sendo que nas idades iniciais, a reação pode inclusive contribuir para o aumento dessa propriedade.

Para os traços utilizando CP V, na condição *DEF* isolada e *DEF* + RAA, até os 365 dias, também não foram identificadas reduções significativas nessa propriedade, partindo de 41,0 MPa, para 45,4 MPa, e 45,6 MPa, para 44,1 MPa, respectivamente. Apesar de visualmente ser identificada uma queda entre 270 para 365 dias, na condição *DEF*+RAA (FIGURA 4.34), as análises de variância mostraram diferenças não-significativas entre os 28 e 365 dias.

Fazendo uma analogia ao concreto, considerou-se que a resistência à compressão foi mais sensível em amostras com alto grau de degradação e avançado estágio de fissuração, fatores não observados até os 365 dias para as amostras de argamassa, conforme apresentado no item 4.1.3. (expansões inferiores a 1%) (HASPARYK, 2005; SANCHEZ *et al.*, 2018; GIANNINI *et al.*, 2018).

Em estudo com argamassas atacadas por DEF, Nguyen *et al.* (2019), verificaram reduções significativas da resistência à compressão, quando as expansões lineares apresentavam valores próximos a 1%.

Pela análise de variância (APÊNDICE K), não foram observadas diferenças significativas entre os dados (entre 28 e 365 dias), em todas as condições e idades de controle, tanto para o CP IV como para o CP V.

#### 4.2.1.2 Concreto

Da FIGURA 4.35 até a FIGURA 4.37 estão apresentados os resultados de resistência à compressão dos CPs de concreto.

FIGURA 4.35 – Resultados de resistência à compressão, concreto – RAA isolada.

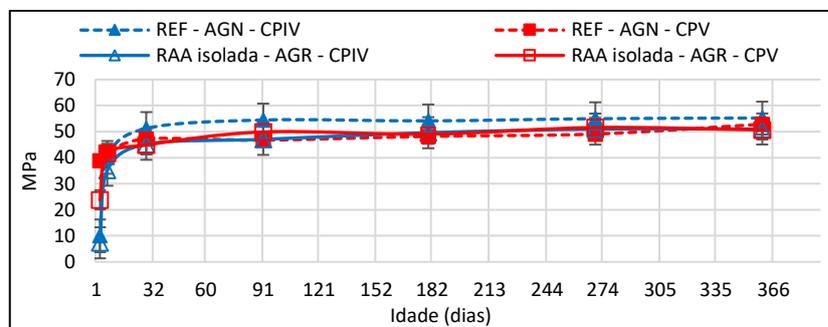


FIGURA 4.36 – Resultados de resistência à compressão, concreto – DEF isolada.

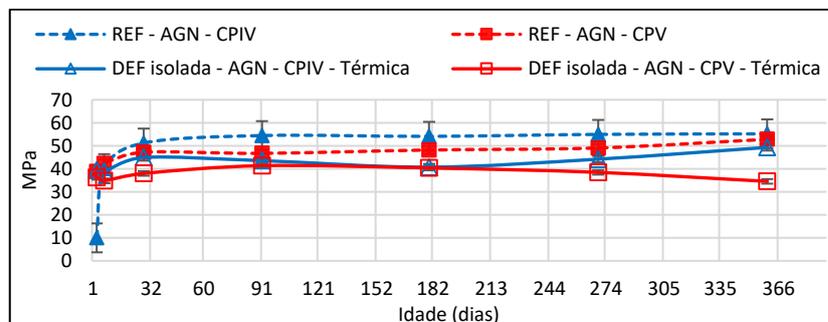
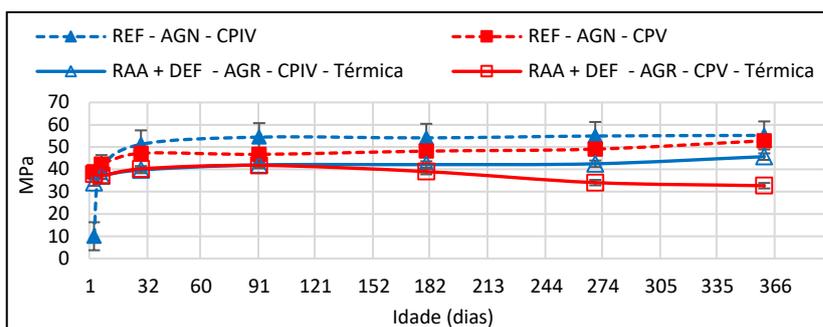


FIGURA 4.37 – Resultados de resistência à compressão, concreto – DEF + RAA.



As condições referência com CP IV e CP V, apresentaram crescimento constante de suas resistências à compressão, sendo de 8% e 11%, em relação às idades de 28 e 365 dias. As resistências médias finais foram de 55,2 MPa e 52,8 MPa, respectivamente.

As combinações com o CP IV também apresentaram comportamento similar entre as idades de 28 e 365 dias nas demais condições testadas, sendo observado um crescimento de 13% para a RAA isolada, 10% para DEF isolada e 15% para DEF+RAA, com resultados finais na idade de controle de 51,0 MPa, 49,3 MPa e de 45,7 MPa, respectivamente. Os menores valores ocorreram para condições do estudo envolvendo a DEF (DEF isolada e DEF+RAA), podendo ainda ser resultante da cura térmica empregada, o que geralmente causa resultados escalares inferiores quando comparados com concretos que não foram submetidos à elevação de temperatura (51,0 MPa – RAA isolada) (NEVILLE, 1997; MELO, 2010; AL SHAMAA *et al.*, 2014). Pela análise de variância (APÊNDICE K), não se perceberam diferenças significativas dos dados, com exceção à idade de 365 dias, na condição de ataque combinado.

Para a condição RAA isolada com CP V (FIGURA 4.35), o comportamento ao longo do tempo foi similar ao descrito para as amostras referência e para as combinações com CP IV, apresentando crescimento de 13%, atingindo 50,7 MPa. Os dados individuais foram analisados quanto à sua variância, e apresentaram diferenças não-significativas ao longo do tempo. Estes resultados foram considerados coerentes com o apresentado por Hasparyk (2011), por se tratar de uma reação expansiva mais lenta, com alterações na resistência à compressão somente em estágios avançados de degradação, sendo que nas idades iniciais, pode inclusive contribuir para o aumento dessa propriedade.

Para os traços utilizando CP V, na condição *DEF* isolada e *DEF* + RAA, foi observada uma redução nos resultados de resistência à compressão a partir dos 91 dias (FIGURA 4.36 e FIGURA 4.37). A redução de valores em comparação aos 365 dias, foi de 17% e 22%, ou de 41,4 MPa para 34,5 MPa, no caso da *DEF*, e de 41,8 MPa para 32,7 MPa na condição *DEF*+RAA. Estes resultados corroboraram com os observados por Al Shamaa *et al.* (2014), em estudo para *DEF*, no qual foi verificada uma redução de 23% da resistência à compressão com expansões na faixa de 0,20% aos 390 dias. Nesta pesquisa, como apresentado anteriormente, as expansões aos 365 dias foram de 0,37 e 0,43%, para *DEF* isolada e *DEF*+RAA respectivamente.

Os resultados de variância (ANOVA), confirmaram a redução significativa dos resultados de compressão observados, tanto para a *DEF* isolada como para a *DEF*+RAA, ao longo do tempo, apresentando “Fcrítico” inferior ao “F” obtido (APÊNDICE K).

Uma redução bem menos expressiva para a propriedade de resistência à compressão, foi obtida nessa pesquisa quando comparada com a de Schovanz (2019), em concretos atacados por *DEF* utilizando CP V, onde entre os 28 e os 252 dias a queda foi de 58 %. Porém, nesta idade, os resultados de expansão apresentados pela autora já alcançavam percentuais de 1,0%. Outra variação em confronto com o estudo citado, relaciona-se ao concreto com o CP IV, que segundo a autora, também apresentou uma redução, porém de 9% no mesmo período (28 a 252 dias), para uma expansão na faixa e 0,20%.

Porém, os resultados obtidos nesta pesquisa para o CP IV (*DEF* isolada), estão coerentes com aqueles apresentados por Melo (2010), que estudou concretos atacados, com manutenção dessa propriedade, sem alterações importantes até 270 dias, bem como os descritos por Giannini *et al.* (2018), que citaram a compressão como um parâmetro menos sensível, quando investigados concretos atacados por *DEF*.

Os resultados obtidos para o ataque combinado, estiveram de acordo com Kreitman (2011), que citou que a resistência à compressão foi menos afetada pelas reações expansivas, apresentando perda em torno de 25%.

Segundo dados reportados na literatura, a resistência à compressão é mais sensível em concretos com alto grau de degradação e avançado estágio de fissuração, fatores não observados até os 365 dias (HASPARYK, 2005; SANCHEZ *et al.*, 2018; GIANNINI *et al.*, 2018).

#### 4.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

##### 4.2.2.1 Argamassa

Da FIGURA 4.38 até a FIGURA 4.40 estão apresentados os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático (tangente inicial) dos CPs de argamassa.

FIGURA 4.38 – Resultados de módulo de elasticidade estático, argamassa – RAA isolada.

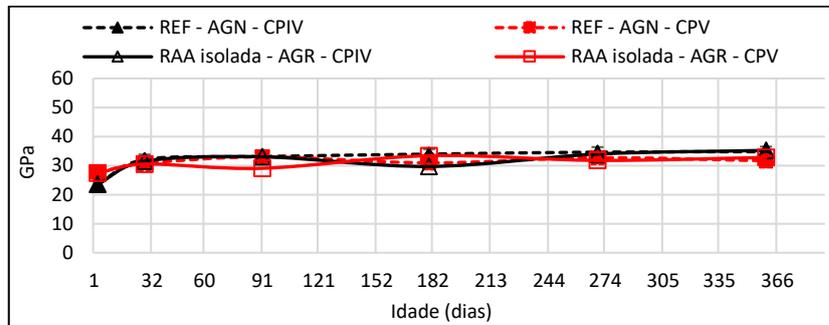


FIGURA 4.39 – Resultados de módulo de elasticidade estático, argamassa – DEF isolada.

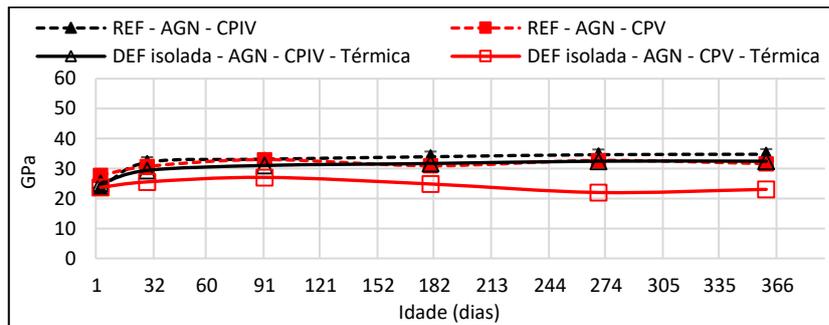
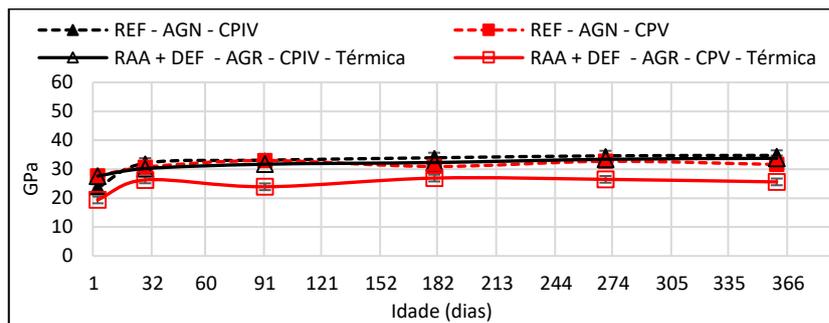


FIGURA 4.40 – Resultados de módulo de elasticidade estático, argamassa – DEF + RAA.



As condições referência com CP IV e CP V, apresentaram crescimento constante no módulo de elasticidade estático, sendo de 8% e de 3%, respectivamente, em relação às idades de 28 e 365 dias. O módulo final para o CP IV foi de 34,8 GPa e 31,6 GPa, para o CP V.

As combinações com CP IV também apresentaram comportamento similar entre as idades de 28 e 365 dias, sendo observado o crescimento de 11% para a RAA isolada, 9% para *DEF* isolada e 11% para *DEF*+RAA, com resultados finais de 35,2 GPa, 32,5 GPa e 33,8 GPa, respectivamente.

Pela análise de variância (APÊNDICE K), perceberam-se variações significativas dos dados, em todas as condições e idades de controle para o CP IV, evidenciando nesse caso, o crescimento da propriedade mecânica (módulo) ao longo do tempo.

Para a condição RAA isolada com o CP V (FIGURA 4.38), o comportamento ao longo do tempo foi similar ao descrito para as amostras referência e para as combinações com o CP IV, apresentando crescimento de 7%, atingindo 32,8 GPa. Os dados individuais foram analisados quanto à sua variância, e apresentaram diferenças não-significativa entre 28 e 365 dias.

Para os traços utilizando CP V, na condição *DEF* isolada e *DEF* + RAA, até os 365 dias, também não foram identificadas reduções significativas nessa propriedade, partindo de 25,6 GPa para 23,1 GPa e de 26,3 GPa, para 25,6 GPa, respectivamente.

Apesar de visualmente ser atribuída uma redução a partir dos 91 dias na condição *DEF* isolada (FIGURA 4.39), as análises de variância não indicaram diferenças significativas entre 28 e 365 dias.

#### 4.2.2.2 Concreto

Da FIGURA 4.41 até a FIGURA 4.43 estão apresentados os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dos CPs de concreto.

FIGURA 4.41 – Resultados de módulo de elasticidade estático, concreto – RAA isolada.

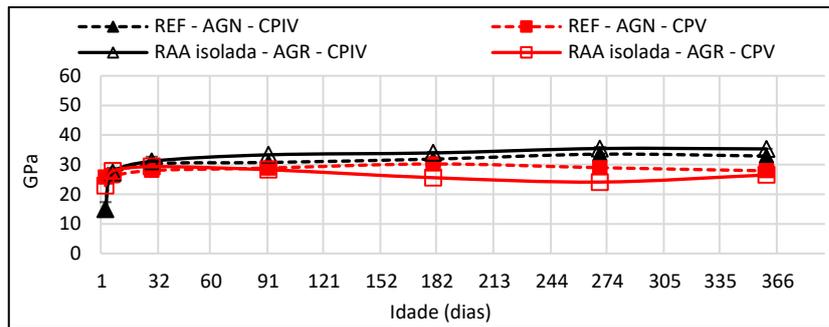


FIGURA 4.42 – Resultados de módulo de elasticidade estático, concreto – DEF isolada.

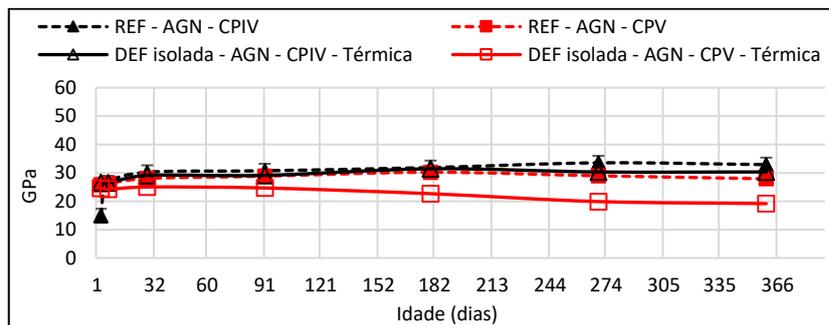
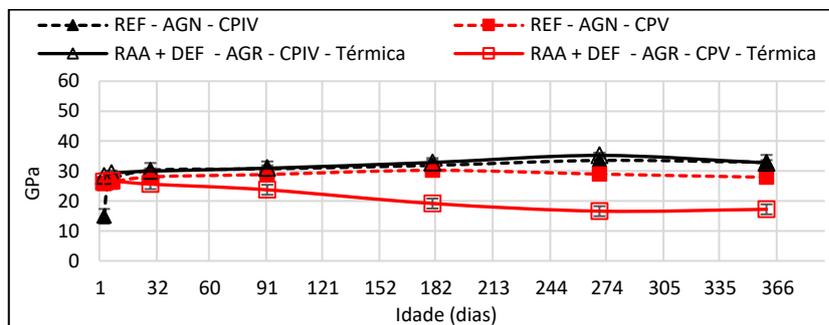


FIGURA 4.43 – Resultados de módulo de elasticidade estático, concreto – DEF + RAA.



A condição referência com CP IV, apresentou crescimento constante do módulo de elasticidade estático ao longo do tempo, sendo 8 % dos 28 aos 365 dias, quando foi obtido o resultado de 32,9 GPa. Já, a condição referência com CP V, apresentou resistência final aos 365 dias, praticamente, igual à obtida aos 28 dias, permanecendo na faixa de  $(28,0 \pm 0,5)$  GPa.

Pelas combinações com CP IV também foram observados crescimentos do módulo de elasticidade entre as idades de 28 e 365 dias, sendo de 12% para a condição de estudo da RAA isolada, 4% para a DEF isolada e 8 % para a DEF+RAA, com resultados finais de 35,3 GPa, 30,4 GPa e 32,7 GPa, respectivamente. Pela análise de variância (APÊNDICE K), perceberam-se diferenças não-significativas dos

dados, com exceção à idade de 365 dias, na condição RAA isolada, onde foi identificado o crescimento da propriedade na referida data.

Para a condição RAA isolada com CP V (FIGURA 4.41), foi verificada redução do módulo de elasticidade ao longo do tempo, dos 28 aos 365 dias, apresentando decréscimo de 10% (de 29,3 para 26,5 GPa). Os dados individuais foram analisados quanto à sua variância, e apresentaram diferença significativa.

Para os traços utilizando CP V, na condição *DEF* isolada e *DEF*+RAA, também foi verificada uma redução no módulo de elasticidade, (FIGURA 4.42 e FIGURA 4.43). A redução observada dos 28 aos 365 dias foi de 23% e de 33%, respectivamente, ou de 25,0 GPa para 19,2 GPa, no caso da *DEF*, e de 25,6 GPa para 17,2 GPa, na condição *DEF*+RAA. Os resultados de variância (ANOVA), confirmaram a redução significativa, apresentando “Fcrítico” inferior ao “F” obtido (APÊNDICE K).

O comportamento mecânico medido ao longo do tempo foi similar ao evidenciado por diversos autores ao estudarem reações expansivas, entre eles Diamond (1996), Brunetaud (2005), Hasparyk (2005; 2011) e Shovanz (2019).

Os resultados de módulo de elasticidade obtidos, aliados aos seus respectivos comportamentos quanto à expansão ao longo do tempo, para as condições de *DEF* isolada e *DEF*+RAA com CP V, estiveram de acordo com os resultados apresentados por Sanchez *et al.* (2018) que citou para expansões ( $\geq 0,20\%$ ), a diminuição observada no módulo de elasticidade, para concretos atacados por reações expansivas, em torno de 20 a 50%. Nesta pesquisa, as expansões foram superiores a 0,30% e as reduções no módulo se situaram acima de 20%.

#### 4.2.2.3 Argamassa – Relação Módulo x Resistência à Compressão

Da FIGURA 4.44 até a FIGURA 4.47, estão apresentados os resultados de módulo de elasticidade estático, em conjunto com as resistências à compressão dos CPs de argamassa, ao longo do seu tempo de exposição.

FIGURA 4.44 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, argamassa – RAA. Isolada.

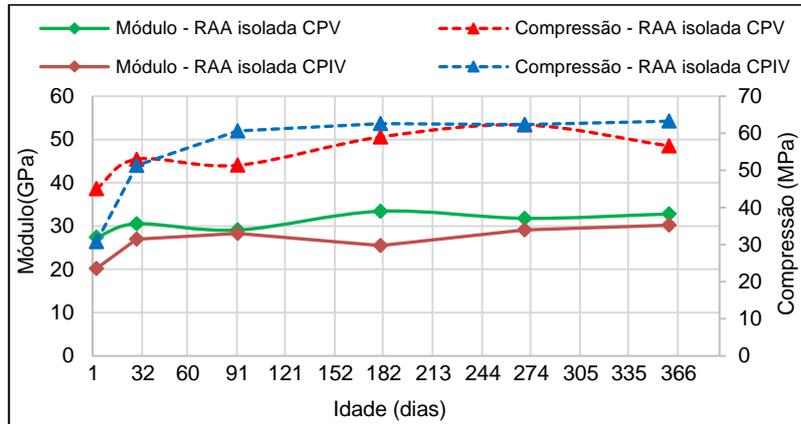


FIGURA 4.45 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, argamassa – DEF isolada.

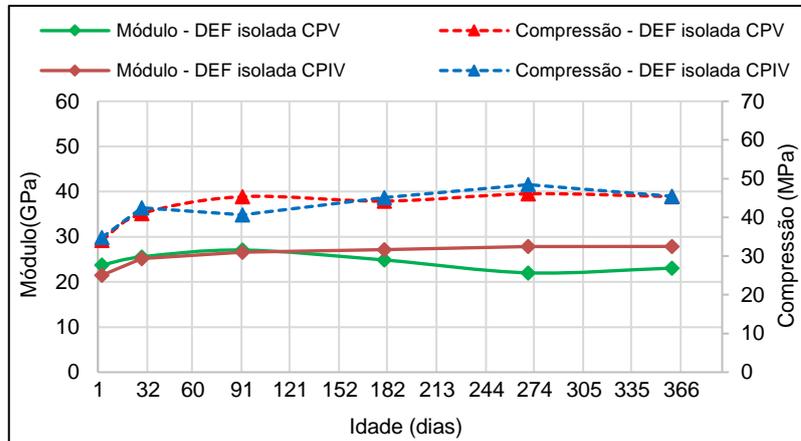


FIGURA 4.46 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, argamassa – DEF + RAA.

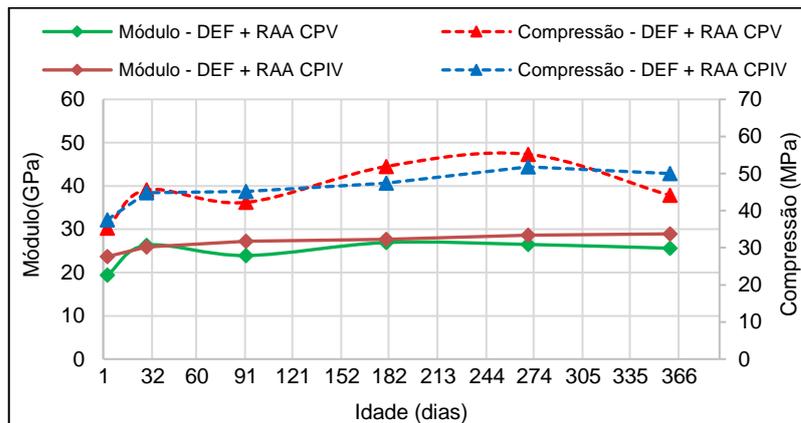
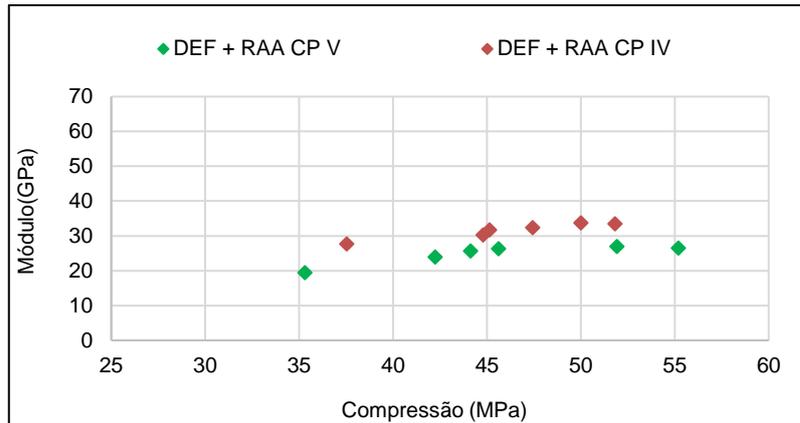


FIGURA 4.47 – Resistência à compressão versus módulo de elasticidade, argamassa – DEF + RAA.



Este tipo de representação combinada entre as grandezas mecânicas de módulo de elasticidade e resistência à compressão, teve por objetivo possibilitar a análise visual do comportamento ao longo do tempo, principalmente, facilitando inferir em qual idade as grandezas continuaram com crescimento ou decréscimo devido aos ataques expansivos.

Na FIGURA 4.44, para a condição RAA isolada, foi verificada uma estabilidade entre as curvas, conforme comentado anteriormente. Já, para a condição *DEF* isolada, FIGURA 4.45, foi possível notar uma redução do módulo a partir de 3 meses, porém, como também já comentado, após a realização das análises de variâncias entre os dados, os resultados mostraram não possuir diferenças quanto à sua variação entre 28 e 365 dias. Caso similar foi visualizado na FIGURA 4.46 para as argamassas na condição *DEF+RAA*. Na FIGURA 4.47 são demonstrados os mesmos resultados apresentados anteriormente para *DEF+RAA*, porém, cruzando os resultados de resistência à compressão com os de módulo de elasticidade. Esse tipo de gráfico permite reforçar a estabilidade dos valores de módulo de elasticidade mesmo com a evolução da resistência à compressão, conforme comentado anteriormente.

Com base no exposto, percebeu-se que até a idade de 365 dias, as propriedades mecânicas ainda não foram afetadas pelas reações químicas expansivas, seja a RAA ou a *DEF*, isoladas ou combinadas. Possivelmente, nesse caso, os produtos neoformados, apesar de já serem visualizados em micrografias, ainda não começaram a ocasionar tensões internas passíveis de alterar a resistência mecânica da matriz cimentícia.

Para apoiar essa hipótese, cita-se Hasparyk (2011) e Sanchez *et al.* (2017) para o caso de RAA, Shovanz (2019) para a DEF e Martin *et al.* (2017) para as reações combinadas. Todos os pesquisadores citados mostraram reduções nas propriedades mecânicas, principalmente, no módulo de elasticidade, quando as reações expansivas atingiram valores de expansão (acima de 1,0%), correlacionados com a existência das tensões internas. Para o caso das argamassas, a máxima expansão obtida até a data de controle (1 ano), foi de 0,30%.

#### 4.2.2.4 Concreto – Relação Módulo x Compressão

Da FIGURA 4.48 até a FIGURA 4.51, estão apresentados os resultados de módulo de elasticidade estático, em conjunto com as resistências à compressão dos CPs de concreto, ao longo do seu tempo de exposição.

FIGURA 4.48 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, concreto – RAA isolada.

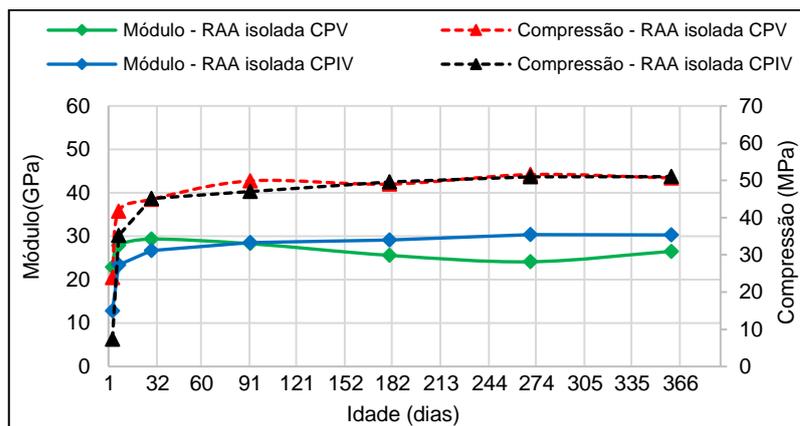


FIGURA 4.49 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, concreto – DEF isolada.

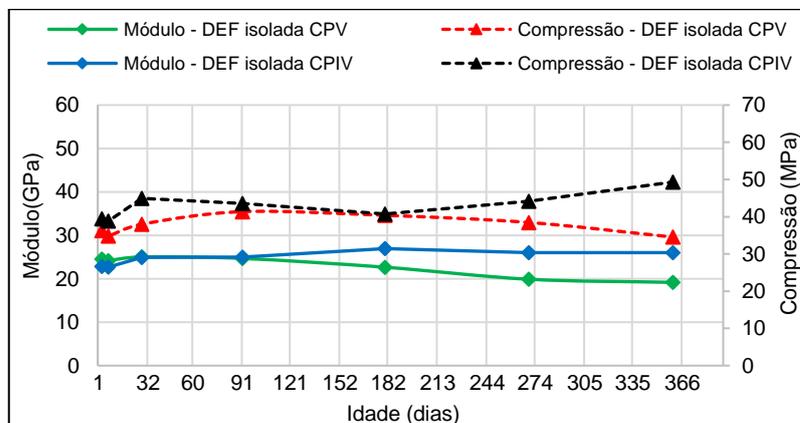


FIGURA 4.50 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, concreto – DEF + RAA.

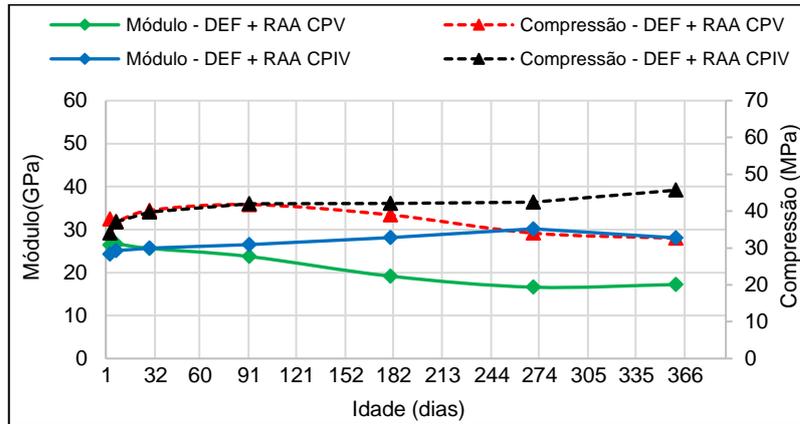
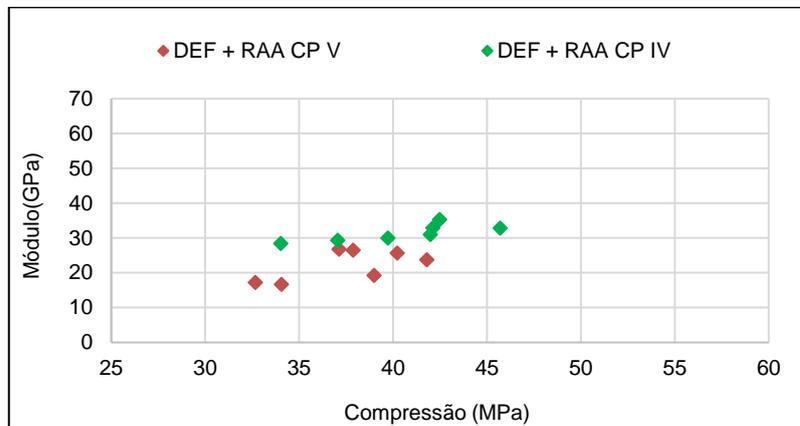


FIGURA 4.51 – Resistência à compressão versus módulo de elasticidade, concreto – DEF + RAA.



Assim, como citado anteriormente, na apresentação individual das propriedades, para as condições com CP IV, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade permaneceram constantes ou com taxa de crescimento de suas propriedades até os 365 dias (FIGURA 4.48 a FIGURA 4.50). Em relação à DEF, os resultados obtidos vêm de encontro com o exposto por Nguyen *et al.* (2013) e Leklou *et al.* (2016), com reduções das expansões pela adição de material pozolânico. Com relação à RAA, foram vários os autores que constataram a mitigação, ou pelo menos a postergação das ocorrências expansivas, utilizando cimentos com adição pozolânica, já sendo consagrado o seu uso (PAULON, 1981; ANDRIOLO, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2014; HASPARYK, 2005; 2011).

Para a condição RAA isolada, percebeu-se que a resistência à compressão aumentou de 28 a 365 dias (13%) e o módulo diminuiu, na proporção de (10%). Resultados coerentes com as referências anteriormente citadas, que mostraram o

crescimento na resistência à compressão no início das expansões e a redução do módulo de elasticidade, por ser o parâmetro mais sensível a este tipo de formação.

Para as condições *DEF* isolada e *DEF+RAA* com CP V (FIGURA 4.49 e FIGURA 4.50), foram observadas reduções nos valores para ambas as propriedades. A FIGURA 4.51 contém os mesmos resultados apresentados anteriormente para *DEF+RAA*, porém, cruzando os resultados de resistência à compressão com os de módulo. Nesse gráfico é nítida a redução de ambas as grandezas com o uso do CP V; já na presença do CP IV a variação é menor, conforme abordado anteriormente. Tais resultados estão em conformidade com a literatura (AL SHAMAA *et al.*, 2014; SANCHEZ, 2017; MARTIN, 2017; BARBOSA, 2018).

Da FIGURA 4.52 até a FIGURA 4.54 estão apresentadas correlações entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão obtidos para as condições estudadas, de maneira a comparar com o cálculo teórico estimado para a obtenção do módulo de elasticidade do concreto, com base no *fck* de projeto (ABNT NBR 6118, 2014), conforme EQUAÇÃO 10.

$$E_{Ci} = \alpha E 5600 \sqrt{fck} \quad \text{EQUAÇÃO 10}$$

Onde:

$E_{Ci}$  = Módulo de elasticidade tangente inicial estimado (MPa);

$\alpha E$  = Coeficiente relacionado ao agregado utilizado (Adotado para o granito: 1,0);

$fck$  = Resistência característica à compressão do concreto (MPa).

Para esta comparação, utilizou-se a resistência obtida individual dos corpos de prova ensaiados (*fcj*). A linha tracejada nos gráficos, mostra a posição dos valores para o módulo de elasticidade (eixo das ordenadas) com base no cálculo citado, em uma faixa de resistência à compressão de 10 a 55 MPa (eixo das abcissas).

Este tipo de comparação visa mostrar a relação entre os resultados de módulo de elasticidade obtidos experimentalmente e aqueles estimados com base na norma de projetos de estruturas de concreto (ABNT NBR 6118, 2014), porém, em se tratando de concretos atacados por reações expansivas. Em linhas gerais, a maioria dos dados não se aderiram bem à curva estimada para as condições estudadas nessa pesquisa.

Salienta-se que a curva teórica citada pela norma, refere-se a concretos na idade de 28 dias.

FIGURA 4.52 – Relação entre módulo e compressão, NBR 6118 – RAA isolada.

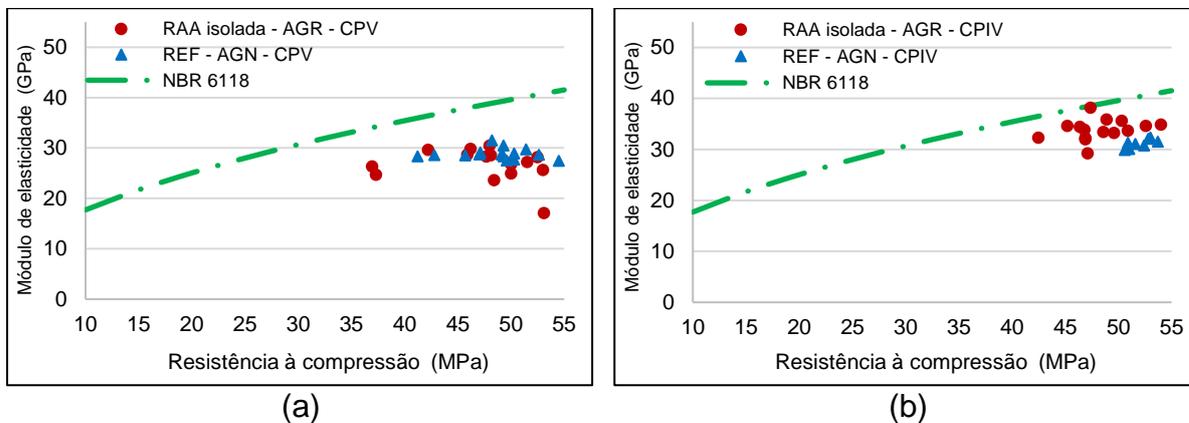


FIGURA 4.53 – Relação entre módulo e compressão, NBR 6118 – DEF isolada.

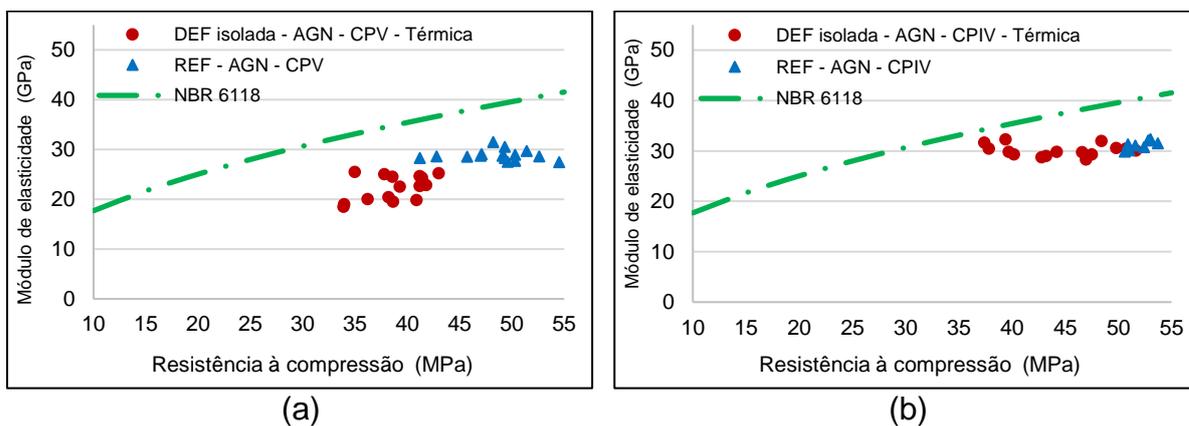
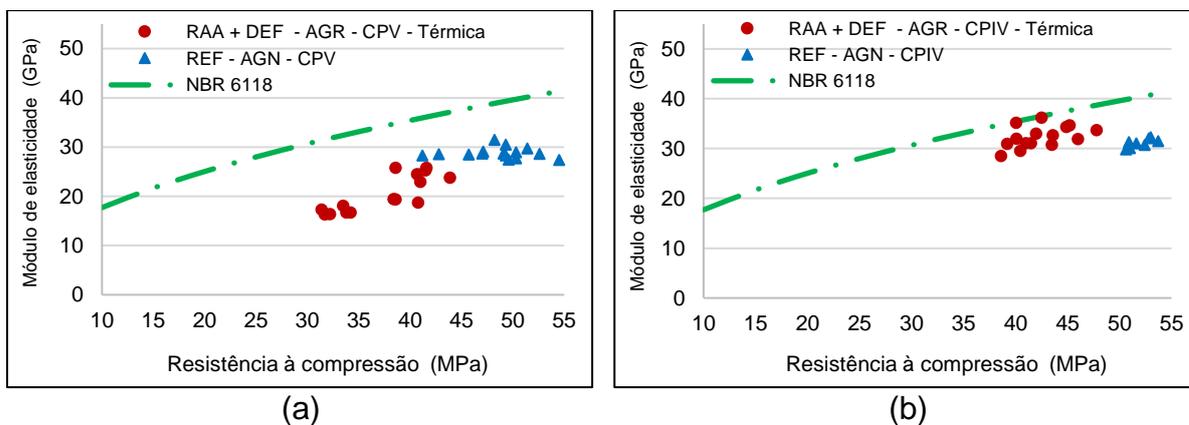


FIGURA 4.54 – Relação entre módulo e compressão, NBR 6118 – DEF + RAA.



Com base nos resultados obtidos, foi possível observar que praticamente todos os valores permaneceram abaixo da curva estimada.

Para as condições estudadas com o cimento CP IV (figuras identificadas com a letra (b) – “bolinha”), os dados tenderam a se aproximar da curva, coincidindo com as combinações menos atacadas, até 1 ano. Entretanto, nos mesmos gráficos, foram apresentados os resultados para a condição referência com o CP IV (“triângulo”), que apresentaram menor dispersão entre os dados, mas, corresponderam aos valores médios para o módulo de elasticidade, aproximadamente, 25% inferiores aos estimados com base na NBR 6118 (ABNT, 2014).

De qualquer modo, comparando-se a situação referência desse estudo com todas as condições de ataque avaliadas, os dados dos concretos atacados se encontram deslocados para a esquerda (FIGURA 4.52 a FIGURA 4.54), o que mostra que a propriedade resistência é menor para os concretos curados termicamente, fato esse já comentado e observado anteriormente, associados a menores valores de módulos de elasticidade.

#### 4.2.2.5 Argamassa – Módulo Estático x Módulo Dinâmico

Da FIGURA 4.55 até a FIGURA 4.57, estão apresentados os resultados de módulo de elasticidade estático, em conjunto com módulo de elasticidade dinâmico dos CPs de argamassa, ao longo do seu tempo de exposição. Este último, calculado com base nas dimensões dos CPs, sua densidade aparente, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e fazendo-se uso de um coeficiente de Poisson de 0,2, conforme metodologia apresentada na NBR 15630 (ABNT, 2009).

FIGURA 4.55 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, argamassa – RAA isolada.

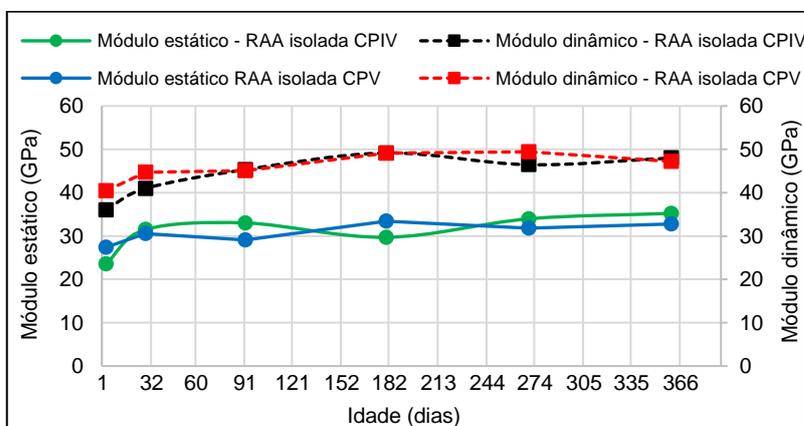


FIGURA 4.56 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, argamassa – DEF isolada.

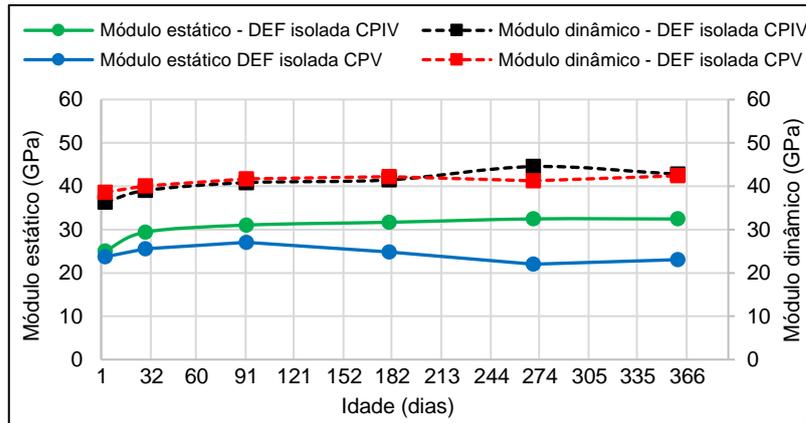
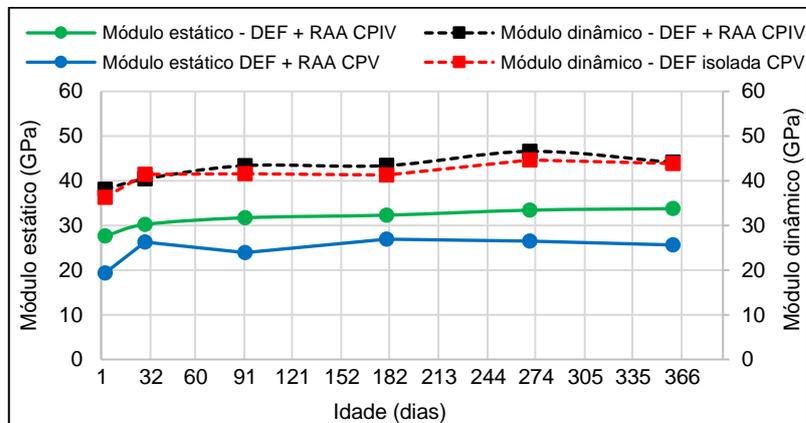


FIGURA 4.57 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, argamassa – DEF + RAA.



Para o caso das argamassas, como já apresentado anteriormente, os resultados de módulo de elasticidade estático, para todas as condições avaliadas, não apresentaram variações significativas até 365 dias de idade. Este fato também foi obtido para o módulo de elasticidade dinâmico, que tenderam a manter na apresentação gráfica linhas paralelas aos resultados obtidos para o método tangente inicial. Nguyen *et al.* (2019), citaram para os estudos em argamassa, que o módulo de elasticidade dinâmico, propriedades mecânicas e expansões são correlacionáveis.

#### 4.2.2.6 Concreto – Módulo Estático x Módulo Dinâmico

Da FIGURA 4.58 até a FIGURA 4.61, estão apresentados os resultados de módulo de elasticidade estático, em conjunto com módulo de elasticidade dinâmico para os CPs de concreto, ao longo do seu tempo de exposição. Este último calculado de maneira análoga ao descrito anteriormente para argamassas.

FIGURA 4.58 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, concreto – RAA isolada.

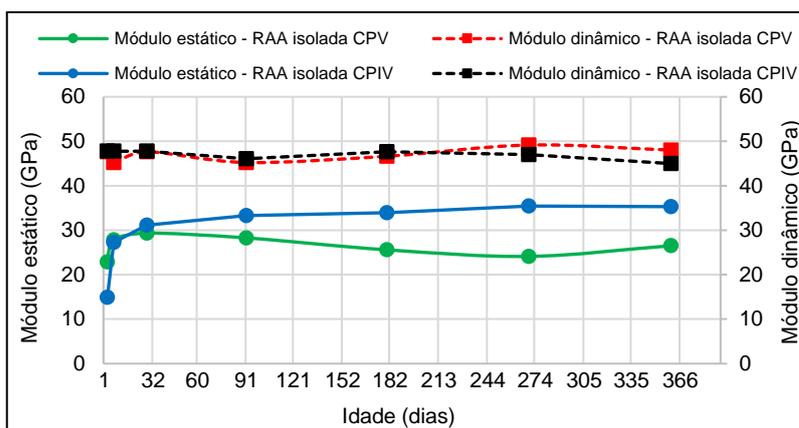


FIGURA 4.59 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, concreto – DEF isolada.

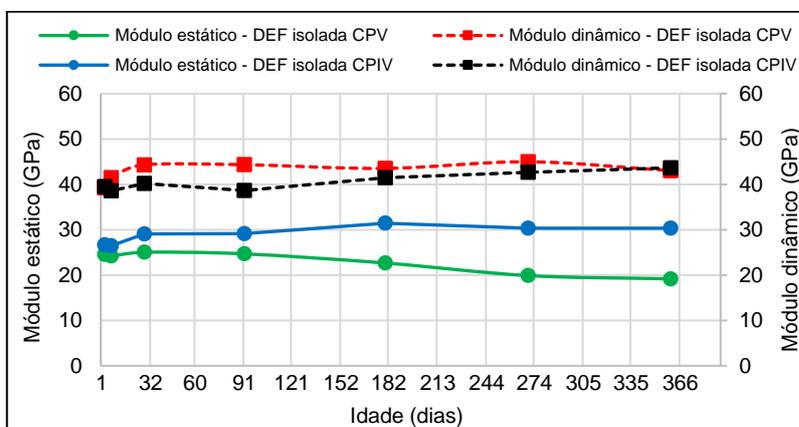
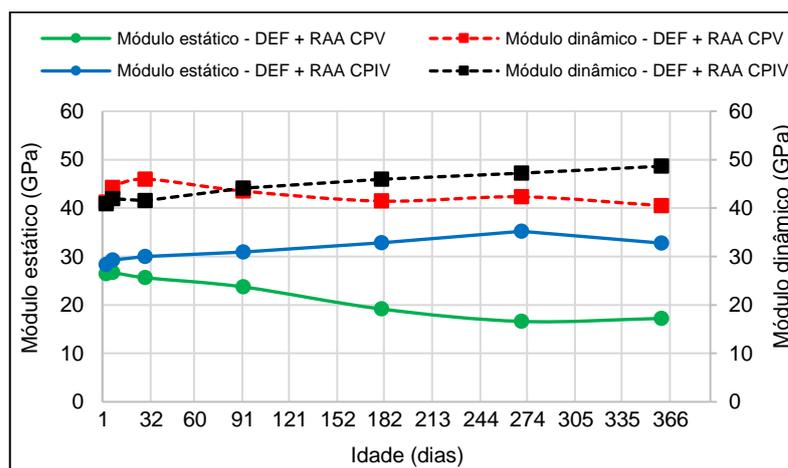


FIGURA 4.60 – Relação entre módulo estático e módulo dinâmico, concreto – DEF + RAA.



Para os estudos em concreto, como os resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático, apresentaram decréscimo ao longo do tempo, a correlação com

o módulo de elasticidade dinâmico foi ainda mais evidente, em comparação às argamassas.

As condições com CP IV, apresentaram aumento para o módulo de elasticidade estático ou tenderam à estabilização ao longo do tempo, fato também verificado para o módulo dinâmico, com exceção à condição RAA isolada na idade de 365 dias, que pela análise de variância, apresentou decréscimo significativo.

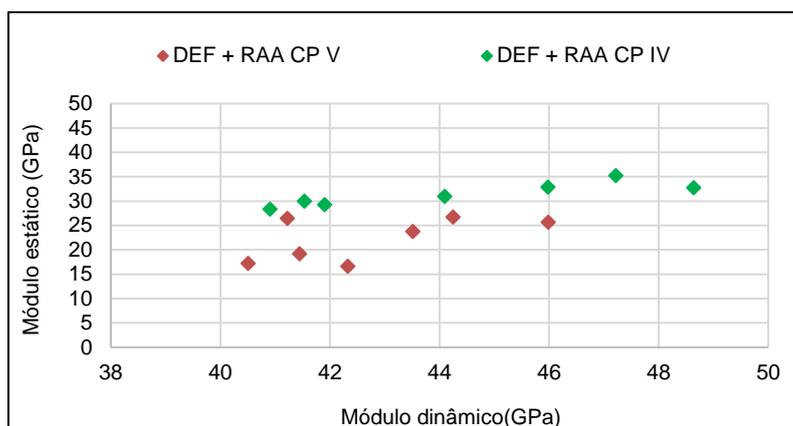
Para a condição RAA isolada com CP V (FIGURA 4.58), foi verificada a redução do módulo de elasticidade estático ao longo do tempo, dos 28 aos 365 dias, apresentando decréscimo de 10%. Já, para o módulo dinâmico, os valores não apresentaram variação, conforme análise estatística (ANOVA). Este resultado corrobora com os apresentados por Amine *et al.* (2017), que constataram a diminuição do módulo dinâmico a partir de expansões de (0,10%) a (0,20%). Neste caso, a expansão aos 365 dias foi menor, de 0,06%.

Para a condição DEF isolada (FIGURA 4.59), que apresentou aos 365 dias expansão de 0,37%, o módulo estático teve redução de 23% (dos 28 aos 365 dias). Já, para o módulo de elasticidade dinâmico, foi verificada uma menor redução, de 3%, e pela análise por ANOVA, essa redução foi considerada não-significativa entre as idades citadas.

Para a condição DEF+RAA (FIGURA 4.60), que apresentou aos 365 dias expansão de 0,43%, o módulo estático teve redução de 33% (dos 28 aos 365 dias). Para o módulo dinâmico, a redução foi de 12% para a mesma condição e idade.

No gráfico da FIGURA 4.61 se observa coerência do módulo dinâmico (dados obtidos por ultrassom) em relação ao estático, na presença do CP IV. Ou seja, à medida que o módulo dinâmico aumenta o estático também aumenta. Já na presença do CP V não foi possível observar o mesmo comportamento; apenas acima de valores de 25 GPa em termos de módulo estático, que se verifica uma tendência de proporcionamento entre as duas propriedades.

FIGURA 4.61 – Módulo dinâmico versus módulo estático, concreto – DEF + RAA.



Vários autores apontam para relações significativas entre o módulo de elasticidade estático e o dinâmico, este último, calculado a partir da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Entre eles, Hasparyk (2005), que obteve valores de módulo de elasticidade secante estático, entre 30 e 40% do módulo dinâmico, calculado para concretos atacados pela RAA. Na presente pesquisa, a relação para a condição RAA foi superior, com proporção de 55% analisando os resultados de 365 dias de idade. Já para a *DEF* e o ataque combinado (*DEF+RAA*), a relação foi inferior, cerca de 44%, na presença do cimento CP V. Por outro lado, para os concretos contendo o CP IV, as relações são bem superiores, sendo de 78%, 70% e 67%, respectivamente, para as condições RAA, *DEF* e *DEF+RAA*.

Amine *et al.* (2017), afirmaram que o módulo dinâmico de concreto não tratado termicamente foi ligeiramente maior do que os concretos tratados termicamente e, para os concretos não-expansíveis (sem reações expansivas), a resposta do módulo dinâmico mostrou um aumento mais lento. Resultados similares a esta pesquisa, tomando como base a idade de 365 dias para o CP V, a condição RAA isolada (sem cura térmica), apresentou módulo dinâmico de 48,0 GPa, a *DEF* isolada, 43,0 GPa e a *DEF+RAA*, 40,5 GPa.

#### 4.2.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados de resistência à tração foram realizados somente para os CPs de concreto. Da FIGURA 4.62 à FIGURA 4.64 se encontram apresentados os resultados médios de resistência à tração obtidos. Para essa propriedade, os ensaios ocorreram apenas até 270 dias

FIGURA 4.62 – Resultados de resistência à tração, concreto – RAA isolada.

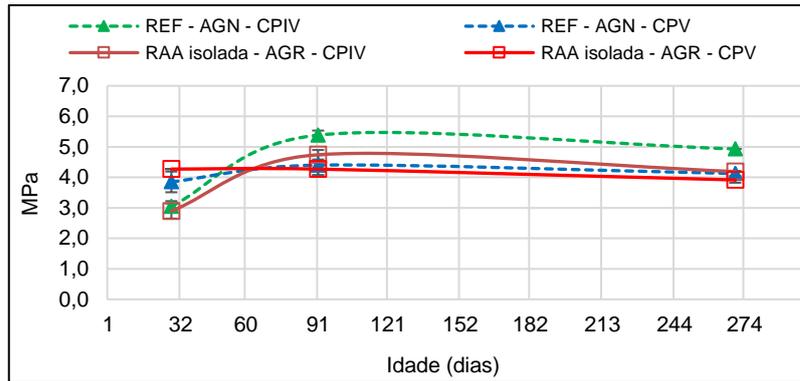


FIGURA 4.63 – Resultados de resistência à tração, concreto – DEF isolada.

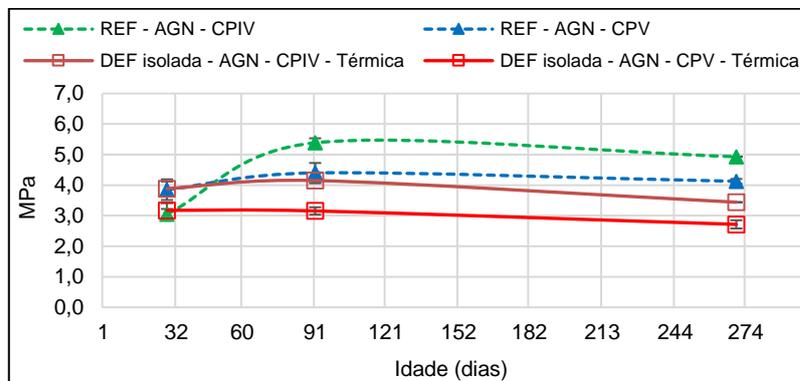
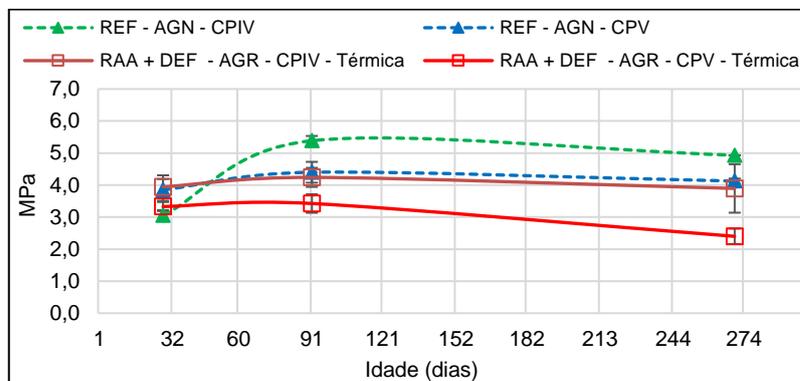


FIGURA 4.64 – Resultados de resistência à tração, concreto – DEF + RAA.



As condições referência com CP IV e CP V, apresentaram crescimento constante de suas resistências à tração, sendo de 37% e 5% respectivamente, em relação às idades de 28 e 270 dias (única propriedade determinada somente até os 270 dias). A resistência final para o CP IV foi de 4,90 MPa e 4,10 MPa, para o CP V.

As combinações com CP IV apresentaram comportamento distinto entre as idades de 28 e 270 dias, sendo observado o crescimento de 31% para a RAA isolada,

uma redução de 13% para *DEF* isolada e dos 91 dias aos 270 de 7% para *DEF+RAA*, com resultados finais de 4,20 MPa, 3,40 MPa e 3,90 MPa, respectivamente.

Para a condição *RAA* isolada com CP V (FIGURA 4.62), o comportamento ao longo do tempo mostrou uma redução de 9%, dos 91 aos 270 dias, atingindo 3,90 MPa. Os dados individuais foram analisados quanto a sua variância, e apresentaram diferença não-significativa quando comparados os resultados de 28 e 270 dias.

Para a condição *DEF* isolada com CP V (FIGURA 4.63), o comportamento ao longo do tempo mostrou uma diminuição de 16% dos 91 aos 270 dias, partindo de 3,20 MPa e atingindo 2,70 MPa. Os dados individuais foram analisados quanto a sua variância, e também apresentaram diferença não-significativa quando comparados os resultados de 28 e 270 dias.

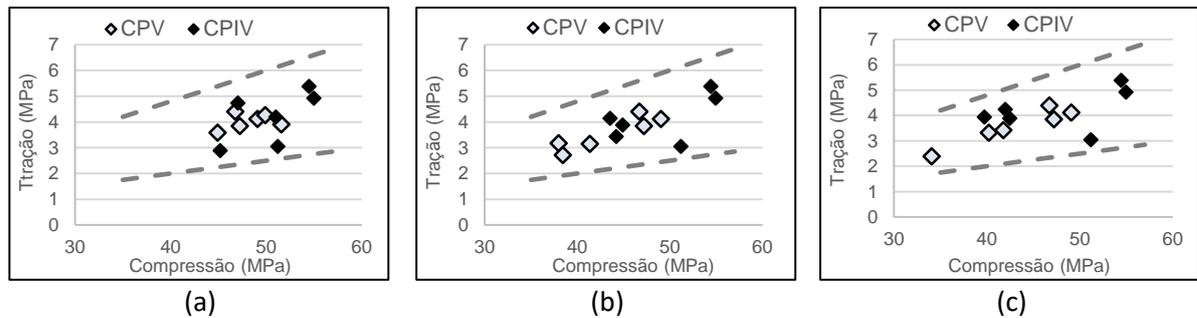
Já, para a *DEF+RAA* (FIGURA 4.64), percebe-se uma queda representativa para o cimento CP V, na faixa de 30%, com resultado aos 90 dias de 3,4 MPa, passando aos 270 dias a 2,4 MPa

Apesar de existirem somente resultados até os 270 dias para a resistência à tração, percebeu-se uma redução desta propriedade na maioria dos casos analisados. Tal resultado corroborou com o citado por Sanchez *et al.* (2018), sendo a resistência à tração um dos parâmetros mais sensíveis na avaliação de concretos atacados por reações químicas expansivas, devido à fragilidade da matriz interna do concreto, em especial o contato pasta x agregados, em consequência às tensões internas geradas por produtos de reação.

Na FIGURA 4.65, estão apresentadas as combinações gráficas entre a resistência à compressão e à tração para cada condição analisada, utilizando os dois tipos de cimento juntos, com os dados médios das referências e condições atacadas, nas idades de 28, 91 e 270 dias. Dos resultados analisados, pode-se concluir que as reações químicas expansivas promoveram um comportamento semelhante entre elas. A resistência à tração teve valores de 5 a 12% da resistência à compressão (valores limitados pelas linhas tracejadas). Os resultados foram semelhantes aos obtidos em testemunhos de concreto atacados por *RAA* (5 a 10%), segundo Hasparyk *et al.* (2004). Nas condições de ataque envolvendo a *DEF* (*DEF* isolada e *DEF+RAA*), as

relações, em geral, são menores na presença do cimento CP V ao ser comparado com o CP IV, indicando maior vulnerabilidade da resistência à tração por esse fenômeno patológico.

FIGURA 4.65 – Resistências à tração e à compressão: (a) RAA isolada; (b) DEF isolada; (c) RAA+DEF.



Interessante comentar que mesmo para concreto armado, segundo estudos apresentados por Karthik *et al.* (2016), a resistência à tração e à compressão foram alteradas numa condição de ataque combinado (RAA+DEF).

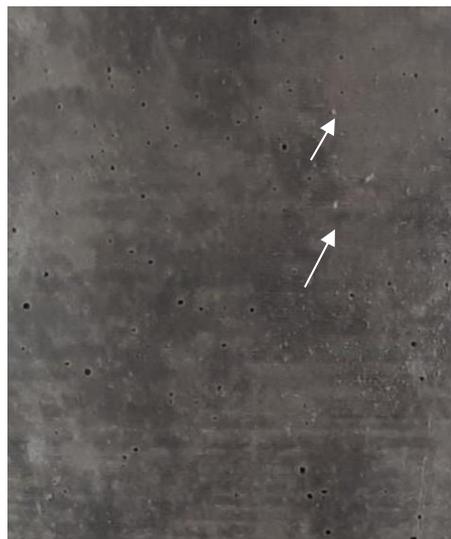
#### 4.2.4 Análise visual

Na FIGURA 4.66 está mostrada uma análise visual das argamassas aos 365 dias, sendo uma verificação importante para validar os resultados obtidos pelas técnicas microscópicas e ensaios físicos e mecânicos. Em (a e b) foram apresentadas as condições RAA isolada com CP IV e CP V, respectivamente. Para ambos, foram visualizados na data final de controle, poucos poros preenchidos com material esbranquiçado, que remetem aos produtos de reação. Na FIGURA 4.66 (c), está ilustrada a condição DEF isolada com CP IV, onde perceberam-se poros vazios, praticamente, sem poros preenchidos. Já, em (d), referente a DEF com CP V, foi observada a grande quantidade de material esbranquiçado no interior dos poros, pelo que se pode inferir pelas neoformações visualizadas em grande volume nas micrografias. Comportamento similar ao visualizado para a DEF isolada, foi verificado para a condição DEF+RAA. Em (e), referente à mistura com CP IV, foram constatados poros preenchidos em quantidade reduzida, ao ser comparado com a imagem (f), que mostrou a mesma condição com CP V.

FIGURA 4.66 – Análise visual argamassas



(a) Argamassa – RAA isolada CP IV - 365d



(b) Argamassa – RAA isolada CP V - 365d



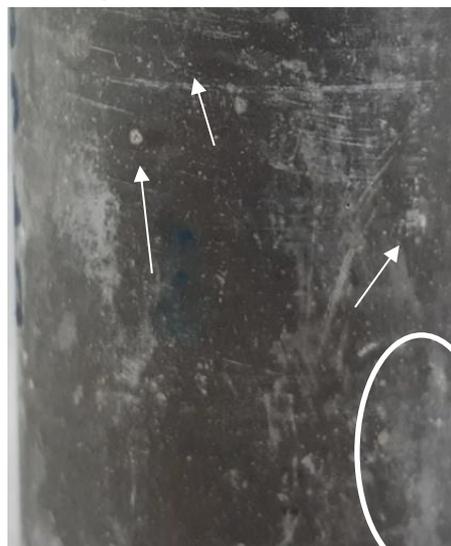
(c) Argamassa – DEF isolada CP IV - 365d



(d) Argamassa – DEF isolada CP V - 365d



(e) Argamassa – DEF+RAA CP IV - 365d



(f) Argamassa – DEF+RAA CP V - 365d

Da mesma maneira como foram apresentadas para as argamassas, a FIGURA 4.67 ilustra a análise visual das imagens coletadas dos corpos de prova aos 365 dias, neste caso, dos concretos. Em (a e b) foi visível a presença de material branco sobre a superfície do concreto, bem como no interior dos poros, seja para os CPs com CP IV ou CP V. Isso reforçou o fato já citado anteriormente, em que as reações expansivas, até os 365 dias de idade, pareceram mais pronunciadas nas amostras de concreto, em comparação com as argamassas, inclusive para a RAA, sendo que somente nesse material foi verificada a formação do gel. Em (c), para a condição *DEF* isolada com CP IV, praticamente não foram verificados pontos que remetesse às neoformações, diferente do observado para o mesmo tipo de ataque com CP V (d), onde foram visíveis as formações esbranquiçadas nos poros, no centro e próximo à superfície do corpo de prova. Em (e), para a *DEF* + RAA com CP IV, foram visualizadas formações esbranquiçadas em maior número em comparação com a condição *DEF* isolada, assim como, no caso das argamassas e, já em (f), para *DEF*+RAA com CP V, além de poros preenchidos, foram observados na superfície dos CPs as microfissuras, possivelmente ocasionadas pelas tensões internas geradas pelo ataque combinado. Tal característica é típica da manifestação patológica em estruturas de concreto atacadas, conforme reportado na literatura (HASPARYK, 2005; SANCHEZ *et al.*, 2018; GIANNINI *et al.*, 2018).

FIGURA 4.67 – Análise visual concretos



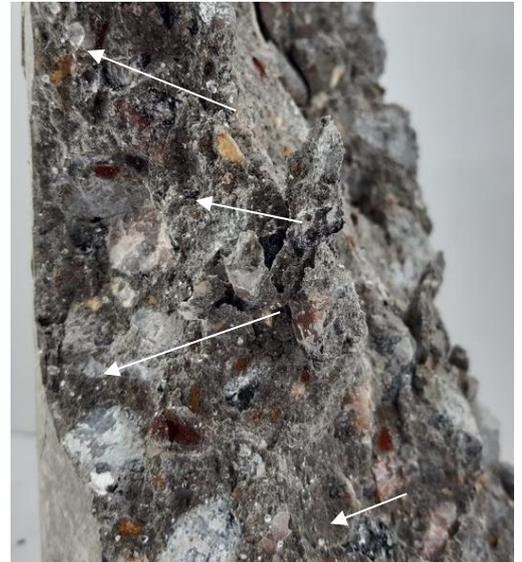
(a) Concreto – RAA isolada CP IV - 365d



(b) Concreto – RAA isolada CP V - 365d



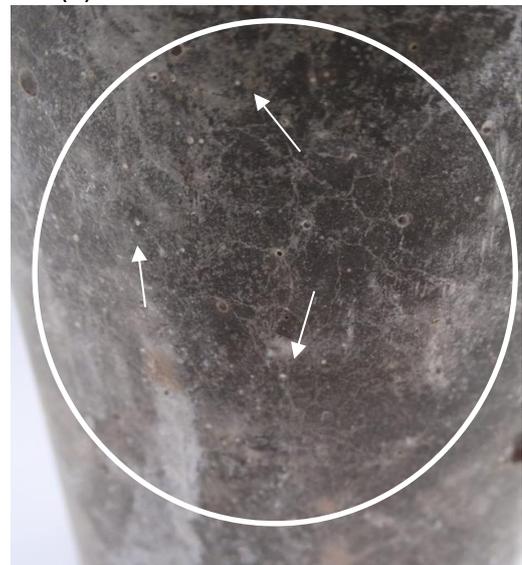
(c) Concreto – DEF isolada CP IV - 365d



(d) Concreto – DEF isolada CP V - 365d



(e) Concreto – DEF+RAA CP IV - 365d



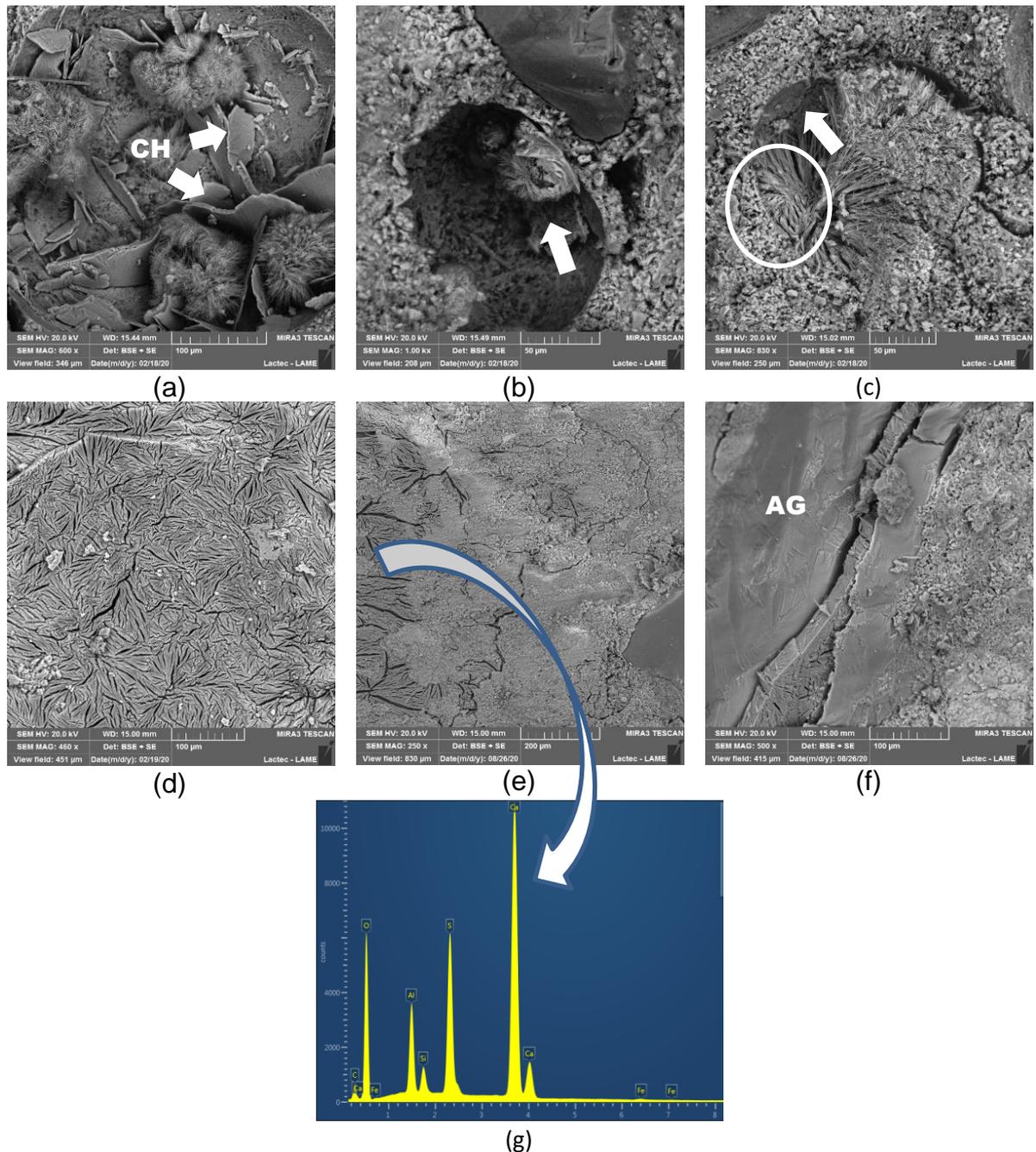
(f) Concreto – DEF+RAA CP V - 365d

### 4.3 MICROESTRUTURA

#### 4.3.1 MEV/EDS - Concreto

De maneira a identificar produtos neoformados, como cristais de etringita e gel exsudado na matriz dos concretos estudados, ao longo do tempo, foi realizada a análise de sua microestrutura por meio de MEV, com auxílio de EDS. As avaliações ocorreram nas idades 1, 3, 6 e 12 meses, para cada condição avaliada, com exceção da RAA isolada, que não houve análise no mês 1, uma vez que trata-se de uma reação química mais lenta, onde os produtos de reação se desenvolvem em idades mais avançadas (HASPARYK, 2011).

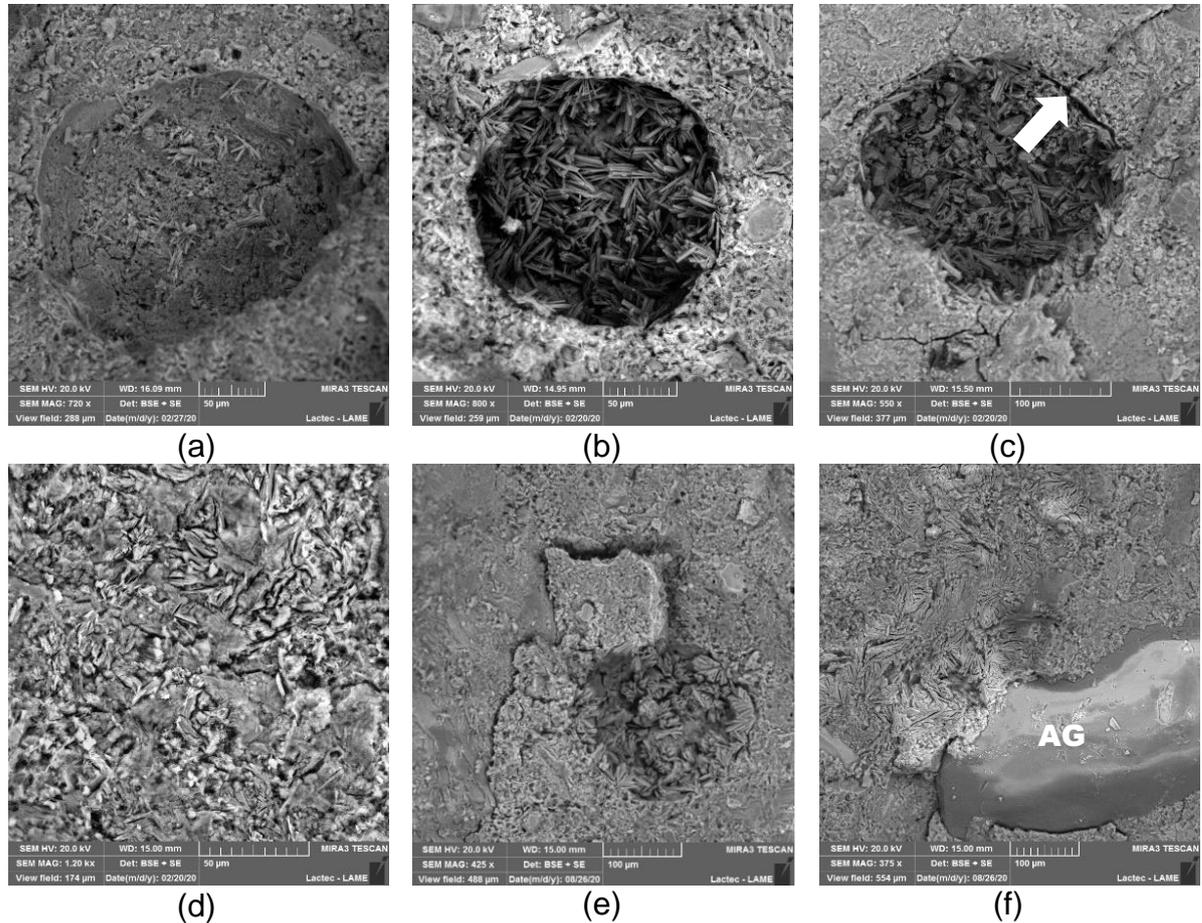
Na FIGURA 4.68 (a) e (b) referem-se à condição de estudo *DEF* isolada com CP V, aos 28 dias, onde verificou-se a presença de cristais aciculares da etringita primária e placas de hidróxido de cálcio – CH. Na FIGURA 4.68 (c) está apresentado um poro, aos 3 meses de idade, parcialmente preenchido com etringita comprimida, a qual também está cristalizada em direção à pasta, com início de microfissuração radial. Aos 6 meses de idades, já foi possível verificar a formação de etringita massiva espalhada pela matriz, como ilustrado na FIGURA 4.68 (d). Aos 12 meses, foi evidenciada a etringita massiva por toda a matriz cimentícia, inclusive na interface entre a pasta e o agregado, como apresentam as FIGURA 4.68 (e, f). Em (g), está apresentado em espectro referente à etringita observada na FIGURA 4.68 (e).

FIGURA 4.68 – MEV *DEF* isolada com CP V - idades de 1 a 12 meses.

Na FIGURA 4.69 (a) está registrado o concreto confeccionado com o CP IV, na condição *DEF* isolada aos 28 dias de idade. Observa-se um poro praticamente vazio, com alguns finos e poucos cristais aciculares similares aos da etringita primária. Porém, na FIGURA 4.69 (b), aos 3 meses, percebeu-se cristais de etringita também em interior de poro, com tendência ao seu preenchimento. Já, nas FIGURA 4.69 (c e d), 6 meses de idade do concreto com CP IV, foi possível constatar um poro quase totalmente preenchido por etringita, e com início de microfissuras radiais (c), além de neoformações espalhadas na matriz cimentícia (d). Na idade de 12 meses, foi possível

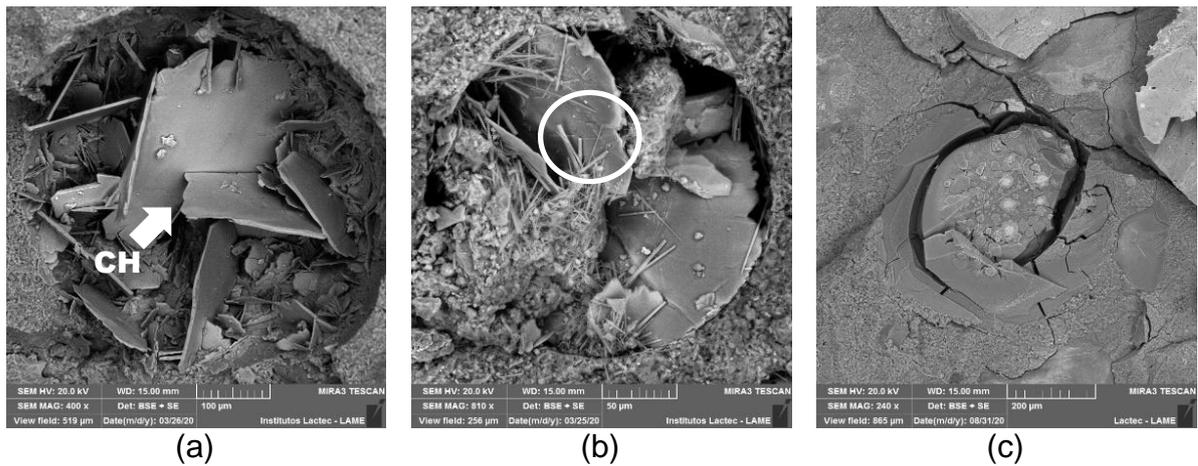
verificar um poro totalmente preenchido (e) além da presença da etringita massiva na matriz cimentícia e no contato entre a pasta e o agregado (f).

FIGURA 4.69 – MEV DEF isolada com CP IV - idades de 1 a 12 meses.



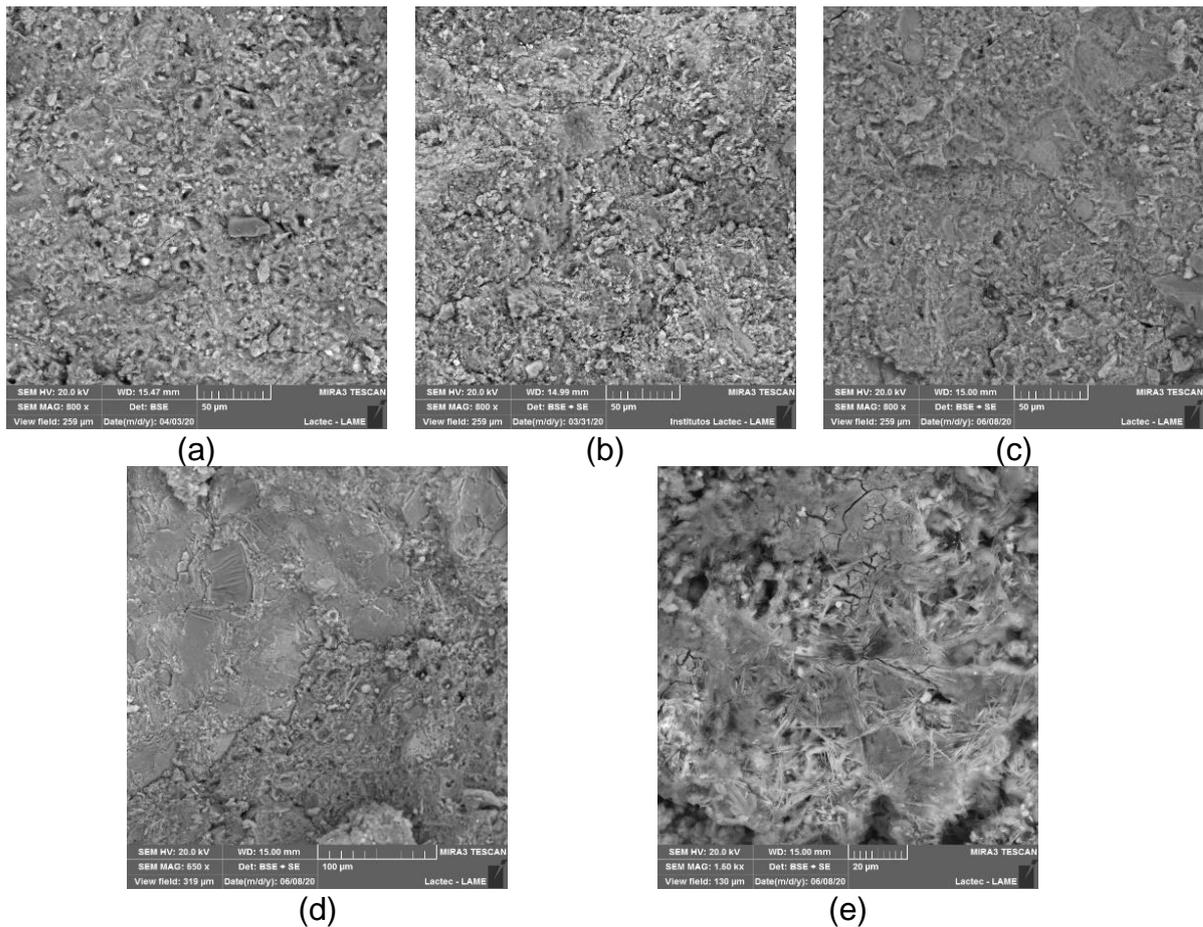
Em relação ao concreto com CP V na condição de estudo da RAA isolada, conforme mostrado na FIGURA 4.70 (a), aos 3 meses de idade identificou-se, apenas, os produtos normais de hidratação do cimento, como o hidróxido de cálcio, sem indícios de produtos de reações expansivas ou formações que remetessem à RAA. Na FIGURA 4.70 (b) está mostrado o interior de um poro aos 6 meses de idade, onde também se perceberam produtos oriundos do processo de hidratação do cimento, como agulhas aciculares similares ao da etringita primária e placas de CH, sem ainda indícios da RAA. Já, aos 12 meses, foi possível verificar o início da formação de gel da RAA, conforme FIGURA 4.70 (c), de composição sílico-cálcico alcalina, de acordo com as microanálises realizadas na região.

FIGURA 4.70 – MEV RAA isolada com CP V - idades de 3 a 12 meses.



Nas FIGURA 4.71 (a e b), estão representadas as condições da RAA isolada para o concreto com CP IV aos 3 e 6 meses de idade, respectivamente. Nas duas idades de análise, não foram identificados quaisquer indícios da formação da RAA. Os registros das micrografias das FIGURA 4.71 (c;d;e) representaram a microestrutura íntegra de amostras aos 12 meses, na qual também não foram verificados indícios da formação de reações expansivas relacionadas à RAA com o CP IV. A ausência desta reação está, provavelmente, condicionada à cinza volante e ao seu efeito pozolânico e mitigador.

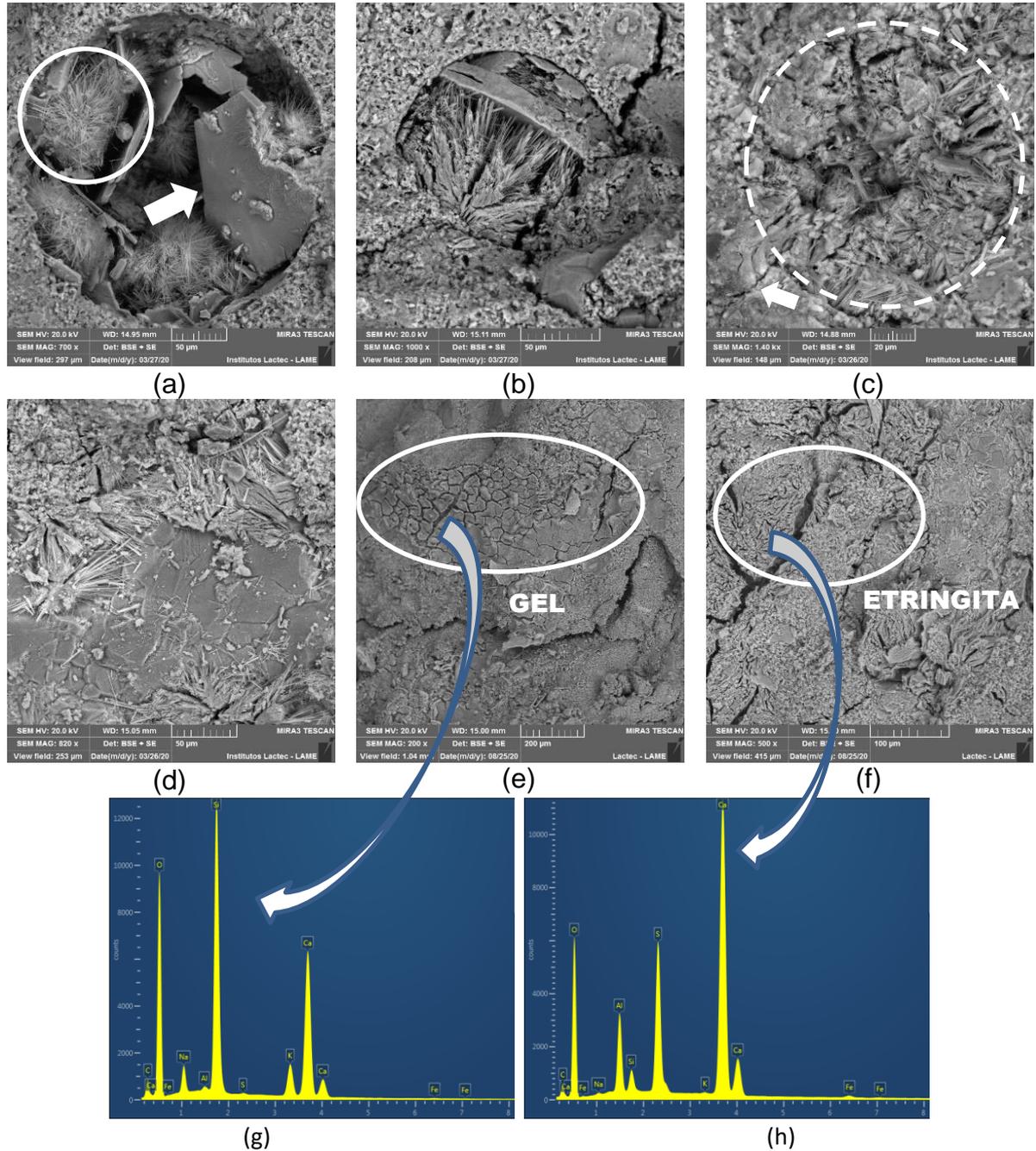
FIGURA 4.71 – MEV RAA isolada com CP IV - idades de 3 a 12 meses.



Registros das micrografias referentes ao concreto com CP V, na condição DEF+RAA estão mostrados na FIGURA 4.72. Na FIGURA 4.72 (a), contemplando as análises de 1 mês, está mostrado um poro com cristais aciculares finos, também, similares aos da etringita primária, bem como algumas placas de hidróxido de cálcio, ambos oriundos, provavelmente, dos processos de hidratação dos compostos cimentícios. Por outro lado, aos 3 meses de idade, conforme indicado na FIGURA 4.72 (b), a etringita massiva passou a ser identificada, com fissuras radiais ao poro do concreto, indicando, já nesta idade, a presença de reações químicas expansivas. Na FIGURA 4.72 (c) está apresentado um poro totalmente preenchido por etringita massiva (confirmada em microanálise por EDS), além da presença de microfissuração na base do poro (ver seta), aos 6 meses de idade. Em (d), nesta mesma idade, está mostrada uma micrografia com a presença de cristais de etringita tanto na matriz cimentícia como na superfície do agregado, e, principalmente, de microfissuras. Na idade de 1 ano (FIGURA 4.72 (e; f)), além da etringita secundária, foram ainda observados alguns géis procedentes da RAA, podendo-se inferir que nessa idade a reação conjugada passou a existir (DEF+RAA). Em (g), está apresentado espectro

referente ao gel de RAA identificado na FIGURA 4.72 (e) e em (h), cristais de etringita observados na FIGURA 4.72 (f).

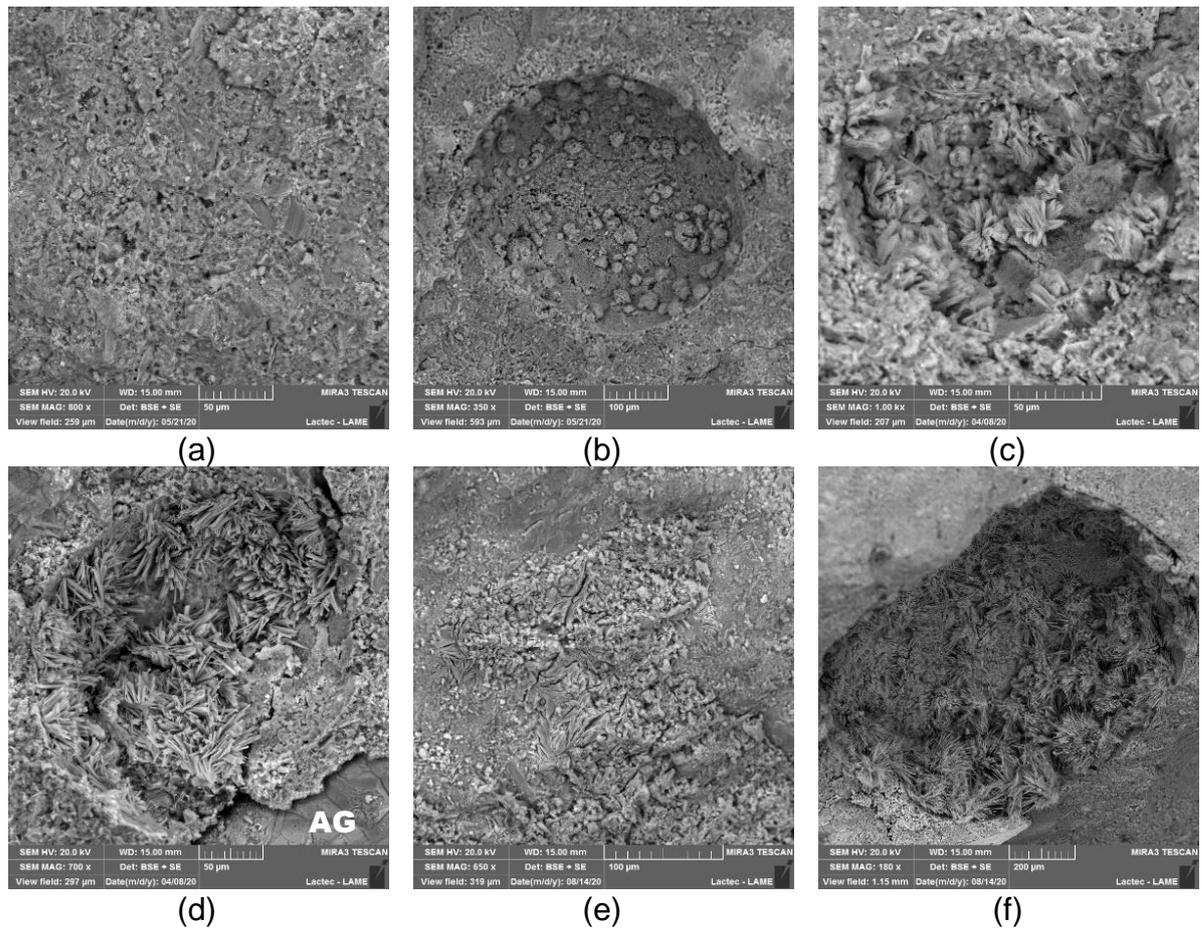
FIGURA 4.72 – MEV DEF + RAA com CP V - idades de 1 a 12 meses.



Nas FIGURA 4.73 (a e b) está apresentada a condição do concreto DEF + RAA com CP IV, aos 28 dias de idade. Foi possível verificar nessa idade uma pasta íntegra (a) e poros praticamente vazios (b). Na FIGURA 4.73 (c), que representa a idade de 3 meses, já foi possível identificar cristais iniciais da etringita no interior de poro. Aos 6 meses (imagem d), observou-se um avanço dessas neoformações tanto no interior

de poro como na matriz, próximo a uma partícula de agregado (AG). Nas FIGURA 4.73 (e-f) nas micrografias obtidas nas análises aos 12 meses indicaram poros preenchidos de deposições de cristais aciculares, além da presença de etringita massiva na matriz. Produtos da RAA não foram observados nessa condição, até a idade de 1 ano.

FIGURA 4.73 – MEV DEF + RAA com CP IV - idades de 1 a 12 meses.



Com o propósito de facilitar o entendimento a respeito das avaliações executadas nos concretos pelo MEV/EDS, na TABELA 4.1 são apresentadas, de forma escalar, as condições e idades que obtiveram os maiores índices em determinado aspecto, presença de etringita tardia ou gel de RAA, pelo sinal “+++” (três símbolos + sequenciais), e as que não obtiveram nenhuma ocorrência, foram demarcadas com as letras “N.O”. Os valores intermediários, são representados em ordem crescente de ocorrência por “+” e “++”.

TABELA 4.1 – Síntese geral dos resultados obtidos por MEV/EDS - Concretos.

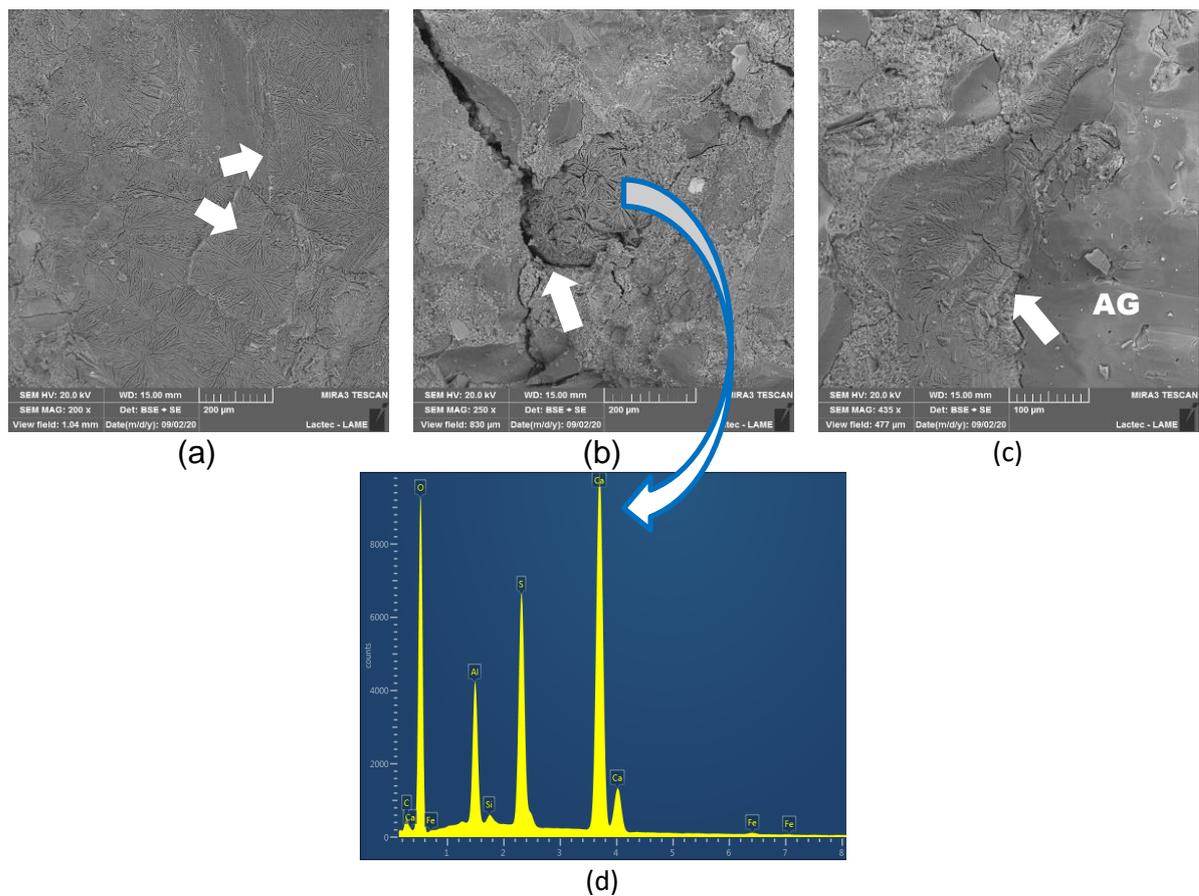
| Concreto          |           | Idade (meses) |     |     |     |
|-------------------|-----------|---------------|-----|-----|-----|
|                   |           | 1             | 3   | 6   | 12  |
| REF - CP V        | Etringita | N.O           | N.O | N.O | N.O |
|                   | Gel       | N.O           | N.O | N.O | N.O |
| REF - CP IV       | Etringita | N.O           | N.O | N.O | N.O |
|                   | Gel       | N.O           | N.O | N.O | N.O |
| RAA isolada CP V  | Gel       | N.O           | N.O | N.O | +   |
| RAA isolada CP IV | Gel       | N.O           | N.O | N.O | N.O |
| DEF isolada CP V  | Etringita | N.O           | +   | ++  | +++ |
| DEF isolada CP IV | Etringita | N.O           | +   | +   | ++  |
| DEF+RAA CP V      | Etringita | N.O           | ++  | +++ | +++ |
|                   | Gel       | N.O           | N.O | N.O | +   |
| DEF+RAA CP IV     | Etringita | N.O           | +   | ++  | ++  |
|                   | Gel       | N.O           | N.O | N.O | N.O |

Nota. N.O – Nenhuma ocorrência

#### 4.3.2 MEV/EDS – Argamassa

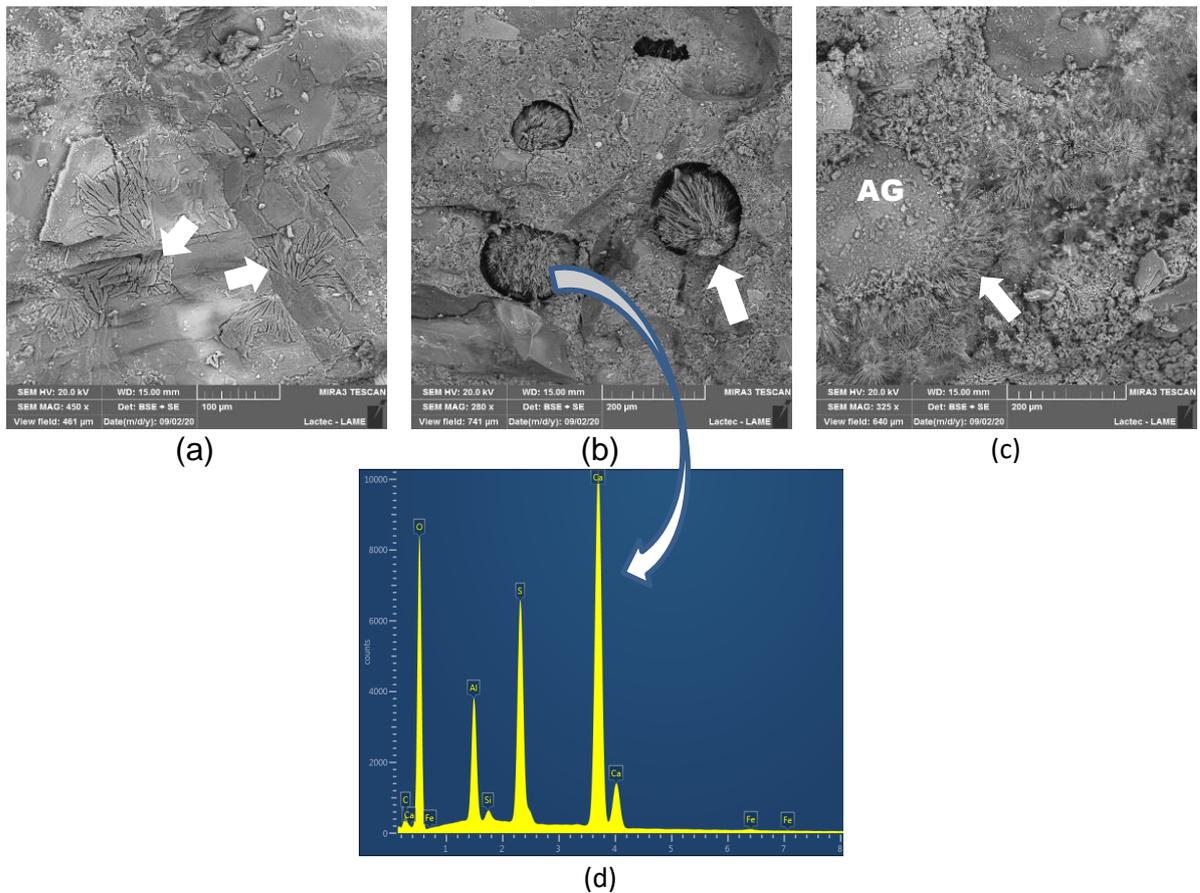
Da mesma maneira apresentada para os concretos, foi realizada a análise da microestrutura das argamassas estudadas, por meio de MEV, com auxílio de EDS, com o intuito de identificar produtos neoformados, como cristais de etringita e gel da RAA em sua matriz. Essas avaliações por MEV/EDS foram executadas apenas na idade final de controle, 12 meses, para cada condição avaliada em argamassa.

As FIGURA 4.74 (a), (b) e (c) referem-se à condição de estudo *DEF* isolada com o CP V. Em (a) está apresentada a formação de etringita massiva espalhada pela matriz, em (b), a etringita massiva preenchendo um poro, com fissuras radiais, indicando nesta idade a presença de reações químicas expansivas atreladas à *DEF*. Em (c), percebe-se a presença de etringita massiva na interface pasta/agregado (AG), além de alguns pontos fragilizados na matriz. Em (d), está apresentado um espectro referente à etringita massiva observada no poro da FIGURA 4.74 (b), característico em proporção e elementos químicos ao da etringita.

FIGURA 4.74 – MEV *DEF* isolada com CP V-ARI - idade de 12 meses.

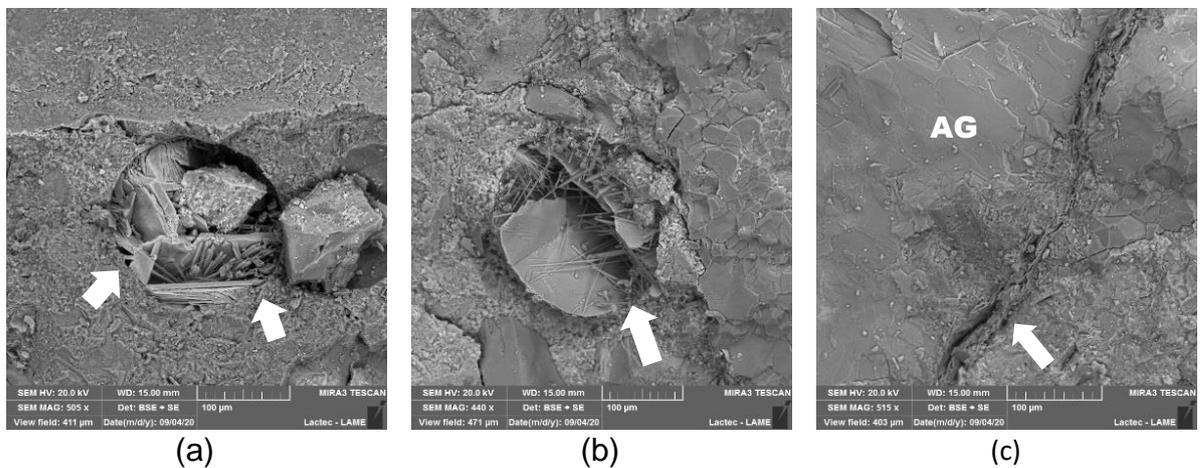
Nas FIGURA 4.75 (a), (b) e (c) referem-se à condição de estudo *DEF* isolada com CP IV, aos 12 meses de idade. Em (a) é possível identificar neoformações espalhadas na matriz cimentícia fragilizada, já, em (b), poros quase totalmente preenchidos por neoformações de etringita, e com início de microfissuras radiais. Em (c), observaram-se cristais de etringita na matriz cimentícia e no contato entre a pasta e o agregado. Em (d), está apresentado espectro referente à etringita observada no poro da FIGURA 4.75 (b).

FIGURA 4.75 – MEV DEF isolada com CP IV - idade de 12 meses.



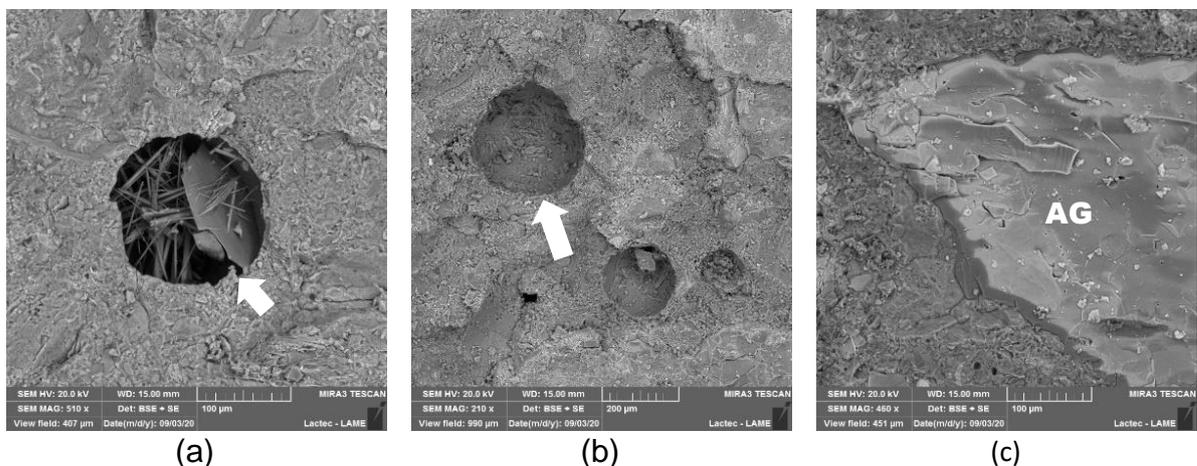
As FIGURA 4.76 (a), (b) e (c) referem-se à condição de estudo RAA isolada com CP V, aos 12 meses de idade. Em (a) e (b) foi possível identificar poros parcialmente preenchidos com produtos de hidratação do cimento e em (c) o contato entre agregado e pasta, mas, não foi possível identificar até 1 ano de idade indícios da formação da RAA em argamassa.

FIGURA 4.76 – MEV RAA isolada com CP V - idade de 12 meses.

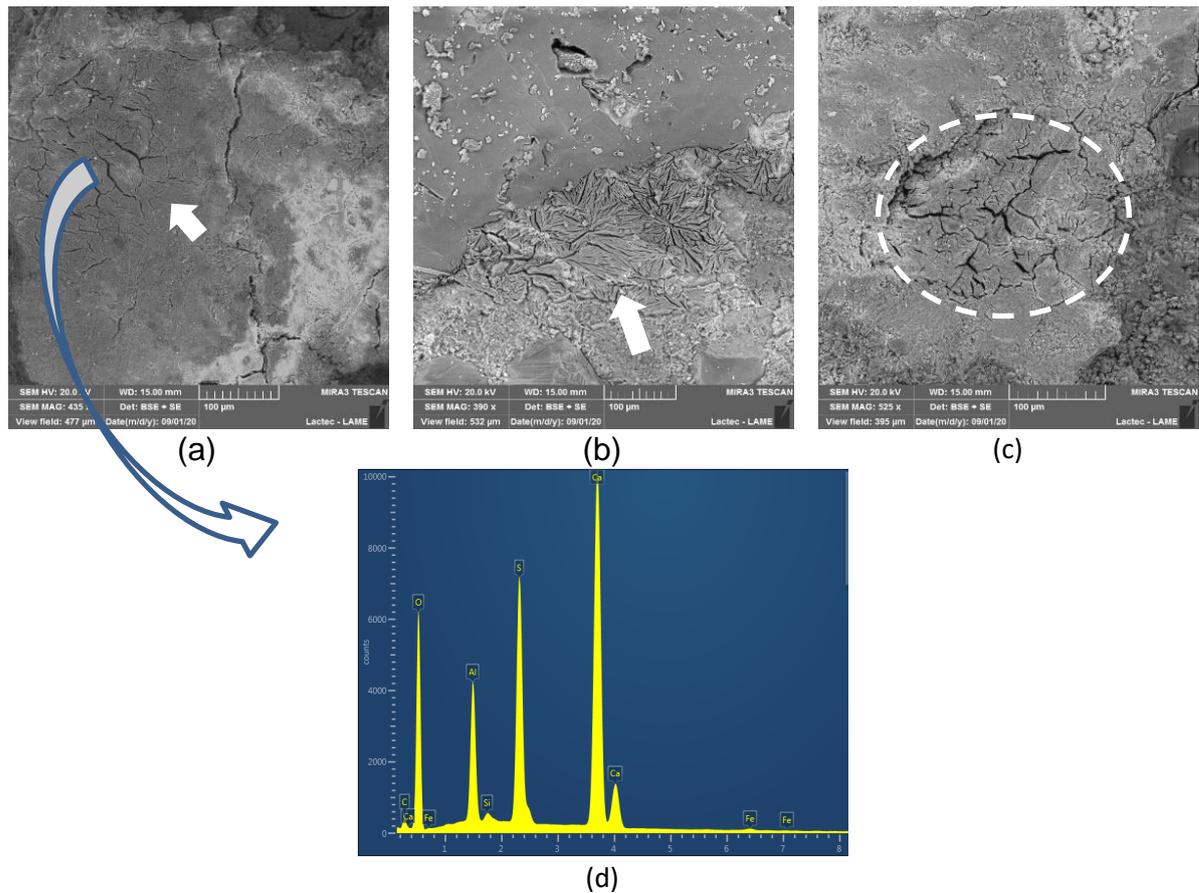


As FIGURA 4.77 (a), (b) e (c) referem-se à condição de estudo RAA isolada com CP IV, aos 12 meses de idade. Em (a) está apresentado um poro parcialmente preenchido, por produtos normais da hidratação do cimento. A micrografia (b) mostrou poros praticamente vazios e, em (c), uma zona de transição preservada, na qual também não foram verificados indícios da RAA até a data avaliada. Assim, como citado para o concreto estudado na mesma combinação, a ausência desta reação está, provavelmente, condicionada à presença da cinza volante e o seu efeito pozolânico e mitigador já conhecido.

FIGURA 4.77 – MEV RAA isolada com CP IV - idade de 12 meses.

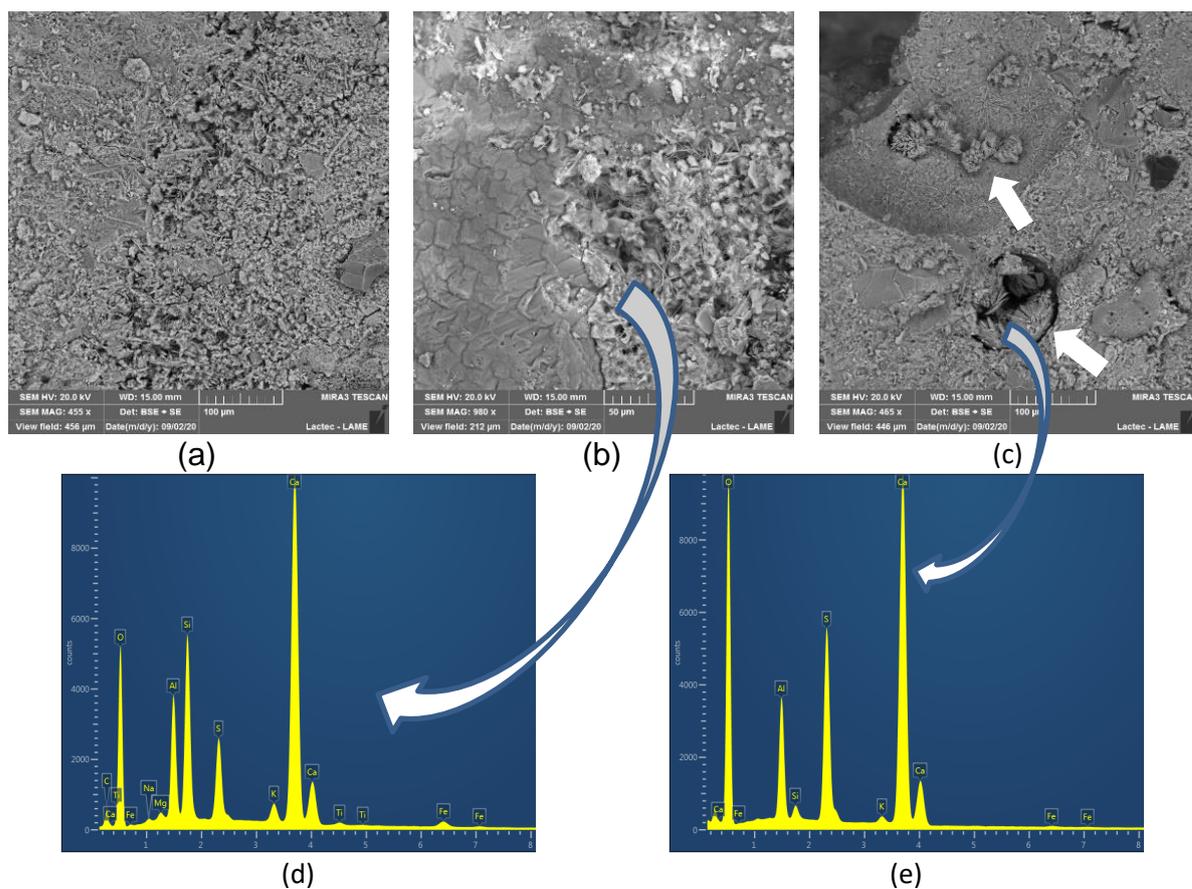


A FIGURA 4.78 (a), (b) e (c) refere-se à condição de estudo DEF+RAA isolada com CP V, aos 12 meses de idade. Em (a) e (b) foram identificados cristais de etringita massiva ao longo da matriz cimentícia. Já, em (c), está apresentado um poro completamente preenchido por etringita massiva, com fissuras radiais. Até a idade de 1 ano, para argamassas na condição DEF+RAA, não foram identificados indícios da presença de gel de RAA nas amostras analisadas. Na FIGURA 4.78 (d), está apresentado um espectro confirmando a presença de etringita massiva na matriz cimentícia (FIGURA 4.78 - a).

FIGURA 4.78 – MEV *DEF+RAA* com CP V - idade de 12 meses.

As FIGURA 4.79 (a), (b) e (c) referem-se à condição de estudo *DEF+RAA* com CP IV, aos 12 meses de idade. Nas FIGURA 4.79 (a e b) está mostrada uma matriz cimentícia íntegra, com a possível presença de monossulfatoaluminato, corroborada pelas microanálises realizadas por EDS (d). Na micrografia (c), percebeu-se um poro parcialmente preenchido com cristais aciculares de etringita, além de formações pontuais de etringita em outro poro da região de análise. Pode-se inferir que até a idade 1 ano, não foram constatadas formações expressivas que remetam às reações químicas expansivas deletérias nas argamassas avaliadas na condição *DEF+RAA* com CP IV. Em (e), está apresentado um espectro referente à etringita observada no poro da FIGURA 4.79 (c).

FIGURA 4.79 – MEV DEF+RAA com CP IV - idade de 12 meses.



De maneira análoga à apresentada anteriormente para as amostras de concreto, na TABELA 4.2 são apresentadas para as argamassas e de forma escalar, por meio de sinais consecutivos “+”, as ocorrências observadas de etringita tardia e gel de RAA, pela técnica de MEV/EDS, ao longo do tempo.

TABELA 4.2 – Síntese geral dos resultados obtidos por MEV/EDS – Argamassas.

| Argamassa         |           | Idade (meses) |     |     |     |
|-------------------|-----------|---------------|-----|-----|-----|
|                   |           | 1             | 3   | 6   | 12  |
| REF - CP V        | Etringita | N.O           | N.O | N.O | N.O |
|                   | Gel       | N.O           | N.O | N.O | N.O |
| REF - CP IV       | Etringita | N.O           | N.O | N.O | N.O |
|                   | Gel       | N.O           | N.O | N.O | N.O |
| RAA isolada CP V  | Gel       | N.O           | N.O | N.O | N.O |
| RAA isolada CP IV | Gel       | N.O           | N.O | N.O | N.O |
| DEF isolada CP V  | Etringita | N.O           | +   | ++  | +++ |
| DEF isolada CP IV | Etringita | N.O           | N.O | +   | ++  |
| DEF+RAA CP V      | Etringita | N.O           | +   | ++  | +++ |
|                   | Gel       | N.O           | N.O | N.O | N.O |
| DEF+RAA CP IV     | Etringita | N.O           | N.O | +   | +   |
|                   | Gel       | N.O           | N.O | N.O | N.O |

N.O – Nenhuma ocorrência

#### 4.3.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X, DRX

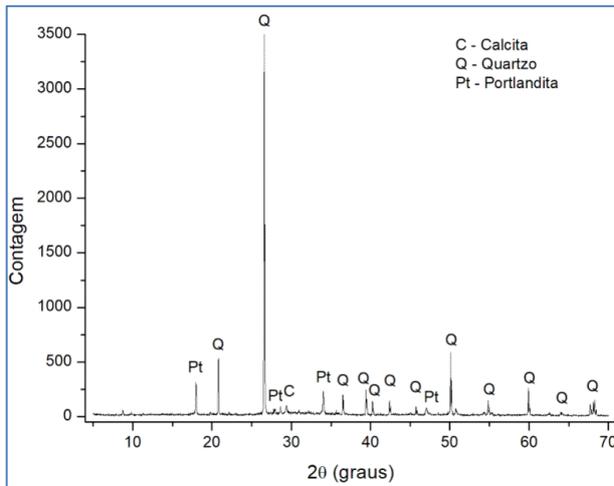
As avaliações por DRX da matriz cimentícia, de argamassas e concretos, foram realizadas de maneira a complementar à técnica de investigação por MEV/EDS, para identificar a presença dos produtos neoformados relacionados apenas às condições de ataque envolvendo a DEF (DEF isolada e DEF+RAA, combinadas), haja vista que o gel da RAA é, na sua maioria, amorfo não sendo detectado precisamente por meio desta técnica.

As principais fases químicas relacionadas à pasta de cimento hidratada encontradas no estudo por DRX das amostras selecionadas para análise corroboraram com os produtos visualizados durante as análises por MEV e EDS, e que estão registrados nas imagens micrográficas já apresentadas, como a Portlandita, nas idades iniciais e nas idades mais avançadas, em conjunto com a etringita. Já, a calcita, em virtude da não representatividade da análise do carbono, pelo EDS, seu composto só foi confirmado pelo DRX, porém, podendo estar presente nas superfícies de análise por MEV. Já as fases quartzo, feldspatos (alcalino e plagioclásio) e a mica

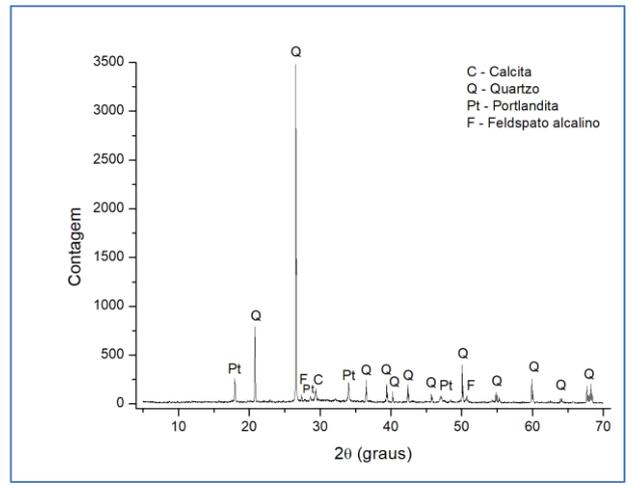
representam minerais constituintes dos agregados, e estão de acordo com os que foram empregados no estudo.

As fases químicas minerais cristalinas, identificadas na pasta pela técnica da difração de raios X ao longo do tempo, foram similares para os compósitos argamassa e concreto no presente estudo (APÊNDICE L). Para as condições utilizando o CP IV, não foi identificada a fase etringita pelo DRX até 1 ano de idade, provavelmente pela quantidade presente ser inferior ao limite detectável pela técnica. Já, para as combinações com o CP V, foi possível sua identificação a partir dos 270 dias de idade. De forma a registrar o exposto, na FIGURA 4.80 estão apresentados os difratogramas para o concreto, nas condições *DEF* e *DEF + RAA*, haja vista que o gel isolado de RAA não foi possível de ser identificado pela técnica, por não possuir uma estrutura cristalina bem definida. Em (a e b), estão apresentadas as fases químicas identificadas para a *DEF* isolada e para a *DEF + RAA* aos 91 dias, respectivamente. Até a referida idade, a etringita não foi identificada pelo DRX, podendo destacar somente a presença da calcita e da Portlandita. Já, a partir dos 270 dias (FIGURA 4.80 (c;d)), a etringita pode ser observada para ambas as condições com o CP V. Nas micrografias (e;f), 365 dias, a etringita foi identificada nos compósitos, confirmando sua presença em maior intensidade, como também evidenciada pela técnica do MEV/EDS.

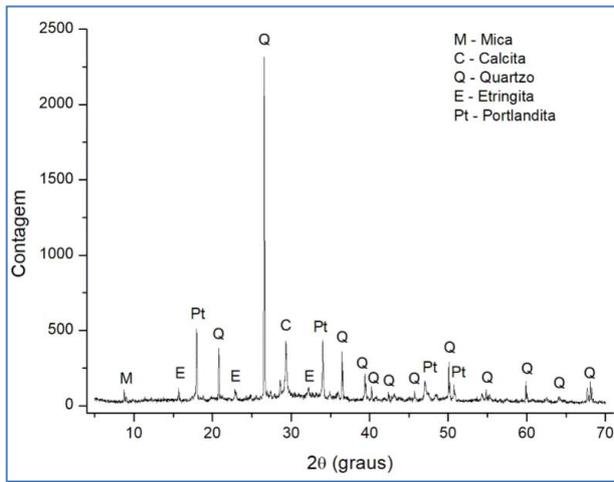
FIGURA 4.80 – DRX dos concretos confeccionados com o CP V.



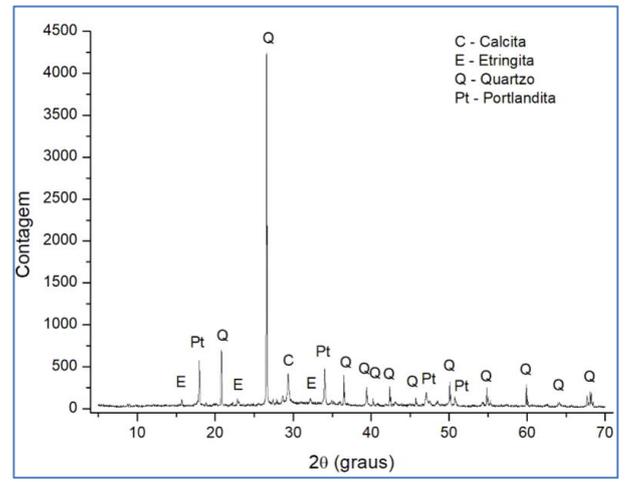
(a) DEF isolada – 91 dias



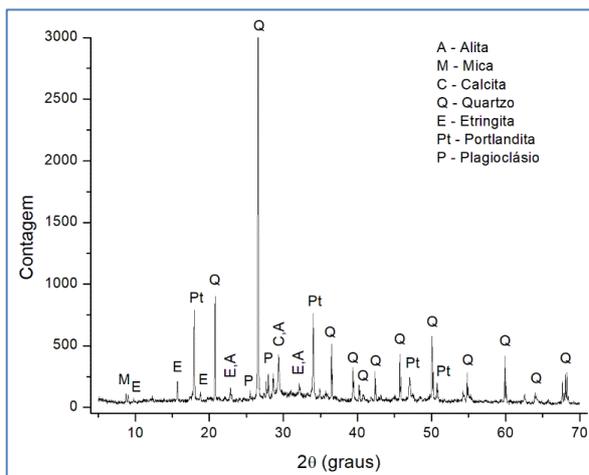
(b) DEF + RAA – 91 dias



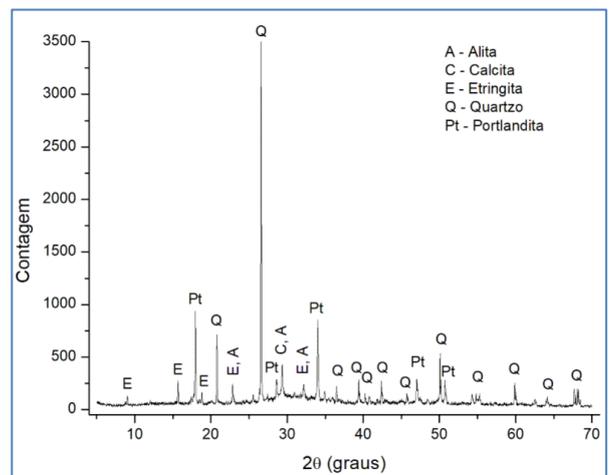
(c) DEF isolada - 270 dias



(d) DEF + RAA – 270 dias



(e) DEF isolada – 365 dias



(f) DEF + RAA – 365 dias

Schovanz (2019), trabalhando com concretos com dosagens similares às desta pesquisa, encontrou a fase etringita em alguns corpos de prova em idades superiores a 168 dias e, portanto, em tempo de exposição menor do que o encontrado neste trabalho. Este fato foi justificado pelas expansões e pelo grau de deterioração visualizados pela autora, também em idades reduzidas, quando comparados com os resultados desta pesquisa, conforme já comentado anteriormente.

#### 4.3.4 CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES GERAIS

Neste item, estão apresentadas algumas das principais correlações que foram observadas entre os resultados obtidos, em argamassas e concretos, bem como discussões que corroboraram quanto à existência ou não de reações deletérias nos corpos de prova submetidos ao programa experimental desta pesquisa, até 365 dias de idade.

- **Expansão das argamassas.** Nos estudos com o cimento CP IV, independente da condição de ataque testada, os valores de expansão não superaram a casa de 0,02% com 1 ano. Para a condição RAA isolada, os resultados em que foram observadas condições com reduzida expansão (0,02%), corroboraram com as análises microscópicas realizadas aos 365 dias de idade, onde não foram verificadas formações relacionadas ao gel da RAA, reforçando que se tratam de reações que ocorrem a longo prazo. No caso considerado, pode-se inferir também sobre a hipótese conjunta de haver no estudo, com barras de argamassa, a influência da seção transversal, que por possuir menores dimensões comparadas aos prismas de concreto, podem ter favorecido os processos de lixiviação dentro dos tanques de cura, retardando ou amenizando alguns processos expansivos, fato também verificado para a condição *DEF* isolada com o CP V. Essa hipótese pode ser comprovada com base no valor do pH da água de imersão das amostras determinado ao final do estudo, que se elevou do pH neutro a valores da ordem de 12,5. Para a *DEF* isolada com o CP V, que apresentou expansão em média da ordem de 0,04% (o dobro do apresentado para a RAA), os resultados foram coerentes com as micrografias apresentadas, onde visualizou-se a etringita massiva nos poros e na pasta cimentícia sendo formada, mostrando a tendência

de crescimento ao longo do tempo, assim como, para as combinações com o CP IV, porém, em menor proporção. Já a condição combinada *DEF+RAA* avaliada em argamassa apresentou similaridade à condição testada em concreto. Para ambos, as expansões mais expressivas foram verificadas para os CPs com o CP V, neste caso, atingindo o patamar de 0,30% aos 365 dias. As análises microscópicas (MEV/EDS) foram condizentes com os resultados de expansão obtidos, onde se pôde visualizar a etringita neoformada por toda a matriz cimentícia e no interior dos poros, justificando os comportamentos expansivos. Até a idade de 365 dias não foi possível identificar indícios da formação do gel de RAA, mas, como já discutido, os resultados mostraram que pode estar acontecendo a sinergia de ambas as reações, com a redução mais expressiva de valores de algumas das propriedades mecânicas medidas nas amostras RAA + *DEF* (combinadas).

**Expansão dos concretos.** Todas combinações com o CP IV apresentaram expansões médias abaixo de 0,03% até os 365 dias de idade. Entretanto, pelas análises microscópicas (MEV/EDS) ao longo do tempo, já se percebeu a formação intensa de produtos neoformados na matriz cimentícia; desta forma, pode-se inferir que até os 365 dias as reações expansivas ainda não alcançaram limites de degradação equiparáveis com as combinações com o CP V, mas, apresentaram tendência ao crescimento. Já, para as condições *DEF* isolada e *DEF+RAA* com o CP V, pelas análises por MEV, pode-se observar a presença de produtos neoformados com maior intensidade, sendo visualizada a etringita comprimida preenchendo poros do concreto, com visível fissuração radial devido às tensões geradas, além das mesmas formações distribuídas pela matriz cimentícia, corroborando para os elevados valores de expansão determinados (0,37% e 0,43%). Para a última condição (*RAA+DEF*), já foram identificados também géis de RAA, indicando a ocorrência do ataque conjugado. Para a condição RAA isolada com o CP V em concretos, foram visualizadas pela microscopia formações de gel sílico-alcalino aos 365 dias, confirmando a expansão observada (0,06%). Com base nos comportamentos observados, uma vez que o cimento pozolânico empregado contém cerca de 25% de cinza volante, é possível atribuir as menores expansões atingidas às reações pozolânicas envolvidas entre outros mecanismos ainda a serem comprovados. De qualquer forma, os valores de expansão se

mostram bastante expressivos quando comparados com limite normativo, por exemplo de 0,04% para concretos, mas específico para o caso da RAA (NBR 15557, Parte 1, ABNT (2018)). Destaca-se que ainda não existem limites normalizados para os demais tipos de ataques estudados envolvendo a DEF, porém, em instrução técnica de FURNAS (2020), é sugerido o limite de 0,04% para concretos com DEF. Destaca-se ainda que estudos de mitigação geralmente levam mais tempo para uma avaliação mais apurada dos comportamentos expansivos, como é feito para a RAA (2 anos) – NBR 15577, Parte 6 e citado por FURNAS (2020).

- **Variação de massa - argamassas e concretos.** Foram visualizadas correlações entre as expansões e variação de massa para os prismas de argamassa e concreto, ou seja, a variação de massa foi correspondente aos produtos de reação *DEF* e RAA, as quais dependem de água para as suas formações, conforme reportado na literatura, como por Zhang et al. (2017), Schovanz (2019) e Sanchez et al. (2018), que atribuíram o ganho de massa às neoformações geradas na matriz cimentícia. Esta hipótese está coerente com os resultados obtidos nesta pesquisa, ao comparar com a caracterização microestrutural apresentada, pois as combinações com os maiores ganhos de massa, coincidiram com a presença de maiores concentrações da etringita secundária. No caso dos concretos, já foram identificadas aos 365 dias de idade o gel da RAA, tanto na condição RAA isolada como na combinada, *DEF+RAA*.
- **Módulo de elasticidade – argamassas e concretos.** Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático dos concretos estudados, estiveram de acordo com o reportado na literatura, que atribuíram a esta propriedade uma maior sensibilidade aos ataques internos de caráter expansivo, seja para RAA (RAS) ou *DEF*, reações estas verificadas por meio de microscopia (MEV/EDS) nas amostras ensaiadas. Já para as argamassas, o comportamento se mostrou distinto. Percebeu-se que até os 365 dias de idade, embora as argamassas tenham apresentado neoformações em sua matriz cimentícia quando investigadas por (MEV/EDS), não foram identificados compostos de gel de RAA e nem variações importantes nas propriedades mecânicas, sendo as variações menos expressivas quando comparadas ao concreto. Pesquisadores como Diamond (1996); Brunetaud (2005); Hasparyk (2005; 2011) e Schovanz (2019) apontam o

módulo como a propriedade mais sensível de alteração na presença de reações expansivas em concretos. Com base nos resultados obtidos, pode-se relacionar que um concreto utilizando cimento tipo CP V, com faixa de resistência à compressão de 40 MPa e módulo de elasticidade de 26 GPa, após ataque combinado de *DEF*+*RAA*, e quando a expansão observada está em torno de 0,40%, apresenta redução no módulo de elasticidade por volta de 30% e na resistência à compressão de 20%.

- **Compressão – argamassas e concretos.** Os resultados obtidos para a resistência à compressão das argamassas ao longo do tempo apresentaram crescimento até aproximadamente 91 dias de idade e, a partir daí, mantiveram seus resultados constantes. Esse comportamento ocorreu tanto para as referências como para as condições de ataque com o CP IV e o CPV, demonstrando que para esse propósito, até os 365 dias, o método não demonstrou indícios das reações expansivas nessa propriedade. Para os concretos, já foram identificadas variações importantes no mesmo período de exposição para as condições de ataque, sendo observado crescimento para a *RAA* isolada de 13% até os 365 dias, fato esse já comentado anteriormente, coerente com a literatura, quando comparado com a queda no módulo de elasticidade (10%), em estágios iniciais de expansão pela *RAA* (0,06%), confirmados pelo MEV/EDS. Para as condições *DEF* isolada e *DEF* + *RAA*, os resultados de compressão também foram coerentes com as expansões, sendo nestas condições mais pronunciadas até 1 ano (0,37% e 0,43%), e já afetando as propriedades mecânicas, com redução das tensões de ruptura de 17% e 22% respectivamente, fato também confirmado pelo MEV/EDS, e DRX, com a identificação dos produtos das reações expansivas.
- **Módulo x resistência à compressão dos concretos.** Para a condição *RAA* isolada, percebeu-se que o módulo diminuiu na proporção de 10% enquanto a resistência à compressão aumentou 13%, entre 28 e 365 dias. Resultados coerentes com as referências anteriormente citadas, que mostraram o crescimento na resistência à compressão no início das expansões em decorrência da colmatação dos poros pelos produtos gerados, e a redução do módulo de elasticidade, por ser o parâmetro mais sensível a este tipo de ataque. Estes resultados corroboram com as características observadas pelas análises

microscópicas (MEV/EDS). Por outro lado, nas condições *DEF* isolada e *DEF+RAA* com o CP V, foram observadas reduções nos valores para ambas as propriedades (módulo e compressão, simultaneamente). Tais resultados estão também em conformidade com a literatura, tendo sido confirmados pelas análises microscópicas, nas quais foram observados produtos de ambas as reações (AL SHAMAA *et al.*, 2014; SANCHEZ, 2017; MARTIN, 2017; BARBOSA, 2018).

- **Velocidade ultrassônica – argamassas e concretos.** Tanto para as argamassas como para os concretos, as leituras diretas para a determinação da velocidade ultrassônica, até 1 ano de exposição, não mostraram resultados que possam contribuir com a identificação das reações expansivas, se mantendo constantes ao longo do tempo. Porém, o seu uso para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, demonstrou alguma correlação com o módulo de elasticidade estático, uma vez que foram observadas quedas para ambas as propriedades nas condições mais atacadas (concretos com *DEF* isolada e combinada com a RAA).
- **Resistividade elétrica – concretos.** Assim como para a outra técnica não destrutiva aplicada na pesquisa (velocidade ultrassônica), não foram verificadas variações significativas ao longo de 1 ano de exposição, tanto para as condições referência como para as atacadas. A única diferença observada, ocorre quando se correlaciona os dois tipos de cimento utilizados, sendo os valores para o CP IV da ordem de 6 a 7 vezes os observados para o CP V, fato este atribuído à reação pozolânica promovida pelo cimento pozolânico e consequente refinamento dos poros dos concretos.
- **Tração – concretos.** A resistência à tração mostrou ser um parâmetro sensível na avaliação de concretos atacados, apresentando reflexos negativos ao longo do tempo, não somente na presença do CP V, como observado para a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, mas também com o CP IV, como foi o caso da condição *DEF* e *DEF + RAA*, com que indicaram reduções de resistência à tração de 13% e 7 % respectivamente até 1 ano de idade. As neoformações de etringita identificadas por MEV/EDS corroboraram esses comportamentos, sendo observadas em menor concentração para o CP IV em comparação ao CP V.

#### 4.4 MÉTODO DE ENSAIO - DEF E DEF+RAA EM LABORATÓRIO

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, é possível propor um método adaptado em laboratório que pode identificar a potencial ocorrência da *DEF* de maneira isolada ou conjunta com a RAA (*DEF+RAA*). A seguir, são apresentados os processos propostos para a cura de corpos de prova de concreto ou argamassa, destinados a este fim, bem como para o protocolo de monitoramento em ambiente de exposição específico.

Após a moldagem, os CPs devem ser mantidos em ambiente laboratorial ( $23 \pm 2$ ) °C e ( $UR \geq 50\%$ ), com suas faces protegidas por filme plástico por 6 h (período próximo ao fim de pega para compósitos de pega normal). Esse período pode ser identificado como **cura inicial ou pré-cura**.

Sequencialmente, inicia-se o ciclo de cura térmica, em sistema adaptado em laboratório, que permite a elevação da temperatura a uma taxa de aquecimento de 10 °C/h, em ambiente com umidade controlada superior a 98 %, partindo de ( $23 \pm 2$ ) °C até atingimento do patamar de ( $85 \pm 2$ ) °C.

No interior do sistema de aquecimento (pode ser usada uma câmara climática ou ambiente controlado), ainda dentro dos moldes e com a superfície protegida por filme plástico, os corpos de prova prismáticos, destinados ao estudo de expansão, bem como outros corpos de prova, como cilíndricos, destinados a ensaios mecânicos complementares, devem permanecer no patamar de temperatura controlado de ( $85 \pm 2$ ) °C e umidade relativa (*UR*) acima de 98%, por 12 h. Esse período é identificado como **patamar máximo de aquecimento ou temperatura de cura térmica**.

Depois de 12 h em cura térmica, inicia-se o processo de resfriamento controlado, a uma taxa de 5 °C/h, até a temperatura de ( $38 \pm 2$ ) °C. O ciclo térmico completo deve ter duração de 27,5 h e pode ser representado pelo esquema apresentado na FIGURA 3.5.

Por fim, após o período de resfriamento, os CPs permanecem imersos em tanques com água potável, na temperatura de ( $38 \pm 2$ ) °C (sem a adição de hidróxido de cálcio na água), até as idades de controle. O estudo em concreto deve ser monitorado até, no mínimo, 12 meses. Esse período pode ser identificado como período de monitoramento no tempo em **ambiente de exposição controlado**.

## 5 CONCLUSÕES

Neste item estão apresentadas as conclusões do trabalho, obtidas a partir dos resultados do programa experimental, sendo válidas para as condições e materiais empregados nos estudos.

- Os métodos em laboratório empregados e propostos para induzir a RAA, a *DEF* bem como o ataque conjugado foram validados nesta pesquisa com base nos resultados obtidos, utilizando dois tipos de cimento (CP IV e CP V) e dois tipos de agregados graúdos de origem granítica, um inócuo e outro reativo para RAA.
- Foi possível determinar o potencial expansivo tanto das argamassas como dos concretos em relação aos ataques estudados (RAA, *DEF* e ataque conjugado: *DEF*+RAA).
- As referências desenvolvidas para as argamassas e os concretos, com base nos resultados de expansão, serviram de base comparativa para as demais condições de ataque, com os dois cimentos empregados, apresentando expansões pouco expressivas até 1 ano, de 0,02%, sem qualquer ataque.
- Em relação ao estudo em argamassas, esse se mostrou limitado nas condições isoladas (*DEF* e RAA) para a obtenção de dados de expansão expressivos que pudessem nortear quanto ao tipo de ataque presente até 1 ano, independente do cimento testado, já na condição conjugada (*DEF*+RAA), o percentual das expansões atingidas para as barras de argamassa foi elevado, e de 0,30%, aos 365 dias. Assim, para avaliar o ataque conjugado o método empregado se mostrou promissor. Porém, estudos complementares se fazem necessários para validar o método em argamassas nos demais casos.
- O comportamento expansivo dos concretos, por meio dos métodos testados, se mostrou coerente, independentemente do tipo de ataque. No caso da RAA isolada, na presença do CP V, as expansões (0,06% em 1 ano) excederam o limite normativo (0,04%), sendo a RAA confirmada e corroborado pela presença do gel pelas análises no MEV/EDS. Nos estudos envolvendo a *DEF* (*DEF* isolada), as expansões foram elevadas e bem expressivas, indicando reações mais rápidas quando comparadas às da RAA (0,37% em 1 ano). Ainda, no ataque combinado (RAA+*DEF*), a taxa de expansão foi a maior alcançada em 1 ano (0,43%) entre os ataques testados. O CP IV se mostrou promissor na redução das expansões, entretanto, pela microestrutura

e no caso da *DEF*, neoformações já foram observadas, necessitando de um tempo maior de avaliação. O estudo, no caso da mitigação, poderia ser estendido até 2 anos, como é feito para a RAA.

- Os estudos de variação de massa indicaram que o ganho em massa tende a estabilizar para as amostras com baixo percentual de expansão (0,02%); já nas condições atacadas, existe um ganho de massa com equivalência às expansões, atrelado à formação de produtos neoformados.

- Foi possível conhecer a evolução das propriedades mecânicas dos compósitos testados. Para as argamassas, tanto a resistência à compressão quanto o módulo de elasticidade estático, para ambos os cimentos testados (CP V e CP IV), mostrou coerência com os dados das expansões, ou seja, não houve reflexo negativo até a idade de 1 ano. As argamassas confeccionadas com o CP IV (nos 3 ataques) e com o CP V, para a RAA, mostraram crescimento tanto de resistência como de módulo no tempo. Já no estudo da *DEF* isolada e *DEF+RAA* (com o CP V), não há crescimento no tempo, podendo já ser um sinalizador dos ataques presentes, embora sem quedas ainda.

- No que diz respeito aos resultados mecânicos dos concretos, já se pode afirmar a existência de alterações importantes na presença do CP V, corroborando os resultados de expansão e as análises microscópicas. As reduções no tempo foram mais expressivas para o módulo de elasticidade (até 33%) em comparação à resistência à compressão (até cerca de 20%) quando a *DEF* estava presente (*DEF* isolada e *DEF&RAA*) e, em especial no ataque conjugado. Na RAA isolada, apenas o módulo sofreu queda (10%); a resistência à compressão cresceu no período avaliado indicando um processo mais lento.

- A resistência à tração determinada nos concretos também se mostrou sensível aos ataques, na sua maioria. Porém, as reduções (28% - *DEF+RAA*) não ultrapassam aquelas observadas para o módulo. De qualquer forma, é um parâmetro sensível na avaliação de concretos atacados por reações expansivas devido à fragilidade da matriz interna do concreto e, em especial, no contato pasta x agregados, pelas tensões internas geradas por produtos de reação.

- Em relação aos ensaios não destrutivos (END), o ultrassom não produziu variações importantes na velocidade de propagação de ondas ao longo do tempo e até 1 ano, independente da condição estudada, podendo-se inferir que o parâmetro

velocidade ultrassônica não foi aplicável ao estudo dos ataques. O mesmo ocorreu para a resistividade elétrica dos concretos. Os resultados se mantiveram constantes, sem variações significativas. A única diferença ocorreu entre os cimentos; para os concretos com CP IV, os resultados médios foram cerca de 6 a 7 vezes superiores aos com CP V. Esse comportamento pode ser explicado pelo efeito pozolânico da cinza volante, que eliminou parte dos íons disponíveis na solução dos poros e contribuiu para o seu preenchimento, aumentando assim a resistividade elétrica dos compósitos.

- Foi possível, a partir do módulo de elasticidade dinâmico calculado com dados do ultrassom, utilizando coeficiente de Poisson fixo de 0,2, avaliar a sua coerência ao ser comparado com o módulo de elasticidade estático dos ensaios. Desta forma, foram identificadas reduções nos valores por ambas as técnicas, embora em escalas distintas. O módulo de elasticidade estático representou em relação ao módulo dinâmico dos concretos com o CP V, cerca de 43% a 55% nas condições atacadas, enquanto, na condição de referência, essa relação é superior, da ordem de 57%. Já com o CP IV as relações são maiores, entre 67% e 78%.

- As avaliações microscópicas por MEV/EDS foram fundamentais para o entendimento dos comportamentos físico e mecânico dos corpos de prova ensaiados. Foi possível verificar a incidência de produtos neoformados originados pelos ataques ao longo do tempo. Formações de etringita tardia foram confirmadas e, em idades mais avançadas, a presença da etringita na forma comprimida além de microfissuras, em especial nas condições *DEF* isolada e *DEF+RAA* com o CP V. Essas formações justificam os comportamentos expansivos observados bem como os reflexos negativos nas propriedades mecânicas. Na presença do CP IV, as formações também foram observadas, porém em menor proporção. No que diz respeito à RAA, somente nos concretos o gel foi verificado, tanto no ataque isolado como no conjugado (*RAA+DEF*), confirmando os comportamentos físicos e mecânicos verificados. As análises por DRX não se mostraram aplicáveis na identificação da etringita nas idades iniciais; apenas a partir de 270 dias esse composto passou a ser identificado.

O estudo realizado permitiu a obtenção de parâmetros e procedimentos importantes para o emprego de métodos de ensaio adaptados em laboratório, de forma a avaliar potencial de ocorrência tanto da *DEF* como da RAA isoladas, ou do ataque conjugado

(DEF+RAA). No estudo da mitigação, como já é proposto por norma para a RAA, os efeitos podem ser mais expressivos a longo prazo, podendo ser necessário um período além de 1 ano de avaliação.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na avaliação dos resultados obtidos nesta pesquisa, foram propostas novas hipóteses de avaliação e, conseqüentemente, novas linhas de estudo, de maneira a complementar os resultados já obtidos com esse trabalho.

- Dar continuidade aos estudos em concreto em programa experimental semelhante, com outros tipos de cimento Portland, incorporação de adições pozolânicas e outras dosagens;
- Estudar diferentes temperaturas de cura (ex.: 65 °C; 75 °C; 95 °C);
- Executar estudos de elementos de concreto em campo / protótipos, de forma a monitorá-los no tempo e correlacionar com os estudos em laboratório;
- Avaliar a influência das dimensões dos corpos de prova e prismas de argamassa e conseqüente cinética das reações químicas de *DEF* e *DEF+RAA*, bem como a influência da conseqüente alteração dos vazios internos em cada material;
- Estudar o ataque combinado (*DEF + RAA*) em concretos de campo de forma a correlacionar com os resultados obtidos em escala laboratorial;
- Determinar o coeficiente de Poisson para cada amostra e idade de modo a verificar se o módulo de elasticidade dinâmico, apresenta melhor correlação com o módulo de elasticidade estático, em programa experimental similar ao desenvolvido nesta pesquisa.

## 7 REFERÊNCIAS

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 150: **Standard specification for Portland cement**. West Conshohocken, 2007.

\_\_\_\_\_. *ASTM G 57: Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method*. West Conshohocken, 2012.

\_\_\_\_\_. *ASTM C 1260: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)*. West Conshohocken, 2014.

\_\_\_\_\_. *ASTM C 1293: Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction*. West Conshohocken, 2020.

\_\_\_\_\_. *ASTM C 1778: Standard Guide for reducing the risk of deleterious alkali-aggregate reaction in concrete*. West Conshohocken, 2020.

\_\_\_\_\_. *ASTM C 295: Standard Guide for petrographic examination of aggregates for concrete*. West Conshohocken, 2019.

\_\_\_\_\_. *ASTM C 856: Standard practice for petrographic examination of hardened concrete*. West Conshohocken, 2020.

\_\_\_\_\_. *ASTM C 597: Standard test method for pulse velocity through concrete*. West Conshohocken, 2016.

ANDRADE, T. Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana de Recife. In: Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2. **Anais...** Ibracon. Rio de Janeiro, p. 1-16, 2006.

ANDRIOLO, F. R. **Observações de estruturas de concreto: Validade quanto a ocorrência da reação álcali-agregado**. Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, Comitê Brasileiro de Barragens. World Tec Net nº 00005. Tecnologia do concreto, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739. **Concreto – Determinação de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR NM 30. **Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR NM 46. **Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR NM 51. **Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”**. Rio de janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52. **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 53. **Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 67. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 5738. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 5738. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 5739. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. NBR 7211. **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR 7215. **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. NBR 7218. **Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. NBR 7222. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. NBR ISO 7500-1. **Materiais metálicos – Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão – Calibração e verificação do sistema de medição de força**. Rio de janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 7809. **Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio**. Rio de janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. NBR 8522. **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. NBR 8802. **Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. NBR 10908. **Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de caracterização.** Rio de janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NBR 13583. **Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio.** Rio de janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. NBR 15630. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica.** Rio de janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR 15577-1. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** Rio de janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 15577-2. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto.** Rio de janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 15577-3. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.** Rio de janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 15577-4. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 15577-5. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 15577-6. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.** Rio de janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 15577-7. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado.** Rio de janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 16372. **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método blaine).** Rio de janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 16697. **Cimento Portland – Requisitos.** Rio de janeiro, 2018.

AL SHAMAA, M.; LAVAUD, S.; DIVET, L.; NAHAS, G.; TORRENTI, J. M. **Coupling between mechanical and transfer properties and expansion due to DEF in a**

**concrete of a nuclear power plant.** Nuclear Engineering and Design, n. 266, p. 70-77, 2014.

AMINE, Y.; LEKLOU, N.; AMIRI, O. **Effect of supplementary cementitious materials (SCM) on delayed ettringite formation in heat-cured concretes.** Science Direct, n. 139, p. 565-570, 2017.

AYORA, C.; CHINCHÓN, S.; AGUADO, A.; GUIRADO, F. Weathering of iron sulfides and concrete alteration: thermodynamic model and observation in dams from Central Pyreness, Spain. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 9, p. 1223-1235, 1998.

BAUER, S.; CORNELL, B.; FIGURSKI, D.; LET, TYLER.; MIRALLES, J.; FOLLIARD, K. **Alkali-silica reaction and delayed ettringite formation in concrete: a literature review.** Project performed in cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. Report: FHWA/TX-06/0-4085-1, University of Texas at Austin, Texas, July 2001, Rev. February 2006.

BARBOSA R. A., HANSEN S. G., HANSEN K. K., HOANG L. C., GRELK B., Influence of alkali silica reaction and crack orientation on the uniaxial compressive strength of concrete cores from slab bridges, **Construction and Building Materials**. p. 176, 2018.

BÉRUBÉ, M. A.; FOURNIER, B. Canadian experience with testing for alkali-aggregate reactivity in concrete. **Cement and Concrete Composites**, n. 15, p. 27-47, 1993.

BÉRUBÉ, M. A.; FOURNIER, B. Alkalis reaseasable by aggregates in concrete - Significance and test methods. In: International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, 12, Beijing, China. **Proceedings...** Beijing, China: International academic publishers/World publishing corporation, p. 17-30, 2004.

BICKLEY J. A., HEMMING S. R. T., HOOTON R. D., BALINSKY J. Thaumaside related deterioration of concrete structures. In: **Proceedings of the Concrete Technology: Past, Present and Future** ACI SP: 144-8, p. 159-75, 1995.

BICZOK, I. **Corrosion y proteccion del hormigon.** Bilbao/España: Ediciones Urmo. Trad. de Emilio J. d'Ocon Asensi, p. 275-280, 1972.

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. **Constructon and Building Materials**. p. 356 – 368, 2019.

BRUNETAUD, X. **Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton.** Tese de doutorado. Escola central de artes e manufaturas (físico química de materiais), Escola Central de Paris, França, 2005.

CAPRARO, A. P. B.; FRANDOLOSO, J. C. P.; MEDEIROS, M. H. F.; PORTELLA, M. D. G.; PORTELLA, K. F.; GODKE, B.; OLIVEIRA, I. **Avaliação de ensaios não destrutivos para a detecção de concretos dosados com diferentes teores de**

**contaminação por íons sulfeto.** Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, p. 103–116, 2017.

CASANOVA, I.; AGULLÓ, L.; AGUADO, A. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – II. Physico-chemical modeling of sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 11, p. 1627-1632, 1997.

CASCUDO, O. **Patologia e terapia das estruturas de concreto.** Apostila do curso de especialização em Construção Civil da Universidade Federal de Goiás. CECC/EEC/UFG, 2009.

CEARY, M. S. **Characterization of delayed ettringite formation in Maryland bridges.** Doctoral thesis. University of Maryland, College Park, Maryland/EUA, 2007.

CHANDRA, S. BERNTSSON, L. Deterioration of concrete in swimming pool in the south of Sweden. **ACI Materials Journal**, American Concrete Institute. v. 85, n. 6, p. 489-494, 1988.

COHEN, D.M.; MATHER, B. Sulfate attack on concrete – Research needs. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 1, p. 62-69, 1991.

COLLEPARDI, M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement and Concrete Composites**, n.25, p. 401-407, 2003.

COUTO, T. A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO. P. 191, 2008.

CRAMMOND, N. J.; HALLIWELL, M. A. **Assessment of conditions required for the thaumasite form of sulphate attack.** In: SCRIVENER, K. L; YOUNG, J. F. Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-based Systems. Boston: E e FN SPON, p. 193-200, 1997.

CRAMMOND, N. J. The thaumasite form of sulfate attack in the UK. **Cement and Concrete Composites**, n.25, p. 809-818, 2003.

CUSTÓDIO, J.; RIBEIRO, A. B.; COSTA, D.; SILVA, A. S.; GONÇALVES, A. **Methodologies for avoiding the deleterious development of expansive chemical reactions in concrete – LNEC specification E 461:2020.** In: Fourth International DAM WORLD Conference, Lisboa, Portugal, 2020.

DAYARATHNE, W. H. R. S. *et al.* **Evaluation of the potential for delayed ettringite formation in concrete.** 19th ERU Symposium, National Engineering Conference 2013, University of Moratuwa, Sri Lanka, p. 59–66, 2013.

DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS. **The thaumasite form of sulfate attack: risks, diagnosis, remedial works and guidance on new construction.** Report of the Thaumasite Expert Group, DETR, London, January, 1999.

DIAMOND, S.; ONG, S. **Combined effects of alkali silica reaction and secondary ettringite deposition in steam cured mortars**, In: Cement Technology, ed. E.M. Gartner and H. Uchikawa. Ceramic Transactions. Vol. 40, Amer. Ceram. Soc., Westerville, OH, p. 79-90, 1994.

DIAMOND, S. Delayed ettringite formation – Processes and problems, In: **Cement and Concrete Composites**, n.18, p. 205-215, 1996.

DICKSON, C. L.; BREW, D. R. M.; GLASSER, F. P. **Advanced Cement Research** 16, p. 35-43, 2004.

DUARTE, M. G. **Ensaio laboratoriais para avaliação de drenagem ácida na barragem da UHE Irapé**. Dissertação (Mestrado Profissional). Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

DUCHESNE, J.; FOURNIER, B. Deterioration of concrete by the oxidation of sulphide minerals in the aggregate. **Journal of Civil Engineering and Architecture**. v. 7, n. 8, p. 922-931, 2013.

EDGE, R. A.; TAYLOR, H. F. W. **Crystal structure of thaumasite, a mineral containing  $[\text{Si}(\text{OH})_6]_2$  groups**. Nature: 354–63, 1969.

FARNY, J. A.; KOSMATKA, S. H. **Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete.**” Portland Cement Association, 1997.

FIGUEIRA, R. B.; SOUSA, R.; COELHO, L.; AZENHA, M.; ALMEIDA, J. M.; JORGE, P. A. S.; SILVA, C. J. R. Alkali-silica reaction in concrete : Mechanisms , mitigation and test methods. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 903–931, 2019.

FU, Y., XIE, P., GU, P., BEAUDOIN, J. J. Significance of pre-existing cracks on nucleation of secondary ettringite in steam cured cement paste. **Cement and Concrete Research**, n.6, v. 24 p. 1015-1024, 1994.

GAMBALE, P. G.; GAMBALE, E. A.; HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. **Análises térmicas em blocos de concretos e avaliação da presença de DEF**. In: 61º Congresso Brasileiro de Concreto. Fortaleza-CE, 2019.

GIANNINI, E. R. *et al.* Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 253-264, 2018.

GODART, B.; DIVET, L. **Lessons learned from structures damaged by delayed ettringite formation and French prevention strategy**. Tech. Rept. Université Paris-Est, IFSTTAR, 2013.

GODART, B. **Pathology, assessment and treatment of structures affected by delayed ettringite formation**. Structural Engineering International, v. 27, n. 3, p. 362-369, 2017.

GHORAB, H., Y.; HEINZ, D.; LUDWING, U.; MESKENDAHL, T.; WOLTER, A. **The stability of calcium of calcium aluminate sulphate hydrates in pure systems and in cements**. International Congress Chemistry of Cement, 7th, v. 4, p. 496-503, 1981.

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

GOMIDES, M. J.; HASPARYK, N. P.; ANDRADE, M. A. S.; BITTENCOURT, R. M. **Investigação de agregados contendo sulfetos para utilização em estruturas de concreto**. XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens. Goiânia, 2005.

GOMIDES, M. J. **Investigação de agregados contendo sulfetos e seus efeitos sobre a durabilidade do concreto**. Tese (doutorado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

GOTO, H.; MEDEIROS, B. L.; MEDEIROS, M. H. F. DE.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; PORTELLA, K. F.; OLIVEIRA, I. C.; BRONHOLO, J. L. **Avaliação não destrutiva do ataque interno por sulfatos em testemunhos de CCR de uma barragem**. , p. 237–252, 2017.

GU, Y., MARTIN, R. P., METALSSI, O. O., CHONG, T.F. Pore size analyses of cement paste exposed to external sulfate attack and delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, n.123, 2019.

HASPARYK, N. P.; NASCIMENTO, J. F. F.; ANDRADE, M. A. S.; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. **Estudos de laboratório com concretos contendo agregados obtidos a partir de rocha com sulfetos**. 15ª. Reunión Técnica de la AATH - Seminario sobre Hormigones Especiales. Santa Fé – Argentina, 2003.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – Efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO. p. 257, 1999.

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M.; CAVALCANTI, A. J. C. T.; SILVEIRA, J. F. A. Expansions due to AAR verified in concrete cores and mortars from several power plants in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, Beijing/China. **Proceedings...** Beijing/China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, v. II, p.888-897, 2004.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. p. 326, 2005.

HASPARYK, N. P.; MUNHOZ, F.; SANCHEZ, L.; HAMASSAKI, L. Efeito dos álcalis e da finura do cimento nas expansões geradas pela reação álcali-agregado. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 49, Bento Gonçalves, **Anais...** São Paulo: Ibracon, CBC0533, p. 14, 2007.

HASPARYK, N. P. **Reação álcali-agregado no concreto**. In: ISAIA, GC. *Concreto: Ciência e Tecnologia*, São Paulo, Brasil: IBRACON. Cap. 27, p.933-1001, 2011.

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

HASPARYK, N. P.; SCHOVANZ, D.; KUPERMAN, S. **Instrução técnica Furnas nº GSTE004R0 - Método de ensaio para a avaliação do potencial de ocorrência da ettringita tardia (DEF) em concreto**, Ed. FURNAS, 2020.

HEINZ, D.; LUDWING, U. **Mechanism of subsequent ettringite formation in mortars and concretes after heat treatment**. International Congress Chemistry of Cement, 8th, v. 5, p. 189-194, 1986.

HEINZ, D.; KALDE, M.; LUDWING, U.; RUEDIGER, I. **Present state of investigation on damaging late ettringite formation (DLEF) in mortars and concretes**. In: ERLIN, Bernard (editor). *Ettringite: the sometimes host of destruction*. Michigan, USA: American Concrete Institute, p. 199-206, 1999.

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

HOBBS, D. W. **Expansion and cracking in concrete associated with delayed ettringite formation**. In: Erlin, Bernard (editor). *Ettringite: the sometimes host of destruction*. Michigan, USA: American Concrete Institute, p. 159-182, 1999.

HOPPE FILHO, J.; RHEINHEIMER, B.; KHOE, S. S.; ARTIGAS, L. V.; SABBAG, A. F.; MEDEIROS, M. H. F. **Degradação do concreto de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) por ácido sulfúrico biogênico** – Revista ALCONPAT, v. 4, n. 2, p. 87-99, 2014.

KARTHIK, M.M, MANDER J.B., HURLEBAUS S. ASR/DEF related expansion in structural concrete: model development and validation, **Construction Building Materials**. 128, 2016.

KCHAKECH, B. **Etude de l' influence de l' échauffement subi par un béton sur le risque d' expansions associées à la réaction sulfatique interne**. p. 374, 2015.

KCHAKECH, B.; MARTIN, R. P.; OMIKRINE, M. O.; RENAUD, J. C.; BARON, L.; TOUTLEMONDE, F. **Experimental study of the influence of late heat treatment on the risk of expansion associated with delayed ettringite formation**. IFSTTAR, Materials and Structures Department, Boulevard Newton, France, 2016.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: Simpósio Nacional de Agregados, **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica da USP, p. 127-138, 1986.

KREITMAN, K. **"Nondestructive evaluation of reinforced concrete structures affected by alkali-silica reaction and delayed ettringite formation."** MS Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, 2011.

LARRARD, T.; BENBOUDJEMA, F.; COLLIAT, J. B.; TORRENTI, J. M.; DELERUYELLE, F. **Concrete calcium leaching at variable temperature: experimental data and numerical model inverse identification**. Computational Materials Science, v. 49, p. 35–45, 2010.

LU, D.; KANG, X.; LU, Y.; FECTEAU, P. L.; FOURNIER, B.; XU, Z. **Coexistence of ASR and DEF in a precast pre-stressed concrete element in China**. In: 15<sup>th</sup> International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2016), São Paulo, Brasil, 2016.

LEKLOU, N.; HUONG, V. N.; MOUNANGA, P. The effect of partial cement substitution with fly ash on delayed ettringite formation in heat-cured mortars. Korean Society of Civil Engineers. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2016.

LEMING, M. L., **Alkali-silica reactivity: Mechanisms and management**. Mining Engineer 48, p. 61, 1996.

MARCELINO, A. P. B. **Estudos para o desenvolvimento de uma metodologia de definição de teores deletérios de enxofre em concretos e argamassas de barragens**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. p. 107, 2015.

MARTIN, R.; SANCHEZ, L. F. M. **Diagnosis of AAR and DEF: Comparison of residual expansion, stiffness damage test and damage rating index**. 15<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 2011.

MARTIN, R. P. *et al.* Evaluation of different techniques for the diagnosis & prognosis of Internal swelling reaction (ISR) mechanisms in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 956-964, 2017.

MELO, S. K. de. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. p. 286, 2010.

MEHTA, P. K. **Sulfate attack on concrete, a critical review**. Materials Science Construction. United States of America, p. 105–130, 1992.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. HASPARYK, N. P. (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2014.

MIELENZ, R. C.; MAURSIN, S. L.; HIME, W. G. Zugovic, Z. T. . **Investigation of prestressed concrete railway tie distress**. Concrete International, v. 17, n. 12, p. 62-68, 1995.

MIZUMOTO, C. **Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. p. 162, 2009.

MÜLLAUER, W.; BEDDOE, R. E.; HEINZ, D. Sulfate attack expansion mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 208–215, 2013.

NEVILLE, A. The confused world of sulfate attack on concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 8, p. 1275–1296, 2004.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, p. 828, 1997.

NGUYEN, V. H.; LEKLOU, N.; AUBERT, J. E.; MOUNANGA, P. The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 479-484, 2013.

NGUYEN, V. H.; LEKLOU, N.; MOUNANGA, P. The effect of metakaolin on internal sulphate attack of the heat-cured mortars. **Romanian Journal of Materials**, v. 49, p. 51-57, 2019.

OBERHOLSTER, R. E.; MAREE, N.; BRAND, J. H. D. **Cracked prestressed concrete railway sleepers: Alkali-silicate reaction or delayed ettringite formation**. Conference Alkali-aggregate Reaction, v. II, The Concrete Society, London, 1992.

OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G. An accelerated concrete prism soaking test for evaluating the alkali-reactivity of aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 16, p. 181-189, 1986.

ODLER, I. **Hydration, setting and hardening of Portland cement**. In: Hewlett, Peter C. (editor). *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4ed. China: Elsevier: Butterworth Heinemann, p. 241-298, 2007.

OLIVEIRA, I. C. de. **Análises de dados para a elaboração de diretrizes, visando à detecção de sulfetos e sulfatos na composição de CCR**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2013.

OZOL, M. A.; **Delayed ettringite formation at Brewer stadium, Boone, North Caroline**. *Cement, Concrete aggregates, CCAGDP*, v. 22, n. 1, p. 24-34, 2002.

OWSIAK, Z. **Effect of alkali-silica reaction on the rate delayed ettringite formation in steam cured mortars**. In: 13<sup>th</sup> International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2008), Trondheim, Norway, p. 1074-1081, 2008.

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, p. 114, 1981.

PEREIRA, E. **Investigação e monitoramento do ataque por sulfatos de origem interna em concretos nas primeiras idades**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, p.142, 2015.

POOLE, A. B. **Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete**. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, p.1-29, 1992.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia. Porto Alegre, RS. p. 263, 2010.

PROCEQ. **Descrição do funcionamento do equipamento Resipod, 2020**. Disponível em <[https://www.proceq.com/uploads/tx\\_proceqproductcms/import\\_data/files/Resipod\\_Sales%20Flyer\\_Portuguese\\_high.pdf](https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Resipod_Sales%20Flyer_Portuguese_high.pdf)>. Acesso em 12 abril de 2020.

RAMLOCHAN, T.; ZACARIAS, P.; THOMAS, M. D. A.; HOOTON, R. D. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortar cured at elevated temperature. Part I: Expansive behaviour. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p.807-814, 2003.

RASHIDI, M.; PAUL, A.; KIM, J. Y.; JACOBS, L. J.; KURTIS, K. E. Insights into delayed ettringite formation damage through acoustic nonlinearity. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 1–8, 2017.

RILEM TECHNICAL COMMITTEES – TC 106-2. **Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – The ultra-accelerated mortar-bar test**. United Kingdom, 2000.

RILEM TECHNICAL COMMITTEES – TC 106-3. **Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Method for aggregate combination using concrete prisms**. United Kingdom, 2000.

ROZIÈRE, E.; LOUKILI, A.; HACHEM, R. E. L.; GRONDIN, F. Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1188–1198, 2009.

SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2. Proposed mechanisms. **Cement and Concrete Research**. v. 33, p. 341 – 346, 2002.

SANTOR, M. S.; GASTALDINI, A. L. G.; CRAUSS, C.; SANTOS, G. T.; ROSSINI, F. C. **Influência de materiais de proteção na resistividade elétrica do concreto**. Revista ALCONPAT. v. 2, N° 1, p. 47 – 57, 2012.

SANCHEZ, L. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SANCHEZ, L.; FOURNIER, B.; KUPERMAN, S. **A evolução e desenvolvimento dos ensaios laboratoriais na prevenção e avaliação da RAA**. 52° Congresso Brasileiro do Concreto, 2010.

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**, p. 17-31, 2017.

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**, p. 284-303, 2018.

SCHOVANZ, D. **Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em concretos com cimento Portland pozolânico e de alta resistência**. Dissertação de Mestrado. Faculdade Meridional, Passo Fundo/RS. p. 163, 2019.

SILVA, C. M. da. **Estudo da potencialidade de compostos a base de silanos no combate da reação álcali-agregado**. Dissertação de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre/RS p. 178, 2006.

SILVEIRA, A. L. Z. de P. **Estudo da reação álcali-agregado em rochas carbonáticas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. p. 162, 2009.

TAYLOR, B. E.; WHEELER, M. **Stable isotope geochemistry of acid mine drainage: Experimental oxidation of pyrite**. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. vol. 48, n. 12, p. 2669–2678, 1984.

TAYLOR, H. F. W.; GOLLOP, R. S. **Some chemical and microstructural aspects of concrete durability**. *In*: SCHIVENER, K. L.; YOUNG, J. F. *Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-based Systems*. Ed. E & FN Spon, p. 177 – 184, 1997.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 683-693, 2001.

THOMAS, M. D. A.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K. J.; IDEKER, J. H.; SHEHATA, M. Tests methods for evaluating measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, p. 1842-1856, 2006.

THOMAS, M. D. A.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K. J.; IDEKER, J. H.; RESENDEZ, Y. **The use of lithium to prevent or mitigate alkali-silica reaction in concrete**. Pavements and Structures. Transtec Group, Inc. Report No. FHWA-HRT-06-133, 2007.

THOMAS, M. D. A.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K. J.; IDEKER, J. H.; RESENDEZ, Y. Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n.6, p. 841-847, 2008.

TOSUN, K. 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**, v. 28, p. 761-772, 2006.

VALDUGA, L.; SGARBOSSA, F.; DAL MOLIN, D. C. C.; PAULON, V. A. Influência da forma do agregado, da relação água/cimento e da consistência da argamassa na verificação da potencialidade reativa do agregado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47, **Anais...** Ibracon, CBC 0093, p.11, São Paulo, 2005.

WERITZ, F.; TAFFE, A.; SCHAURICH, D.; WILSCH, G. Detailed depth profiles of sulfate ingress into concrete measured with laser induced breakdown spectroscopy. **Constructon and Building Materials**, v. 23, p. 275 – 283, 2009.

ZHANG, Z.; OLE, J.; DIAMOND, S. Studies on delayed ettringite formation in early-age, heat cured mortars: 1- Expansion measurements, changes in dynamic modulus of elasticity, and weight gains. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1729-1736, 2002.

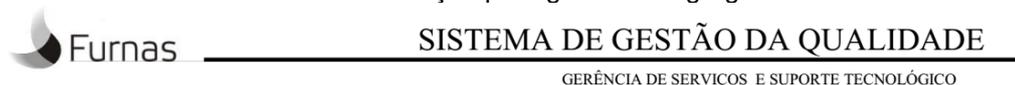
ZHANG, Z. ; WANG, Q.; CHEN, H.; ZHOU, Y. Influence of the initial moist curing time on the sulfate attack resistance of concretes with different binders. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 541-551, 2017.

ZHOU, Q.; HILL, J.; BYARS, E. A.; CRIPPS, J. C.; LYNSDALE, C. J.; SHARP, J. H. The role of pH in thaumasite sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 160-170, 2006.

## APÊNDICE A

O agregado miúdo selecionado para a moldagem das argamassas e concretos utilizados neste estudo é de origem quartzosa, conforme descrição petrográfica apresentada na FIGURA A1.

FIGURA A1 – Descrição petrográfica do agregado miúdo.



### Petrografia / Mineralogia

| Registro | 0142.2019   |                |
|----------|-------------|----------------|
| OS       | Procedência | Classificação: |
| 608      | CAVA        | AREIA NATURAL  |

### EXAME MACROSCÓPICO

Cor: Avermelhada.

### EXAME MICROSCÓPICO

#### Composição Mineralógica Estimada

Quartzo: 65%; Fragmentos de rochas quartzosas: 15%; fragmentos de laterita: 15%; fragmentos de xistos (muscovita+feldspatos+quartzo): 5%.



Fotomicrografia: fragmentos de rocha quartzosa (1), grãos de quartzo com extinção ondulante (2) e xisto (3). Imagem com luz transmitida polarizada.

#### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Lâmina confeccionada a partir de areia fixada em resina.

Areia artificial quartzosa, provavelmente obtida a partir da britagem de cascalho aluvionar.

Todos os fragmentos da areia se encontram extremamente fraturados, provavelmente em função do impacto da britagem.

Composta principalmente por quartzo em fragmentos isolados, irregulares e mal classificados (tamanhos variados, com predomínio da fração de areia média a grosseira, com grãos maiores do que 1 cm). O ângulo de extinção ondulante dos grãos de quartzo é baixo ( $< 20^\circ$ ) e cerca de 5% dos grãos de quartzo possuem cobertura ferruginosa. Ocorrem ainda alguns fragmentos de rocha com quartzo microcristalino ( $< 10\%$ ). Fragmentos de rocha quartzosa contendo cristais de quartzo com contatos imbricados, suturados e com extinção ondulante, indicando recristalização, perfazem 15% da amostra na lâmina estudada. Existem ainda, fragmentos de laterita, da ordem de 15% e fragmentos de xistos (muscovita+feldspatos+quartzo), cerca de 5%.

FONTE: Furnas (2019).

## APÊNDICE B

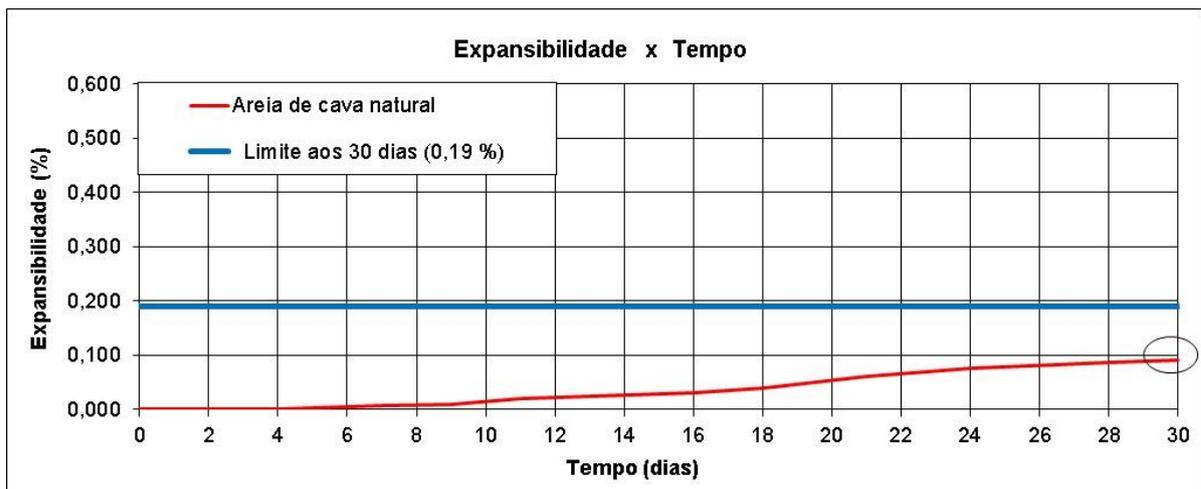
A areia de cava natural foi ensaiada de acordo com a NBR 15577-4 (ABNT (2018)), obtendo os resultados de expansão apresentados no QUADRO B1 e FIGURA B1.

QUADRO B1 – Expansões médias – Areia natural.

| Agregado:              |              | Areia natural lavada      |       |       |
|------------------------|--------------|---------------------------|-------|-------|
| Cimento:               |              | Padrão                    |       |       |
| Idade de ensaio (dias) | Expansão (%) | Expansões individuais (%) |       |       |
| 0                      | 0,00         | 0,000                     | 0,000 | 0,000 |
| 2                      | 0,00         | 0,000                     | 0,000 | 0,000 |
| 4                      | 0,00         | 0,000                     | 0,000 | 0,000 |
| 7                      | 0,01         | 0,010                     | 0,010 | 0,000 |
| 9                      | 0,01         | 0,010                     | 0,010 | 0,010 |
| 11                     | 0,02         | 0,020                     | 0,020 | 0,020 |
| 14                     | 0,02         | 0,030                     | 0,030 | 0,020 |
| 16                     | 0,03         | 0,030                     | 0,030 | 0,030 |
| 18                     | 0,04         | 0,040                     | 0,040 | 0,040 |
| 21                     | 0,06         | 0,060                     | 0,060 | 0,060 |
| 24                     | 0,07         | 0,070                     | 0,080 | 0,080 |
| 28                     | 0,08         | 0,080                     | 0,090 | 0,090 |
| 30                     | 0,09         | 0,090                     | 0,090 | 0,090 |

FONTE: Furnas (2019).

FIGURA B1 – Gráfico relacionando a expansão ao longo do tempo – Areia natural.



FONTE: Furnas (2019).

## APÊNDICE C

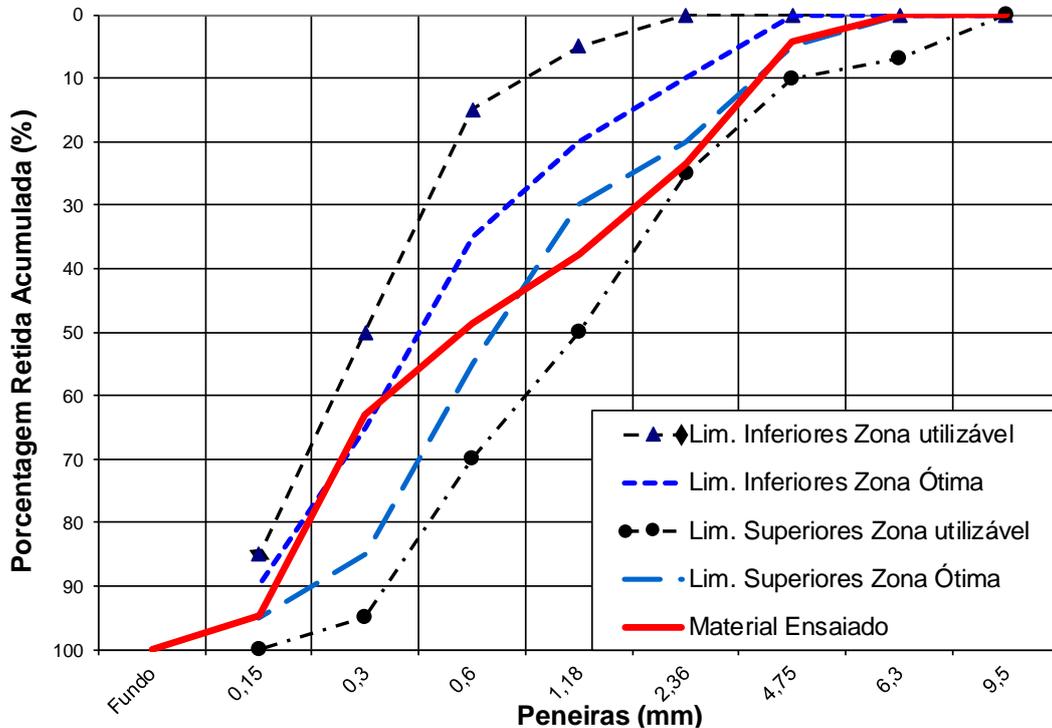
A areia de cava natural foi ensaiada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), para a determinação do diâmetro máximo característico e o módulo de finura, obtendo os resultados apresentados no QUADRO C1 e FIGURA C1.

QUADRO C1 – Distribuição granulométrica – Areia natural.

| Peneiras            |      | Material Retido |           | Porcentagem Retida  |           |       |           |
|---------------------|------|-----------------|-----------|---|-----------|-------|-----------|
| Número              | mm   | Amostra 1       | Amostra 2 | Amostra 1   | Amostra 2 | Média | Acumulada |
| 1/4"                | 6,3  | 0,0             | 0,0       | 0,0%  | 0,0%      | 0%    | 0%        |
| 4                   | 4,8  | 12,1            | 17,7      | 3,6%  | 5,1%      | 4%    | 4%        |
| 8                   | 2,4  | 68,0            | 63,0      | 20,2%   | 18,1%     | 19%   | 23%       |
| 16                  | 1,2  | 48,2            | 50,6      | 14,3%   | 14,5%     | 14%   | 38%       |
| 30                  | 0,6  | 35,0            | 39,3      | 10,4%   | 11,3%     | 11%   | 49%       |
| 50                  | 0,3  | 47,6            | 51,5      | 14,1%   | 14,8%     | 14%   | 63%       |
| 100                 | 0,15 | 102,9           | 113,1     | 30,5%   | 32,4%     | 31%   | 95%       |
| Fundo               |      | 23,2            | 13,7      | 6,9%  | 3,9%      | 5%    | 100%      |
| Massa Final (g):    |      | 337,0           | 348,9     | 100,0%  | 100,0%    | 100%  | -         |
| Massa Inicial (g):  |      | 337,6           | 349,4     | Formulário<br>$\frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100$  |           |       |           |
| Diferença (< 0,3%): |      | 0,18            | 0,14      |   |           |       |           |
| Módulo de Finura:   |      | 2,72            |           | M.F. = soma das % ret. acum. em peneiras de série normal ÷ 100<br>D.M.C. = Peneira (mm) com % ret. acumulada ≤ 5% |           |       |           |
| D.M.C. (mm):        |      | 4,8 mm          |           |   |           |       |           |

FONTE: Lactec (2019).

FIGURA C1 – Curva granulométrica – Areia natural.



FONTE: Lactec (2019).

As especificações apresentadas na NBR 7211 (ABNT, 2009), para a definição dos limites granulométricos aplicados à agregados miúdos, conforme os parâmetros de zona utilizável e ótima, são apresentados a seguir.

- O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90;
- O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20;
- O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50;
- Podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

O ensaio para a determinação da absorção de água seguiu a nomenclatura da NBR NM 30 (ABNT, 2001), obtendo o resultado para a areia de cava natural de 1,2 %, conforme QUADRO C2, dado essencial para a elaboração dos traços de argamassa e concreto, assim como os demais resultados que serão apresentados a seguir.

QUADRO C2 – Absorção de água – Areia natural.

|                | Amostra 1 | Amostra 2 |
|----------------|-----------|-----------|
| Massa seca (g) | 1064,6    | 1246,5    |
| Massa SSS (g)  | 1077,4    | 1262,0    |
| Absorção       | 1,20%     | 1,24%     |
| Absorção Média | 1,2%      |           |

FONTE: Lactec (2019).

Já para a determinação da massa específica SSS, massa específica seca e massa específica média, a areia de cava natural foi analisada conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009), obtendo os resultados apresentados no QUADRO C3.

QUADRO C3 – Massa específica – Areia natural.

|  | Amostra 1 | Amostra 2         |
|--|-----------|-------------------|
| Massa específica SSS (g/cm <sup>3</sup> )  | 2,56      | 2,56              |
| Massa específica Seca (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,53      | 2,54              |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )      | 2,60      | 2,60              |
| Massa específica média                     | 2,60      | g/cm <sup>3</sup> |

FONTE: Lactec (2019).

Seguiu-se a metodologia da NBR NM 46 (ABNT, 2003) para a determinação do material fino passante na peneira de malha com abertura de 0,075 mm, sendo o resultado apresentado no QUADRO C4.

QUADRO C4 – Teor de material pulverulento – Areia natural.

|                    | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Média |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| Massa Inicial (g): | 152,8     | 150,0     | 153,1     | -     |
| Massa Final (g):   | 151,6     | 149,0     | 152,1     | -     |
| TEOR DE PULV. (%): | 0,8       | 0,7       | 0,7       | 0,7   |

FONTE: Lactec (2019).

Obteve-se para o teor de material pulverulento valor inferior ao limite mínimo de 3% estipulado pela NBR 7211 (ABNT, 2009), para a produção de concreto submetido a desgaste superficial.

Foi também determinado o teor de argila em torrões conforme a NBR 7218 (ABNT, 2010), presente no agregado miúdo, obtendo-se o resultado apresentado no Quadro C5. O valor obtido foi inferior ao limite mínimo de 3% estipulado pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para a produção de concretos. Tal fato justifica-se pelo agregado miúdo ter sido submetido a processos de lavagem após a extração do seu local de origem.

QUADRO C5 – Teor de torrões de argila – Areia natural.

| Material retido entre as peneiras (mm)                         | Massa inicial (m <sub>i</sub> ) (g) | Massa final (m <sub>f</sub> ) (g) | Teor de argila em torrões (m <sub>t</sub> ) | Porcentagem retida individual da fração | Teor parcial de argila em torrões (%) |
|--|-------------------------------------|-----------------------------------|---|---|---------------------------------------|
| ≥ 1,18 e < 4,75  | 278,2                               | 277,9                             | 0,1%  | 33%                                     | 0,04%                                 |
| Teor de argila em torrões e materiais friáveis da amostra (%): |                                     |                                   |   |   | 0,04%                                 |

FONTE: Lactec (2019).

## APÊNDICE D

Certificado referente à análise petrográfica para o agregado graúdo potencialmente inócuo para RAA.



### CERTIFICADO DE ANÁLISE CER EC 0108/2018

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Executante:</b>               | Institutos Lactec<br>Rodovia BR-116, km 98, nº 8813   Jardim das Américas<br>Caixa Postal 19067   CEP 81531-980   Curitiba – Paraná – Brasil   |
| <b>Metodologia:</b>              | Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto ABNT NBR 15577-3.<br>Descrição petrográfica mesoscópica complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida. Porcentagem mineral obtida por estimativa visual. |
| <b>Equipamento:</b>              | Microscópio petroográfico, Axio Scope.A1, marca: Carl Zeiss. Sistema de captura e tratamento de imagem Zen.  |
| <b>Identificação da amostra:</b> | <b>1.1026.18</b>   |

#### Descrição Petrográfica

|  |
|--|
| <b>1.1. Tipo de amostra:</b> Pedra brita.  |
| <b>1.2. Forma do fragmento/ Índice de forma (para brita ou pedrisco):</b> Equidimensional. |
| <b>1.3. Propriedades Físico-Mecânicas:</b> Rocha muito coerente.                           |
| <b>1.4. Cor:</b> Cinza claro.  |
| <b>1.5. Estrutura:</b> Maciça.   |
| <b>1.6. Litotipo:</b> Granito.   |

**Descrição mesoscópica:**  
Rocha de cor cinza claro, de granulação média a grossa (<1,0 cm), constituída por cristais de feldspato alcalino, quartzo, plagioclásio e biotita. Possui estrutura maciça e textura fanerítica inequigranular média a grossa.

#### 1.7. Composição mineral:

##### Principal:

| Mineral            | %  | Mineral      | %  |
|--------------------|----|--------------|----|
| Feldspato alcalino | 40 | Plagioclásio | 15 |
| Quartzo            | 35 | Biotita      | 10 |

##### Subordinada:

| Mineral                     | %      | Mineral  | %      |
|-----------------------------|--------|----------|--------|
| Minerais metálicos (opacos) | traços | Zircão   | traços |
| Titanita                    | traços | Sericita | traços |
| Apatita                     | traços |          |        |

##### Deletérios:

| Mineral               | %* | Mineral | %* |
|-----------------------|----|---------|----|
| Quartzo microgranular | <1 |         |    |

\*Estimativa de porcentagem <1%; 1% a 5%; >5% dos minerais principais ou subordinados.

#### Descrição microscópica:

Rocha de granulação média a grossa (<1,0 cm), formada por cristais de feldspato alcalino, quartzo, plagioclásio e biotita. Possui estrutura maciça e textura inequigranular média a grossa.

O feldspato alcalino está na forma de cristais subidiomórficos prismáticos, de granulação média a grossa (<1,0 cm), límpidos, com intercrescimento perítico do tipo filete. Possui fraturamento incipiente e inclusões de quartzo, biotita e mirmequitas.

O quartzo ocorre como cristais xenomórficos, de granulação média (1,0 – <5,0 mm), com extinção ondulante fraca, intersticiais ao feldspato alcalino. Também ocorre intercrescido com plagioclásio, na forma de cristais vermiformes, caracterizando textura mirmequítica.



## CERTIFICADO DE ANÁLISE

### CER EC 0108/2018

O plagioclásio está na forma de cristais subidiomórficos prismáticos, de granulação média (1,0 – <5,0 mm), límpidos a fracamente sericitizados ao longo de microfraturas. Também ocorre na forma de cristais xenomórficos com textura mirmequítica no contato com cristais de feldspato alcalino.

A biotita ocorre em agregados de cristais subidiomórficos a idiomórficos placoides, de granulação média (1,0 – <5,0mm), intersticiais ao feldspato alcalino. Possui inclusões de apatita, zircão e minerais opacos.

Os minerais opacos ocorrem como cristais xenomórficos a subidiomórficos, de granulação fina (<1,0 mm), associados ou inclusos em biotita.

A titanita encontra-se na forma de cristais subidiomórficos, de granulação fina (<1,0 mm), intersticiais ao feldspato alcalino e quartzo. Apatita e zircão constituem finos cristais idiomórficos, inclusos em biotita.

**1.8. Textura:** Fanerítica inequigranular média a grossa.

**1.9. Granulação:** Média (1,0 – 5,0 mm) a grossa (<1,0 cm).

**2.0. Estado de alteração:** Rocha pouco alterada. Sericitização incipiente dos cristais de plagioclásio.

**2.1. Quartzo:**

Ângulo de extinção ondulante: Não se aplica.

Porcentagem de quartzo microgranular\*: <5%. Intercrescimento mirmequítico.

\*Estimativa de porcentagem <5%; 5% a 15%; >15%.

**2.2. Feldspatos:**

Texturas potencialmente reativas\*: Intercrescimento mirmequítico no contato com cristais de feldspato alcalino.

\*Intercrescimento mirmequítico; Pertita em chama.

**2.3. Granulação da matriz/ cimento (para rochas sedimentares):** Não se aplica.

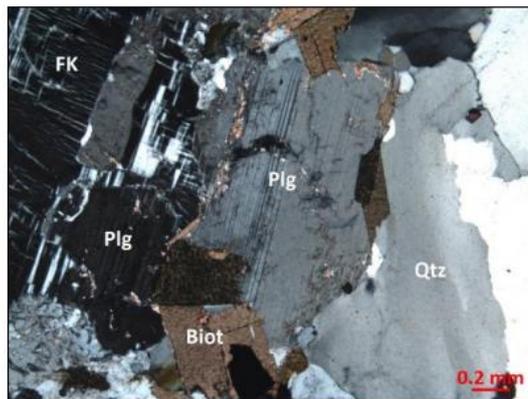
**2.4. Microfissuração:** Não se aplica.

**2.5. Tipo de rocha:** Ígnea.

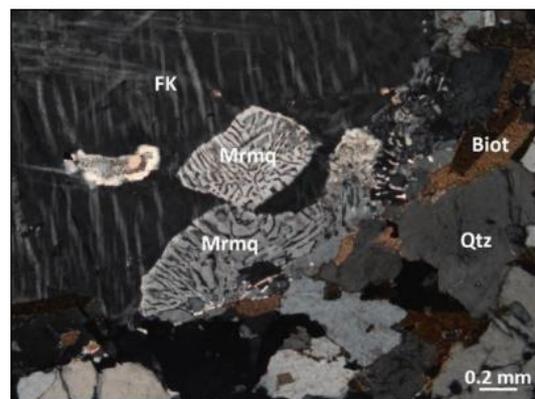
**2.6. Classificação petrográfica:** Sienogranito<sup>1</sup>.

**2.7. Reatividade potencial álcali-agregado:** Potencialmente inócuo.

**2.8. Fotomicrografia:**



A



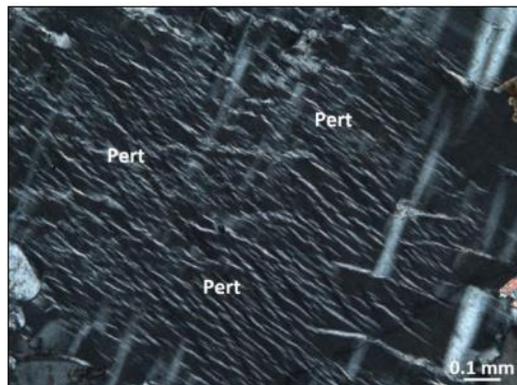
B

**A (aumento 50X/ luz polarizada)** – Relação de contato entre os cristais de feldspato alcalino (FK), quartzo (Qtz), plagioclásio (Plg) e biotita (Biot).

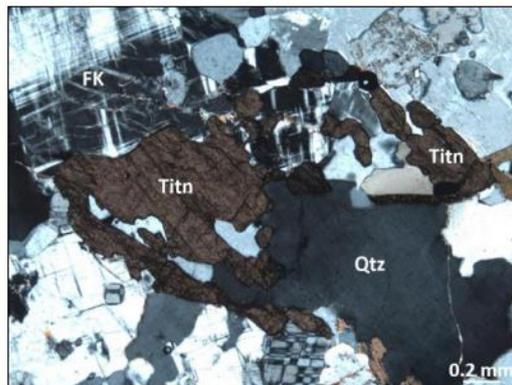
## CERTIFICADO DE ANÁLISE

### CER EC 0108/2018

**B (aumento 50X/ luz polarizada)** – Plagioclásio com textura mirmequítica (Mrmq) no contato com cristal de feldspato alcalino (FK).



C



D

**C (aumento 100X/ luz polarizada)** – Cristal de feldspato alcalino com intercrescimento pertítico (Pert) do tipo filete.

**D (aumento 50X/ luz polarizada)** – Cristal de titanita (Titn) intersticial aos cristais de feldspato alcalino (FK) e quartzo (Qtz).

#### 2.9. Conclusões:

O agregado foi classificado como potencialmente inócuo apesar da presença de <1% de quartzo microgranular (intercrescimento mirmequítico) e quartzo com extinção ondulante.

O limite máximo aceitável de quartzo microgranular ou deformado para classificação do agregado como potencialmente inócuo é de 5%.

<sup>1</sup>Le Maitre, R.W., Streickeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Wooley, A.R. *Igneous Rocks: A classification and glossary of terms* Cambridge University Press, 2002. p.236.

FONTE: Lactec (2018).

## APÊNDICE E

Certificado referente à análise petrográfica para o agregado graúdo potencialmente reativo para RAA.



### CERTIFICADO DE ANÁLISE CER EC 0108-1/2018

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Executante:</b>               | Institutos Lactec<br>Rodovia BR-116, km 98, nº 8813   Jardim das Américas<br>Caixa Postal 19067   CEP 81531-980   Curitiba – Paraná – Brasil   |
| <b>Metodologia:</b>              | Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto ABNT NBR 15577-3.<br>Descrição petrográfica mesoscópica complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida. Porcentagem mineral obtida por estimativa visual. |
| <b>Equipamento:</b>              | Microscópio petrográfico, Axio Scope.A1, marca: Carl Zeiss. Sistema de captura e tratamento de imagem Zen.   |
| <b>Identificação da amostra:</b> | 1.1027.18  |

#### Descrição Petrográfica

**1.1. Tipo de amostra:** Pedra brita.

**1.2. Forma do fragmento/ Índice de forma (para brita ou pedrisco):** Equidimensional.

**1.3. Propriedades Físico-Mecânicas:** Rocha muito coerente.

**1.4. Cor:** Cinza claro.

**1.5. Estrutura:** Maciça.

**1.6. Litotipo:** Granito.

#### Descrição mesoscópica:

Rocha de cor cinza claro, de granulação fina a média (<1,0 – 5,0 mm), formada por porfiroclastos de feldspato alcalino na forma de *augen* (olho); envolvidos por uma matriz muito fina (< 1,0 mm), de composição quartzo-feldspática com níveis de muscovita e biotita orientados. Possui foliação anastomosada e textura porfiroclástica.

#### 1.7. Composição mineral:

##### Principal:

| Mineral            | %  | Mineral   | %  |
|--------------------|----|-----------|----|
| Quartzo            | 35 | Muscovita | 15 |
| Feldspato alcalino | 30 | Biotita   | 10 |
| Plagioclásio       | 10 |           |    |

##### Subordinada:

| Mineral                     | %      | Mineral       | %      |
|-----------------------------|--------|---------------|--------|
| Minerais metálicos (opacos) | traços | Carbonato     | traços |
| Epidoto                     | traços | Argilomineral | traços |
| Sericita                    | traços | Zircão        | traços |
| Clorita                     | traços |               |        |

##### Deletérios:

| Mineral           | %* | Mineral               | %* |
|-------------------|----|-----------------------|----|
| Quartzo deformado | >5 | Quartzo microgranular | >5 |

\*Estimativa de porcentagem <1%; 1% a 5%; >5% dos minerais principais ou subordinados.

#### Descrição microscópica:

Rocha de granulação fina a média (<1,0 – 5,0 mm), formada por porfiroclastos de feldspato alcalino e plagioclásio na forma de *augen* (olho); *ribbons* (fitas) de quartzo; agregados de quartzo recristalizado e agregados quartzo-feldspáticos anastomosados; envolvidos por uma matriz microgranular (< 0,2 mm), de composição quartzo-feldspática com finos níveis de muscovita e biotita fortemente orientados. A rocha possui textura porfiroclástica e foliação milonítica com padrão anastomosado, definida



## CERTIFICADO DE ANÁLISE CER EC 0108-1/2018

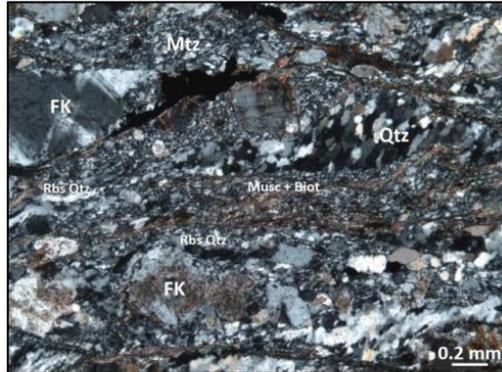
|  |   |   |
|--|---|---|
| <p>pela orientação dos cristais de muscovita, biotita e <i>ribbons</i> (fitas) de quartzo que envolve os porfiroclastos e agregados quartzo-feldspáticos.</p> <p>O feldspato alcalino ocorre como porfiroclastos em <i>augen</i> (forma de olho), de granulação fina a média (1,0 – 5,0 mm), levemente rotacionados e com sombra de pressão formada por feldspato alcalino, quartzo, plagioclásio, carbonato e minerais opacos. Possuem intercrescimento pertítico em chama e pertitas do tipo filete. Exibem extinção ondulante e fraturamento moderado. Na matriz microgranular e nos agregados quartzo-feldspáticos os cristais de feldspato alcalino estão xenomórficos, de granulação fina a muito fina (&lt; 1,0 mm), límpidos a fracamente alterados para argilominerais.</p> <p>O quartzo ocorre em <i>ribbons</i> (fitas) de cristais xenomórficos, de granulação fina (&lt; 1,0 mm), definindo a foliação milonítica; em agregados de cristais recristalizados, de granulação fina (&lt; 1,0 mm), dispostos obliquamente à foliação milonítica; e na matriz microgranular (&lt; 0,2 mm) associado aos feldspatos. Nos <i>ribbons</i> (fitas) e nos agregados de cristais recristalizados o quartzo exibe extinção ondulante com formação de subgrãos, novos grãos e contato lobado a planar entre as faces.</p> <p>O plagioclásio ocorre como porfiroclastos em <i>augen</i> (forma de olho), de granulação fina (&lt; 1,0 mm), levemente rotacionados, límpidos a fracamente sericitizados ao logo de microfraturas; e na matriz microgranular (&lt; 0,2 mm), associado ao quartzo e feldspato alcalino. Foi observada a presença de cristais intercrescidos com quartzo vermicular caracterizando textura mirmequítica no contato com porfiroclastos de feldspato alcalino.</p> <p>A muscovita e a biotita estão dispostas em níveis preferenciais, submilimétricos, na forma de cristais subidiomórficos lamelares, de granulação fina a muito fina (&lt; 1,0 mm), com orientação marcante definindo a foliação milonítica. A alteração é incipiente com cloritização da biotita.</p> <p>O epidoto ocorre em agregados de cristais xenomórficos, de granulação fina (&lt; 1,0 mm), associado à biotita. Minerais opacos e carbonato de granulação fina (&lt; 1,0 mm) encontram-se disseminados na matriz ou na sombra de pressão dos porfiroclastos de feldspato alcalino. O zircão constitui cristais idiomórficos, inclusos em biotita.</p> |   |   |
| <b>1.8. Textura:</b> Porfiroclástica com matriz granoblástica e lepidoblástica.  |   |   |
| <b>1.9. Granulação:</b> Fina a média (<1,0 – 5,0 mm).  |   |   |
| <b>2.0. Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada.<br>Argilização e sericitização incipiente a moderada dos cristais de feldspato alcalino e plagioclásio; cloritização incipiente dos cristais de biotita.  |   |   |
| <b>2.1. Quartzo:</b>   |   |   |
| <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td><b>Ângulo de extinção ondulante:</b> Não se aplica.</td> </tr> <tr> <td><b>Porcentagem de quartzo microgranular*:</b> &gt;15%.</td> </tr> </table> <p><i>*Estimativa de porcentagem &lt;5%; 5% a 15%; &gt;15%.</i></p>  | <b>Ângulo de extinção ondulante:</b> Não se aplica.   | <b>Porcentagem de quartzo microgranular*:</b> >15%. |
| <b>Ângulo de extinção ondulante:</b> Não se aplica.  |   |   |
| <b>Porcentagem de quartzo microgranular*:</b> >15%.  |   |   |
| <b>2.2. Feldspatos:</b>  |   |   |
| <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td><b>Texturas potencialmente reativas*:</b> Pertita em chama nos porfiroclastos de feldspato alcalino e textura mirmequítica no contato com porfiroclastos de feldspato alcalino.</td> </tr> </table> <p><i>*Intercrescimento mirmequítico; Pertita em chama.</i></p>   | <b>Texturas potencialmente reativas*:</b> Pertita em chama nos porfiroclastos de feldspato alcalino e textura mirmequítica no contato com porfiroclastos de feldspato alcalino. |   |
| <b>Texturas potencialmente reativas*:</b> Pertita em chama nos porfiroclastos de feldspato alcalino e textura mirmequítica no contato com porfiroclastos de feldspato alcalino.  |   |   |
| <b>2.3. Granulação da matriz/ cimento (para rochas sedimentares):</b> Não se aplica.   |   |   |
| <b>2.4. Microfissuração:</b> Não se aplica.  |   |   |
| <b>2.5. Tipo de rocha:</b> Metamórfica.  |   |   |
| <b>2.6. Classificação petrográfica:</b> Milonito <sup>1</sup> .  |   |   |
| <b>2.7. Reatividade potencial álcali-agregado:</b> Potencialmente reativa.   |   |   |

<sup>1</sup>Winkler, H.G.F. *Petrogênese das rochas metamórficas*. São Paulo; Porto Alegre: E. Blucher: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1977.

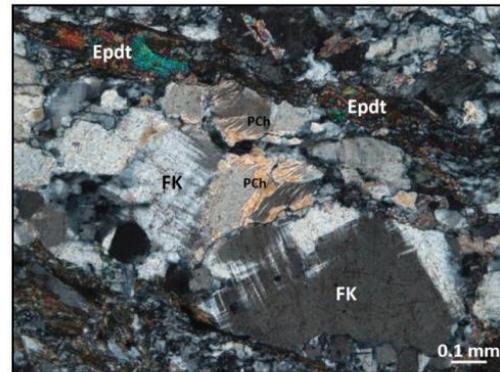
## CERTIFICADO DE ANÁLISE

### CER EC 0108-1/2018

#### 2.8. Fotomicrografia:



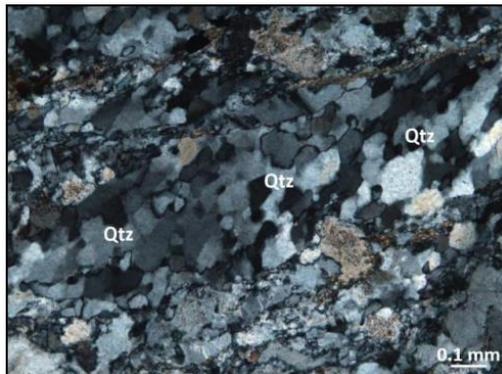
A



B

**A (aumento 50X/ luz polarizada)** – Foliação milonítica definida por *ribbons* (fitas) de quartzo (Rbs Qtz); agregados de quartzo (Qtz) recristalizado; e matriz (Mtz) microgranular quartzo-feldspática com finos níveis de muscovita (Musc) e biotita (Biot) orientados envolvendo porfiroclastos em *augen* (olho) de feldspato alcalino (FK).

**B (aumento 100X/ luz polarizada)** – Porfiroclasto de feldspato alcalino (FK) exibindo pertita em chama (PCh). Cristais de epidoto (Epdt) ocorrem associados aos níveis de muscovita e biotita com orientação preferencial.



C



D

**C (aumento 100X/ luz polarizada)** – Agregado de cristais de quartzo exibindo extinção ondulante com formação de subgrãos, novos grãos (recristalização) e contato suturado a planar entre as faces.

**D (aumento 50X/ luz polarizada)** – Porfiroclasto de feldspato alcalino (FK) com mirmequita (Mrmq) nas bordas, envolvido por matriz microgranular quartzo-feldspática e minerais micáceos (muscovita – Musc e biotita – Biot) orientados.

#### 2.9. Conclusões:

O agregado foi classificado como potencialmente reativo devido à presença de >5% de quartzo deformado (extinção ondulante); >15% de quartzo microgranular (matriz e intercrescimento mirmequítico); e feldspato alcalino com pertita em chama.

O valor máximo aceitável de quartzo deformado ou microgranular para classificação do agregado como potencialmente inócuo é de 5%.

A norma não sugere um limite máximo aceitável de feldspato alcalino com pertita em chama para classificação do agregado como potencialmente inócuo.

FONTE: Lactec (2018).

## APÊNDICE F

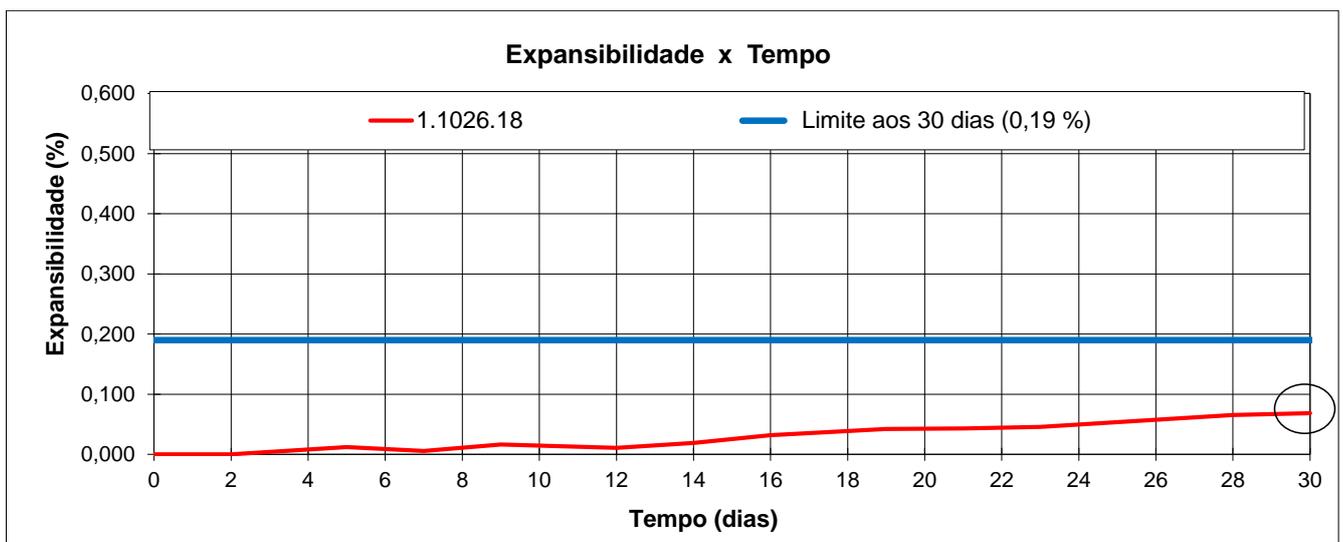
O agregado graúdo potencialmente inócuo foi ensaiado de acordo com a NBR 15577-4 (ABNT (2018)), obtendo os resultados de expansão apresentados no QUADRO F1 e FIGURA F1.

QUADRO F1 – Expansões médias – Agregado Graúdo inócuo.

| Agregado:              |                    | Potencialmente inócuo     |       |       |
|------------------------|--------------------|---------------------------|-------|-------|
| Cimento:               |                    | Padrão                    |       |       |
| Idade de ensaio (dias) | Expansão média (%) | Expansões individuais (%) |       |       |
| 0                      | 0,00               | 0,000                     | 0,000 | 0,000 |
| 2                      | 0,00               | 0,000                     | 0,000 | 0,000 |
| 5                      | 0,01               | 0,012                     | 0,012 | 0,011 |
| 7                      | 0,01               | 0,006                     | 0,006 | 0,006 |
| 9                      | 0,02               | 0,017                     | 0,017 | 0,015 |
| 12                     | 0,01               | 0,011                     | 0,011 | 0,010 |
| 14                     | 0,02               | 0,020                     | 0,020 | 0,017 |
| 16                     | 0,03               | 0,033                     | 0,032 | 0,030 |
| 19                     | 0,04               | 0,043                     | 0,042 | 0,041 |
| 21                     | 0,04               | 0,042                     | 0,046 | 0,041 |
| 23                     | 0,05               | 0,048                     | 0,047 | 0,042 |
| 28                     | 0,07               | 0,067                     | 0,066 | 0,064 |
| 30                     | 0,07               | 0,072                     | 0,070 | 0,064 |

FONTE: Lactec (2019).

FIGURA F1 – Gráfico relacionando a expansão ao longo do tempo – Agregado graúdo.



FONTE: Lactec (2019).

## APÊNDICE G

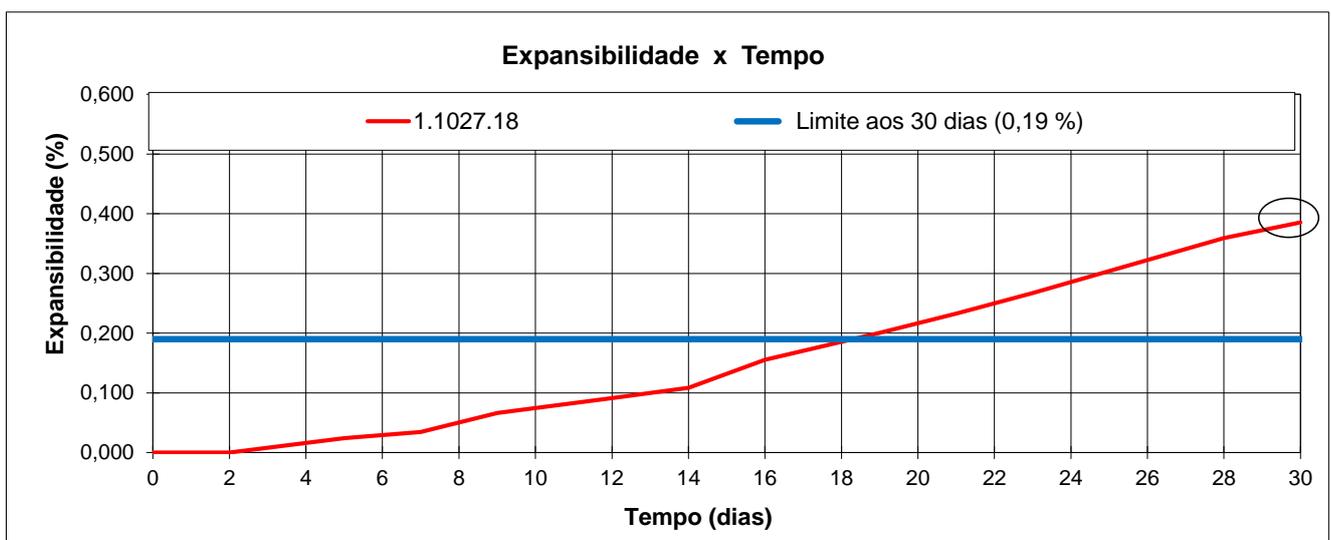
O agregado graúdo potencialmente reativo foi ensaiado de acordo com a NBR 15577-4 (ABNT (2018)), obtendo os resultados de expansão apresentados no QUADRO G1 e FIGURA G1.

QUADRO G1 – Expansões médias – Agregado Graúdo reativo.

| Agregado:              |              | Potencialmente reativo    |       |       |
|------------------------|--------------|---------------------------|-------|-------|
| Cimento:               |              | Padrão                    |       |       |
| Idade de ensaio (dias) | Expansão (%) | Expansões individuais (%) |       |       |
| 0                      | 0,00         | 0,000                     | 0,000 | 0,000 |
| 2                      | 0,00         | 0,000                     | 0,000 | 0,000 |
| 5                      | 0,02         | 0,023                     | 0,024 | 0,025 |
| 7                      | 0,03         | 0,031                     | 0,035 | 0,037 |
| 9                      | 0,07         | 0,064                     | 0,066 | 0,069 |
| 12                     | 0,09         | 0,087                     | 0,091 | 0,096 |
| 14                     | 0,11         | 0,117                     | 0,079 | 0,128 |
| 16                     | 0,16         | 0,148                     | 0,154 | 0,164 |
| 19                     | 0,20         | 0,193                     | 0,198 | 0,211 |
| 21                     | 0,23         | 0,226                     | 0,230 | 0,242 |
| 23                     | 0,27         | 0,258                     | 0,263 | 0,280 |
| 28                     | 0,36         | 0,349                     | 0,352 | 0,377 |
| 30                     | 0,39         | 0,375                     | 0,380 | 0,402 |

FONTE: Lactec (2019).

FIGURA G1 – Gráfico relacionando a expansão ao longo do tempo – Agregado graúdo.



FONTE: Lactec (2019).

## APÊNDICE H

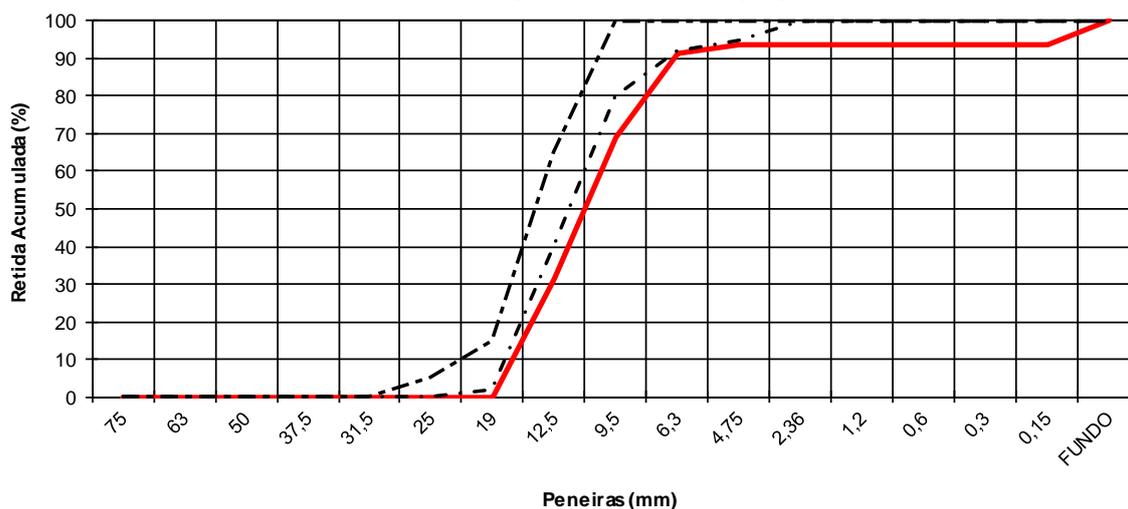
O agregado graúdo potencialmente inócuo para RAA foi ensaiado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), para a determinação do diâmetro máximo característico e o módulo de finura, obtendo os resultados apresentados no QUADRO H1 e FIGURA H1.

QUADRO H1 – Distribuição granulométrica – Agregado inócuo.

| Peneiras            |      | Material Retido |           | Porcentagem Retida   |           |       |           |
|---------------------|------|-----------------|-----------|--|-----------|-------|-----------|
| Número              | mm   | Amostra 1       | Amostra 2 | Amostra 1  | Amostra 2 | Média | Acumulada |
| 3/4"                | 19   | 0,0             | 0,0       | 0,0%   | 0,0%      | 0%    | 0%        |
| 1/2"                | 12,5 | 3050,7          | 3231,0    | 30,5%  | 32,3%     | 31%   | 31%       |
| 3/8"                | 9,5  | 3900,5          | 3593,6    | 39,0%  | 35,9%     | 37%   | 69%       |
| 1/4"                | 6,3  | 2151,2          | 2300,0    | 21,5%  | 23,0%     | 22%   | 91%       |
| 4                   | 4,8  | 273,4           | 266,8     | 2,7%   | 2,7%      | 3%    | 94%       |
| Fundo               |      | 623,2           | 606,4     | 6,2%   | 6,1%      | 6%    | 100%      |
| Massa Final (g):    |      | 9999,0          | 9997,8    | 100,0%   | 100,0%    | 100%  | -         |
| Massa Inicial (g):  |      | 10003,5         | 10006,4   | Formulário<br>$\frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100$ Diferença = |           |       |           |
| Diferença (< 0,3%): |      | 0,04            | 0,09      |  |           |       |           |
| Módulo de Finura:   |      | 6,32            |           | M.F. = Soma das % ret. acum. em peneiras de série normal ÷ 100 |           |       |           |
| D.M.C. (mm):        |      | 19 mm           |           | D.M.C. = Peneira (mm) com % ret. acumulada ≤ 5%                |           |       |           |

FONTE: Lactec (2019).

FIGURA H1 – Curva granulométrica – Agregado inócuo.



FONTE: Lactec (2019).

A curva representada pela Figura H1 destaca a distribuição do agregado pela linha contínua, em relação às aberturas das malhas de peneiras e porcentagem retida acumulada. Os traços pontilhados definem, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), os

limites para caracterização de brita 9,5/25. Pelo resultado obtido, é possível verificar que o agregado possui graduação pouco inferior à classificação granulométrica citada.

Para a caracterização dos agregados graúdos quanto ao teor de material fino passante na peneira de malha 0,075 mm, foi utilizada a metodologia da NBR NM 46 (ABNT, 2003), sendo o resultado apresentado no QUADRO H2 para a brita potencialmente inócua.

QUADRO H2 – Teor de material pulverulento – Agregado inócua.

|                    | Amostra 1 | Amostra 2 | Média |
|--------------------|-----------|-----------|-------|
| Massa Inicial (g): | 3168,7    | 3988,4    | -     |
| Massa Final (g):   | 3147,9    | 3956,9    | -     |
| TEOR DE PULV. (%): | 0,7       | 0,8       | 0,7   |

FONTE: Lactec (2019).

O resultado obtido está dentro dos limites máximos aceitáveis pela NBR 7211 (ABNT, 2009), que limita tal parâmetro em 1,0% para agregado graúdo a ser utilizado na produção de concretos.

Para a determinação da massa específica, foi seguida a metodologia apresentada na NBR NM 53 (ABNT, 2009), obtendo os resultados para os agregados na condição seca, saturada com superfície seca (SSS), massa específica aparente e o teor de absorção de água, parâmetros fundamentais para a elaboração dos traços de concreto. Os resultados obtidos estão apresentados no QUADRO H3.

QUADRO H3 – Massa específica – Agregado inócua.

|   | Amostra 1 | Amostra 2 | Média |                      |
|---|-----------|-----------|-------|----------------------|
| Massa específica do agregado seco<br>$d = m/(m-m_a)$      | 2,69      | 2,69      | 2,69  | (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Massa específica na condição sss<br>$d_s = m_s/(m_s-m_a)$ | 2,66      | 2,66      | 2,66  | (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Massa específica aparente<br>$d_a = m/(m_s-m_a)$          | 2,64      | 2,64      | 2,64  | (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Absorção<br>$A = (m_s-m)/m \cdot 100$                     | 0,6%      | 0,7%      | 0,6%  | (%)                  |

FONTE: Lactec (2019).

Foi realizado o ensaio para a determinação do índice de forma do agregado graúdo pelo método do paquímetro, conforme a NBR 7809 (ABNT (2019)). O resultado obtido está apresentado no QUADRO H4. O método refere-se à determinação do grau

de arredondamento das partículas, por meio da relação entre seu comprimento e espessura.

QUADRO H4 – Índice de forma – Agregado inócuo.

| Peneiras<br>mm | Porcentagem<br>retida média |     | Número<br>grãos | Índice de forma<br>da fração | Índice de forma |
|----------------|-----------------------------|-----|-----------------|------------------------------|-----------------|
|                |                             |     |                 |                              |                 |
| 12,5           | 31%                         | 31% | 91              | 1,6                          | 142,9           |
| 9,5            | 37%                         | 37% | 109             | 1,8                          | 192,5           |
| SOMA           | -                           | 68% | 200             | -                            | <b>1,7</b>      |

FONTE: Lactec (2019).

O resultado obtido está em conformidade com os requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009), tendo como valor máximo admitido para a produção de concreto o índice de forma igual a 3.

No QUADRO H5 está apresentado o resultado obtido no ensaio para a determinação da abrasão “Los Angeles” de agregados graúdos.

QUADRO H5 – Abrasão “Los Angeles” – Agregado inócuo.

| Amostra                     |        | Material         |
|-----------------------------|--------|------------------|
| 1.1026.18                   |        | Brita 9,5 / 12,5 |
| Peneiras                    |        | Massa (g)        |
| Passante                    | Retida | Amostra 1        |
| 19                          | 12,5   | 2501             |
| 12,5                        | 9,5    | 2501             |
| Massa Total Inicial:        |        | 5002             |
| Massa Final ( > # 1,7 mm ): |        | 3413             |
| Desgaste ( % ):             |        | 32%              |
| <b>Gradação do Ensaio:</b>  |        | <b>B</b>         |

FONTE: Lactec (2019).

O resultado obtido também está em conformidade com a NBR 7211 (ABNT, 2009), que limita o desgaste máximo em 50% para agregados graúdos a serem utilizados na produção de concreto.

## APÊNDICE I

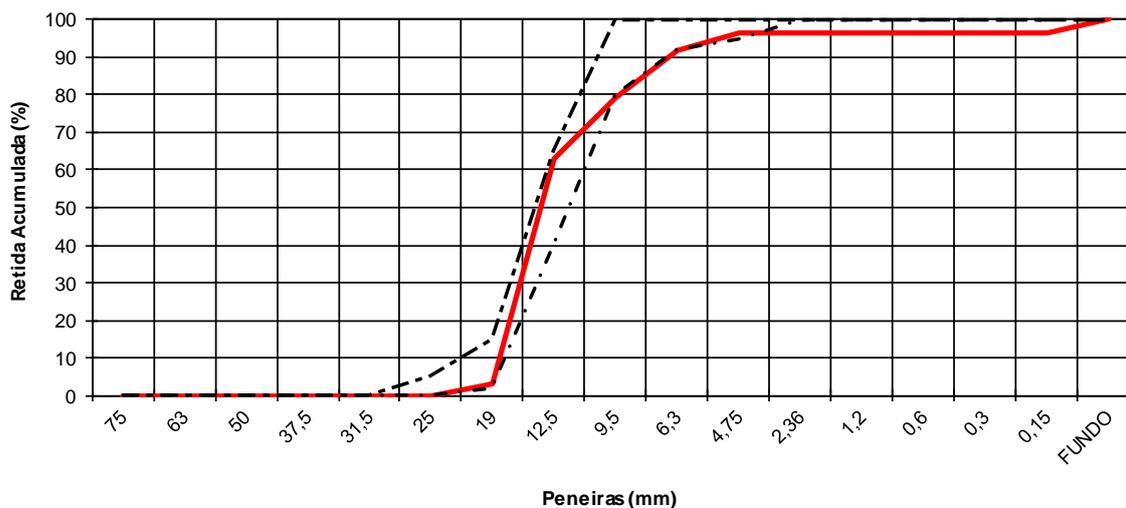
O agregado gráudo potencialmente reativo para RAA foi ensaiado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), para a determinação do diâmetro máximo característico e o módulo de finura, obtendo os resultados apresentados no QUADRO I1 e FIGURA I1.

QUADRO I1 – Distribuição granulométrica – Agregado reativo.

| Peneiras            |      | Material Retido |           | Porcentagem Retida   |           |       |           |
|---------------------|------|-----------------|-----------|--|-----------|-------|-----------|
| Número              | mm   | Amostra 1       | Amostra 2 | Amostra 1  | Amostra 2 | Média | Acumulada |
| 1"                  | 25   | 0,0             | 0,0       | 0,0%   | 0,0%      | 0%    | 0%        |
| 3/4"                | 19   | 250,0           | 421,0     | 2,3%   | 3,9%      | 3%    | 3%        |
| 1/2"                | 12,5 | 6422,0          | 6499,0    | 60,0%  | 59,6%     | 60%   | 63%       |
| 3/8"                | 9,5  | 1781,0          | 1773,0    | 16,6%  | 16,3%     | 16%   | 79%       |
| 1/4"                | 6,3  | 1389,0          | 1341,0    | 13,0%  | 12,3%     | 13%   | 92%       |
| 4                   | 4,8  | 460,0           | 467,0     | 4,3%   | 4,3%      | 4%    | 96%       |
| Fundo               |      | 403,0           | 401,0     | 3,8%   | 3,7%      | 4%    | 100%      |
| Massa Final (g):    |      | 10705,0         | 10902,0   | 100,0%   | 100,0%    | 100%  | -         |
| Massa Inicial (g):  |      | 10709,0         | 10907,0   | Formulário<br>$\frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100$             |           |       |           |
| Diferença (< 0,3%): |      | 0,04            | 0,05      |  |           |       |           |
| Módulo de Finura:   |      | 6,60            |           | M.F. = Soma das % ret. acum. em peneiras de série normal ÷ 100 |           |       |           |
| D.M.C. (mm):        |      | 19 mm           |           | D.M.C. = Peneira (mm) com % ret. acumulada ≤ 5%                |           |       |           |

FONTE: Lactec (2019).

FIGURA I1 – Curva granulométrica – Agregado reativo.



FONTE: Lactec (2019).

A curva representada pela FIGURA I1 destaca a distribuição do agregado pela linha contínua, em relação às aberturas das malhas de peneiras e porcentagem retida

acumulada. Os traços pontilhados definem, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), os limites para caracterização de brita 9,5/25. Pelo resultado obtido, é possível verificar que o agregado possui graduação bem ajustada à classificação granulométrica citada.

Para a caracterização dos agregados graúdos quanto ao teor de material fino passante na peneira de malha 0,075 mm, foi utilizada a metodologia da NBR NM 46 (ABNT, 2003), sendo o resultado apresentado no QUADRO I2 para a brita potencialmente reativa.

QUADRO I2 – Teor de material pulverulento – Agregado reativo.

|                    | Amostra 1 | Amostra 2 | Média |
|--------------------|-----------|-----------|-------|
| Massa Inicial (g): | 2740,5    | 3471,1    | -     |
| Massa Final (g):   | 2714,4    | 3439,7    | -     |
| TEOR DE PULV. (%): | 1,0       | 0,9       | 0,9   |

FONTE: Lactec (2019).

O resultado obtido está dentro dos limites máximos aceitáveis pela NBR 7211 (ABNT, 2009), que limita tal parâmetro em 1,0% para agregado graúdo a ser utilizado na produção de concretos.

Para a determinação da massa específica, foi seguida a metodologia apresentada na NBR NM 53 (ABNT, 2009), obtendo os resultados para os agregados na condição seca, saturada com superfície seca (SSS), massa específica aparente e o teor de absorção de água, parâmetros fundamentais para a elaboração dos traços de concreto. Os resultados obtidos estão apresentados no QUADRO I3.

QUADRO I3 – Massa específica – Agregado reativo.

|   | Amostra 1 | Amostra 2 | Média |                      |
|---|-----------|-----------|-------|----------------------|
| Massa específica do agregado seco<br>$d = m/(m - m_a)$      | 2,66      | 2,66      | 2,66  | (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Massa específica na condição sss<br>$d_s = m_s/(m_s - m_a)$ | 2,64      | 2,64      | 2,64  | (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Massa específica aparente<br>$d_a = m/(m_s - m_a)$          | 2,63      | 2,63      | 2,63  | (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Absorção<br>$A = (m_s - m)/m \cdot 100$                     | 0,6%      | 0,6%      | 0,6%  | (%)                  |

FONTE: Lactec (2019).

Foi realizado o ensaio para a determinação do índice de forma do agregado graúdo pelo método do paquímetro, conforme a NBR 7809 (ABNT (2019)). O resultado obtido está apresentado no QUADRO I4. O método refere-se à determinação do grau

de arredondamento das partículas, por meio da relação entre seu comprimento e espessura.

QUADRO I4 – Índice de forma – Agregado reativo.

| Peneiras<br>mm | Porcentagem<br>retida média |     | Número<br>grãos | Índice de forma<br>da fração | Índice de forma |
|----------------|-----------------------------|-----|-----------------|------------------------------|-----------------|
|                |                             |     |                 |                              |                 |
| 12,5           | 60%                         | 60% | 158             | 1,5                          | 241,8           |
| 9,5            | 16%                         | 16% | 42              | 1,8                          | 74,5            |
| SOMA           | -                           | 76% | 200             | -                            | <b>1,6</b>      |

FONTE: Lactec (2019).

O resultado obtido está em conformidade com os requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009), tendo como valor máximo admitido para a produção de concreto o índice de forma igual a 3.

No QUADRO I5 está apresentado o resultado obtido no ensaio para a determinação da abrasão Los Angeles de agregados graúdos.

QUADRO I5 – Abrasão Los Angeles – Agregado reativo.

| Amostra                     |        | Material         |
|-----------------------------|--------|------------------|
| 1.1027.18                   |        | Brita 9,5 / 12,5 |
| Peneiras                    |        | Massa (g)        |
| Passante                    | Retida | Amostra 1        |
| 19                          | 12,5   | 2500             |
| 12,5                        | 9,5    | 2500             |
| Massa Total Inicial:        |        | 5000             |
| Massa Final ( > # 1,7 mm ): |        | 4031             |
| Desgaste ( % ):             |        | 19%              |
| <b>Graduação do Ensaio:</b> |        | <b>B</b>         |

FONTE: Lactec (2019).

O resultado obtido também está em conformidade com a NBR 7211 (ABNT, 2009), que limita o desgaste máximo em 50% para agregados graúdos a serem utilizados na produção de concreto.

## APÊNDICE J

A TABELA J1 apresenta os valores tabelados referentes à distribuição F – Fischer-Snedecor, utilizados como valores críticos nas análises estatísticas, para todas as avaliações realizadas. V1 representa os graus de liberdade entre grupos e V2, dentro dos grupos de dados analisados.

TABELA J1 – Valores críticos da distribuição F – Fischer-Snedecor.

| GL<br>V2 | V1     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 20     | 40     | 60     | 120    | 240    |
| 1        | 161.4  | 199.5  | 215.7  | 224.6  | 230.2  | 234.0  | 236.8  | 238.9  | 240.5  | 241.9  | 243.0  | 243.9  | 244.7  | 245.4  | 245.9  | 248.0  | 251.1  | 252.2  | 253.3  | 253.8  |
| 2        | 18.513 | 19.000 | 19.164 | 19.247 | 19.296 | 19.329 | 19.353 | 19.371 | 19.385 | 19.396 | 19.405 | 19.412 | 19.419 | 19.424 | 19.429 | 19.446 | 19.471 | 19.479 | 19.487 | 19.492 |
| 3        | 10.128 | 9.552  | 9.277  | 9.117  | 9.013  | 8.941  | 8.887  | 8.845  | 8.812  | 8.785  | 8.763  | 8.745  | 8.729  | 8.715  | 8.703  | 8.660  | 8.594  | 8.572  | 8.549  | 8.538  |
| 4        | 7.709  | 6.944  | 6.591  | 6.388  | 6.256  | 6.163  | 6.094  | 6.041  | 5.999  | 5.964  | 5.936  | 5.912  | 5.891  | 5.873  | 5.858  | 5.803  | 5.717  | 5.688  | 5.658  | 5.643  |
| 5        | 6.608  | 5.786  | 5.409  | 5.192  | 5.050  | 4.950  | 4.876  | 4.818  | 4.772  | 4.735  | 4.704  | 4.678  | 4.655  | 4.636  | 4.619  | 4.558  | 4.464  | 4.431  | 4.398  | 4.382  |
| 6        | 5.987  | 5.143  | 4.757  | 4.534  | 4.387  | 4.284  | 4.207  | 4.147  | 4.099  | 4.060  | 4.027  | 4.000  | 3.976  | 3.956  | 3.938  | 3.874  | 3.774  | 3.740  | 3.705  | 3.687  |
| 7        | 5.591  | 4.737  | 4.347  | 4.120  | 3.972  | 3.866  | 3.787  | 3.726  | 3.677  | 3.637  | 3.603  | 3.575  | 3.550  | 3.529  | 3.511  | 3.445  | 3.340  | 3.304  | 3.267  | 3.249  |
| 8        | 5.318  | 4.459  | 4.066  | 3.838  | 3.688  | 3.581  | 3.500  | 3.438  | 3.388  | 3.347  | 3.313  | 3.284  | 3.259  | 3.237  | 3.218  | 3.150  | 3.043  | 3.005  | 2.967  | 2.947  |
| 9        | 5.117  | 4.256  | 3.863  | 3.633  | 3.482  | 3.374  | 3.293  | 3.230  | 3.179  | 3.137  | 3.102  | 3.073  | 3.048  | 3.025  | 3.006  | 2.936  | 2.826  | 2.787  | 2.748  | 2.727  |
| 10       | 4.965  | 4.103  | 3.708  | 3.478  | 3.326  | 3.217  | 3.135  | 3.072  | 3.020  | 2.978  | 2.943  | 2.913  | 2.887  | 2.865  | 2.845  | 2.774  | 2.661  | 2.621  | 2.580  | 2.559  |
| 11       | 4.844  | 3.982  | 3.587  | 3.357  | 3.204  | 3.095  | 3.012  | 2.948  | 2.896  | 2.854  | 2.818  | 2.788  | 2.761  | 2.739  | 2.719  | 2.646  | 2.531  | 2.490  | 2.448  | 2.426  |
| 12       | 4.747  | 3.885  | 3.490  | 3.259  | 3.106  | 2.996  | 2.913  | 2.849  | 2.796  | 2.753  | 2.717  | 2.687  | 2.660  | 2.637  | 2.617  | 2.544  | 2.426  | 2.384  | 2.341  | 2.319  |
| 13       | 4.667  | 3.806  | 3.411  | 3.179  | 3.025  | 2.915  | 2.832  | 2.767  | 2.714  | 2.671  | 2.635  | 2.604  | 2.577  | 2.554  | 2.533  | 2.459  | 2.339  | 2.297  | 2.252  | 2.230  |
| 14       | 4.600  | 3.739  | 3.344  | 3.112  | 2.958  | 2.848  | 2.764  | 2.699  | 2.646  | 2.602  | 2.565  | 2.534  | 2.507  | 2.484  | 2.463  | 2.388  | 2.266  | 2.223  | 2.178  | 2.155  |
| 15       | 4.543  | 3.682  | 3.287  | 3.056  | 2.901  | 2.790  | 2.707  | 2.641  | 2.588  | 2.544  | 2.507  | 2.475  | 2.448  | 2.424  | 2.403  | 2.328  | 2.204  | 2.160  | 2.114  | 2.090  |
| 16       | 4.494  | 3.634  | 3.239  | 3.007  | 2.852  | 2.741  | 2.657  | 2.591  | 2.538  | 2.494  | 2.456  | 2.425  | 2.397  | 2.373  | 2.352  | 2.276  | 2.151  | 2.106  | 2.059  | 2.035  |
| 17       | 4.451  | 3.592  | 3.197  | 2.965  | 2.810  | 2.699  | 2.614  | 2.548  | 2.494  | 2.450  | 2.413  | 2.381  | 2.353  | 2.329  | 2.308  | 2.230  | 2.104  | 2.058  | 2.011  | 1.986  |
| 18       | 4.414  | 3.555  | 3.160  | 2.928  | 2.773  | 2.661  | 2.577  | 2.510  | 2.456  | 2.412  | 2.374  | 2.342  | 2.314  | 2.290  | 2.269  | 2.191  | 2.063  | 2.017  | 1.968  | 1.943  |
| 19       | 4.381  | 3.522  | 3.127  | 2.895  | 2.740  | 2.628  | 2.544  | 2.477  | 2.423  | 2.378  | 2.340  | 2.308  | 2.280  | 2.256  | 2.234  | 2.155  | 2.026  | 1.980  | 1.930  | 1.905  |
| 20       | 4.351  | 3.493  | 3.098  | 2.866  | 2.711  | 2.599  | 2.514  | 2.447  | 2.393  | 2.348  | 2.310  | 2.278  | 2.250  | 2.225  | 2.203  | 2.124  | 1.994  | 1.946  | 1.896  | 1.870  |
| 21       | 4.325  | 3.467  | 3.072  | 2.840  | 2.685  | 2.573  | 2.488  | 2.420  | 2.366  | 2.321  | 2.283  | 2.250  | 2.222  | 2.197  | 2.176  | 2.096  | 1.965  | 1.916  | 1.866  | 1.839  |
| 22       | 4.301  | 3.443  | 3.049  | 2.817  | 2.661  | 2.549  | 2.464  | 2.397  | 2.342  | 2.297  | 2.259  | 2.226  | 2.198  | 2.173  | 2.151  | 2.071  | 1.938  | 1.889  | 1.838  | 1.811  |
| 23       | 4.279  | 3.422  | 3.028  | 2.796  | 2.640  | 2.528  | 2.442  | 2.375  | 2.320  | 2.275  | 2.236  | 2.204  | 2.175  | 2.150  | 2.128  | 2.048  | 1.914  | 1.865  | 1.813  | 1.785  |
| 24       | 4.260  | 3.403  | 3.009  | 2.776  | 2.621  | 2.508  | 2.423  | 2.355  | 2.300  | 2.255  | 2.216  | 2.183  | 2.155  | 2.130  | 2.108  | 2.027  | 1.892  | 1.842  | 1.790  | 1.762  |
| 25       | 4.242  | 3.385  | 2.991  | 2.759  | 2.603  | 2.490  | 2.405  | 2.337  | 2.282  | 2.236  | 2.198  | 2.165  | 2.136  | 2.111  | 2.089  | 2.007  | 1.872  | 1.822  | 1.768  | 1.740  |
| 26       | 4.225  | 3.369  | 2.975  | 2.743  | 2.587  | 2.474  | 2.388  | 2.321  | 2.265  | 2.220  | 2.181  | 2.148  | 2.119  | 2.094  | 2.072  | 1.990  | 1.853  | 1.803  | 1.749  | 1.720  |
| 27       | 4.210  | 3.354  | 2.960  | 2.728  | 2.572  | 2.459  | 2.373  | 2.305  | 2.250  | 2.204  | 2.166  | 2.132  | 2.103  | 2.078  | 2.056  | 1.974  | 1.836  | 1.785  | 1.731  | 1.702  |
| 28       | 4.196  | 3.340  | 2.947  | 2.714  | 2.558  | 2.445  | 2.359  | 2.291  | 2.236  | 2.190  | 2.151  | 2.118  | 2.089  | 2.064  | 2.041  | 1.959  | 1.820  | 1.769  | 1.714  | 1.685  |
| 29       | 4.183  | 3.328  | 2.934  | 2.701  | 2.545  | 2.432  | 2.346  | 2.278  | 2.223  | 2.177  | 2.138  | 2.104  | 2.075  | 2.050  | 2.027  | 1.945  | 1.806  | 1.754  | 1.698  | 1.669  |
| 30       | 4.171  | 3.316  | 2.922  | 2.690  | 2.534  | 2.421  | 2.334  | 2.266  | 2.211  | 2.165  | 2.126  | 2.092  | 2.063  | 2.037  | 2.015  | 1.932  | 1.792  | 1.740  | 1.683  | 1.654  |
| 40       | 4.085  | 3.232  | 2.839  | 2.606  | 2.449  | 2.336  | 2.249  | 2.180  | 2.124  | 2.077  | 2.038  | 2.003  | 1.974  | 1.948  | 1.924  | 1.839  | 1.693  | 1.637  | 1.577  | 1.544  |
| 50       | 4.034  | 3.183  | 2.790  | 2.557  | 2.400  | 2.286  | 2.199  | 2.130  | 2.073  | 2.026  | 1.986  | 1.952  | 1.921  | 1.895  | 1.871  | 1.784  | 1.634  | 1.576  | 1.511  | 1.476  |
| 60       | 4.001  | 3.150  | 2.758  | 2.525  | 2.368  | 2.254  | 2.167  | 2.097  | 2.040  | 1.993  | 1.952  | 1.917  | 1.887  | 1.860  | 1.836  | 1.748  | 1.594  | 1.534  | 1.467  | 1.430  |
| 80       | 3.960  | 3.111  | 2.719  | 2.486  | 2.329  | 2.214  | 2.126  | 2.056  | 1.999  | 1.951  | 1.910  | 1.875  | 1.845  | 1.817  | 1.793  | 1.703  | 1.545  | 1.482  | 1.411  | 1.370  |
| 100      | 3.936  | 3.087  | 2.696  | 2.463  | 2.305  | 2.191  | 2.103  | 2.032  | 1.975  | 1.927  | 1.886  | 1.850  | 1.819  | 1.792  | 1.768  | 1.676  | 1.515  | 1.450  | 1.376  | 1.333  |
| 120      | 3.920  | 3.072  | 2.680  | 2.447  | 2.290  | 2.175  | 2.087  | 2.016  | 1.959  | 1.910  | 1.869  | 1.834  | 1.803  | 1.775  | 1.750  | 1.659  | 1.495  | 1.429  | 1.352  | 1.307  |
| 240      | 3.881  | 3.033  | 2.642  | 2.409  | 2.252  | 2.136  | 2.048  | 1.977  | 1.919  | 1.870  | 1.829  | 1.793  | 1.761  | 1.733  | 1.708  | 1.614  | 1.445  | 1.375  | 1.290  | 1.237  |

## APÊNDICE K

Neste APÊNDICE estão apresentados os resultados individuais e análise de variância para cada avaliação efetuada no programa experimental. Também, são apresentados os resultados de significância ao longo do tempo pela ferramenta estatística de Tukey. Para essa avaliação, tomou-se como referência comparativa a idade de 28 dias (REF) em cada combinação (S= significativo – NS= não significativo).

Para a apresentação dos resultados, são demonstrados quadros com as análises de variância calculadas, contendo a fonte da variação, a soma dos quadrados (SQ), graus de liberdade (gl), média dos quadrados (MQ), “F” calculado, probabilidade de significância (P) e valores referentes à distribuição Fischer-Snedecor (Fcrítico).

O QUADRO K1 apresenta os resultados referentes à velocidade ultrassônica em corpos de prova de argamassa, unidade de medida: (m/s).

QUADRO K1 – Velocidade ultrassônica – Argamassa.

| Dados individuais |                                   |      |      |      |     | Análise de variância |        |        |        | Dados individuais |        |                                    |      |      |     | Análise de variância |        |        |        |        |       |
|-------------------|-----------------------------------|------|------|------|-----|----------------------|--------|--------|--------|-------------------|--------|------------------------------------|------|------|-----|----------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPV                   |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | REF - AGN - CPIX                   |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 4477                              | 4545 | 4532 | 4484 | REF | SQ                   | 175529 | 17227  | 192756 | 28                | 4386   | 4399                               | 4431 | 4405 | REF | SQ                   | 519746 | 22519  | 542266 |        |       |
| 91                | 4674                              | 4703 | 4674 | 4703 | S   | gl                   | 4      | 15     | 19     | 91                | 4545   | 4608                               | 4644 | 4658 | S   | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 4680                              | 4664 | 4724 | 4589 | S   | MQ                   | 43882  | 1148.4 |        | 180               | 4793   | 4862                               | 4862 | 4918 | S   | MQ                   | 129937 | 1501,3 |        |        |       |
| 270               | 4702                              | 4724 | 4739 | 4710 | S   | F                    | 38.211 |        |        | 270               | 4734   | 4802                               | 4787 | 4826 | S   | F                    | 86,551 |        |        |        |       |
| 360               | 4754                              | 4808 | 4823 | 4793 | S   | valor-P              | 1E-07  |        |        | 360               | 4747   | 4762                               | 4793 | 4747 | S   | valor-P              | 4E-10  |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3.0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     | F                    | 3,0556 |        |        |        |       |
| idades            | RAA isolada - AGR - CPV           |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | RAA isolada - AGR - CPIX           |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 4688                              | 4525 | 4688 | 4616 | REF | SQ                   | 194932 | 53757  | 248689 | 28                | 4393   | 4438                               | 4464 | 4425 | REF | SQ                   | 426967 | 20067  | 447034 |        |       |
| 91                | 4710                              | 4630 | 4608 | 4637 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     | 91                | 4659   | 4659                               | 4601 | 4717 | S   | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 4878                              | 4894 | 4747 | 4878 | S   | MQ                   | 48733  | 3583.8 |        | 180               | 4862   | 4886                               | 4823 | 4839 | S   | MQ                   | 106742 | 1337,8 |        |        |       |
| 270               | 4902                              | 4854 | 4823 | 4886 | S   | F                    | 13.598 |        |        | 270               | 4682   | 4712                               | 4742 | 4734 | S   | F                    | 79,79  |        |        |        |       |
| 360               | 4808                              | 4808 | 4680 | 4724 | NS  | valor-P              | 7E-05  |        |        | 360               | 4862   | 4785                               | 4770 | 4762 | S   | valor-P              | 6E-10  |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3.0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     | F                    | 3,0556 |        |        |        |       |
| idades            | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | DEF isolada - AGN - CPIX - Térmica |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 4367                              | 4373 | 4329 | 4451 | REF | SQ                   | 41650  | 26648  | 68299  | 28                | 4316   | 4380                               | 4310 | 4286 | REF | SQ                   | 198186 | 73260  | 271447 |        |       |
| 91                | 4420                              | 4493 | 4473 | 4493 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     | 91                | 4538   | 4298                               | 4431 | 4425 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 4498                              | 4538 | 4498 | 4457 | S   | MQ                   | 10413  | 1776.6 |        | 180               | 4484   | 4559                               | 4392 | 4392 | NS  | MQ                   | 49547  | 4884   |        |        |       |
| 270               | 4431                              | 4505 | 4444 | 4405 | NS  | F                    | 5.8611 |        |        | 270               | 4637   | 4644                               | 4630 | 4566 | S   | F                    | 10,145 |        |        |        |       |
| 360               | 4525                              | 4464 | 4477 | 4566 | S   | valor-P              | 0.0048 |        |        | 360               | 4559   | 4418                               | 4559 | 4573 | S   | valor-P              | 0,0004 |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3.0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     | F                    | 3,0556 |        |        |        |       |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica |      |      |      |     | Tukey     | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
|--------|---------------------------------|------|------|------|-----|-----------|--------|--------|--------|-------|
|        | 28                              | 91   | 180  | 270  | 360 |           |        |        |        |       |
| 28     | 4431                            | 4451 | 4457 | 4477 | REF | SQ        | 110078 | 27049  | 137127 |       |
| 91     | 4457                            | 4451 | 4451 | 4491 | NS  | gl        | 4      | 15     | 19     |       |
| 180    | 4498                            | 4438 | 4451 | 4406 | NS  | MQ        | 27520  | 1803,3 |        |       |
| 270    | 4724                            | 4594 | 4594 | 4587 | S   | F         | 15,261 |        |        |       |
| 360    | 4623                            | 4512 | 4587 | 4608 | S   | valor-P   | 4E-05  |        |        |       |
|        |                                 |      |      |      |     | F crítico | 3,0556 |        |        |       |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica |      |      |      |     | Tukey   | Fonte  | Entre | Dentro | Total |
|--------|----------------------------------|------|------|------|-----|---------|--------|-------|--------|-------|
|        | 28                               | 91   | 180  | 270  | 360 |         |        |       |        |       |
| 28     | 4425                             | 4399 | 4361 | 4412 | REF | SQ      | 214441 | 34200 | 248641 |       |
| 91     | 4601                             | 4524 | 4559 | 4552 | S   | gl      | 4      | 15    | 19     |       |
| 180    | 4608                             | 4451 | 4580 | 4601 | S   | MQ      | 53610  | 2280  |        |       |
| 270    | 4793                             | 4754 | 4673 | 4673 | S   | F       | 23,513 |       |        |       |
| 360    | 4580                             | 4580 | 4630 | 4601 | S   | valor-P | 3E-06  |       |        |       |
|        |                                  |      |      |      |     | F       | 3,0556 |       |        |       |

O QUADRO K2 apresenta os resultados referentes à velocidade ultrassônica em corpos de prova de concreto, unidade de medida: (m/s).

QUADRO K2 – Velocidade ultrassônica – Concreto.

| Dados individuais |                 |      |      |      |     | Análise de variância |        |        |        |       |
|-------------------|-----------------|------|------|------|-----|----------------------|--------|--------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPV |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
|                   | 28              | 91   | 180  | 270  | 360 |                      |        |        |        |       |
| 28                | 4515            | 4609 | 4598 | 4660 | REF | SQ                   | 246810 | 22629  | 269439 |       |
| 91                | 4694            | 4661 | 4661 | 4712 | S   | gl                   | 4      | 15     | 19     |       |
| 180               | 4890            | 4851 | 4823 | 4926 | S   | MQ                   | 61702  | 1508,6 |        |       |
| 270               | 4822            | 4834 | 4881 | 4869 | S   | F                    | 40,9   |        |        |       |
| 360               | 4839            | 4827 | 4855 | 4878 | S   | valor-P              | 7E-08  |        |        |       |
|                   |                 |      |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |       |

| Dados individuais |                  |      |      |      |     | Análise de variância |        |        |        |       |
|-------------------|------------------|------|------|------|-----|----------------------|--------|--------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPIV |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
|                   | 28               | 91   | 180  | 270  | 360 |                      |        |        |        |       |
| 28                | 4684             | 4680 | 4641 | 4777 | REF | SQ                   | 19196  | 43226  | 62421  |       |
| 91                | 4662             | 4532 | 4584 | 4648 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     |       |
| 180               | 4622             | 4706 | 4691 | 4648 | NS  | MQ                   | 4798,9 | 2881,7 |        |       |
| 270               | 4758             | 4711 | 4688 | 4587 | NS  | F                    | 1,6653 |        |        |       |
| 360               | 4702             | 4647 | 4651 | 4644 | NS  | valor-P              | 0,2101 |        |        |       |
|                   |                  |      |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |       |

| idades | RAA isolada - AGR - CPV |      |      |      |     | Tukey     | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
|--------|-------------------------|------|------|------|-----|-----------|--------|--------|--------|-------|
|        | 28                      | 91   | 180  | 270  | 360 |           |        |        |        |       |
| 28     | 4684                    | 4815 | 4886 | 4743 | REF | SQ        | 83265  | 104949 | 188213 |       |
| 91     | 4725                    | 4580 | 4606 | 4691 | NS  | gl        | 4      | 15     | 19     |       |
| 180    | 4740                    | 4752 | 4711 | 4722 | NS  | MQ        | 20816  | 6996,6 |        |       |
| 270    | 4975                    | 4847 | 4633 | 4890 | NS  | F         | 2,9752 |        |        |       |
| 360    | 4796                    | 4843 | 4804 | 4762 | NS  | valor-P   | 0,054  |        |        |       |
|        |                         |      |      |      |     | F crítico | 3,0556 |        |        |       |

| idades | RAA isolada - AGR - CPIV |      |      |      |     | Tukey     | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
|--------|--------------------------|------|------|------|-----|-----------|--------|--------|--------|-------|
|        | 28                       | 91   | 180  | 270  | 360 |           |        |        |        |       |
| 28     | 4874                     | 4781 | 4800 | 4699 | REF | SQ        | 57249  | 51941  | 109190 |       |
| 91     | 4623                     | 4699 | 4793 | 4670 | NS  | gl        | 4      | 15     | 19     |       |
| 180    | 4770                     | 4758 | 4831 | 4773 | NS  | MQ        | 14312  | 3462,8 |        |       |
| 270    | 4706                     | 4819 | 4669 | 4755 | NS  | F         | 4,1332 |        |        |       |
| 360    | 4699                     | 4619 | 4662 | 4608 | S   | valor-P   | 0,0188 |        |        |       |
|        |                          |      |      |      |     | F crítico | 3,0556 |        |        |       |

| idades | DEF isolada - AGR - CPV - Térmica |      |      |      |     | Tukey     | Fonte  | Entre | Dentro | Total |
|--------|-----------------------------------|------|------|------|-----|-----------|--------|-------|--------|-------|
|        | 28                                | 91   | 180  | 270  | 360 |           |        |       |        |       |
| 28     | 4542                              | 4587 | 4706 | 4598 | REF | SQ        | 33636  | 37710 | 71346  |       |
| 91     | 4621                              | 4626 | 4599 | 4641 | NS  | gl        | 4      | 15    | 19     |       |
| 180    | 4623                              | 4585 | 4526 | 4550 | NS  | MQ        | 8409   | 2514  |        |       |
| 270    | 4594                              | 4735 | 4655 | 4669 | NS  | F         | 3,3448 |       |        |       |
| 360    | 4615                              | 4508 | 4525 | 4532 | NS  | valor-P   | 0,038  |       |        |       |
|        |                                   |      |      |      |     | F crítico | 3,0556 |       |        |       |

| idades | DEF isolada - AGR - CPIV - Térmica |      |      |      |     | Tukey     | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
|--------|------------------------------------|------|------|------|-----|-----------|--------|--------|--------|-------|
|        | 28                                 | 91   | 180  | 270  | 360 |           |        |        |        |       |
| 28     | 4435                               | 4435 | 4435 | 4377 | REF | SQ        | 175019 | 19522  | 194541 |       |
| 91     | 4236                               | 4332 | 4337 | 4312 | S   | gl        | 4      | 15     | 19     |       |
| 180    | 4467                               | 4467 | 4488 | 4425 | NS  | MQ        | 43755  | 1301,5 |        |       |
| 270    | 4551                               | 4558 | 4490 | 4500 | S   | F         | 33,62  |        |        |       |
| 360    | 4569                               | 4614 | 4601 | 4525 | S   | valor-P   | 3E-07  |        |        |       |
|        |                                    |      |      |      |     | F crítico | 3,0556 |        |        |       |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica |      |      |      |     | Tukey     | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
|--------|---------------------------------|------|------|------|-----|-----------|--------|--------|--------|-------|
|        | 28                              | 91   | 180  | 270  | 360 |           |        |        |        |       |
| 28     | 4785                            | 4691 | 4777 | 4699 | REF | SQ        | 263598 | 57146  | 320744 |       |
| 91     | 4699                            | 4656 | 4508 | 4479 | S   | gl        | 4      | 15     | 19     |       |
| 180    | 4465                            | 4439 | 4458 | 4478 | S   | MQ        | 65900  | 3809,7 |        |       |
| 270    | 4528                            | 4418 | 4563 | 4512 | S   | F         | 17,298 |        |        |       |
| 360    | 4383                            | 4389 | 4435 | 4431 | S   | valor-P   | 2E-05  |        |        |       |
|        |                                 |      |      |      |     | F crítico | 3,0556 |        |        |       |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica |      |      |      |     | Tukey     | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
|--------|----------------------------------|------|------|------|-----|-----------|--------|--------|--------|-------|
|        | 28                               | 91   | 180  | 270  | 360 |           |        |        |        |       |
| 28     | 4515                             | 4498 | 4405 | 4512 | REF | SQ        | 314572 | 25900  | 340472 |       |
| 91     | 4648                             | 4625 | 4591 | 4588 | S   | gl        | 4      | 15     | 19     |       |
| 180    | 4732                             | 4680 | 4728 | 4651 | S   | MQ        | 78643  | 1726,7 |        |       |
| 270    | 4811                             | 4823 | 4811 | 4710 | S   | F         | 45,546 |        |        |       |
| 360    | 4832                             | 4793 | 4847 | 4855 | S   | valor-P   | 3E-08  |        |        |       |
|        |                                  |      |      |      |     | F crítico | 3,0556 |        |        |       |

O QUADRO K3 apresenta os resultados referentes à resistividade elétrica em corpos de prova de concreto, unidade de medida: (kΩ cm).

QUADRO K3 – Resistividade elétrica – Concreto.

| Dados individuais |                                   |      |      |      |     |           | Análise de variância |        |        |       | Dados individuais |                                    |       |       |     |           |        | Análise de variância |        |        |       |
|-------------------|-----------------------------------|------|------|------|-----|-----------|----------------------|--------|--------|-------|-------------------|------------------------------------|-------|-------|-----|-----------|--------|----------------------|--------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPV                   |      |      |      |     | Tukey     | Fonte                | Entre  | Dentro | Total | idades            | REF - AGN - CPIV                   |       |       |     |           | Tukey  | Fonte                | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 12,5                              | 12,8 | 12,5 | 12,1 | REF | SQ        | 27,505               | 5,4968 | 33     | 28    | 72,1              | 70,8                               | 73,4  | 70,4  | REF | SQ        | 590,11 | 919,68               | 1509,8 |        |       |
| 91                | 9,7                               | 8,8  | 9,9  | 8,6  | S   | gl        | 4                    | 15     | 19     | 91    | 87,5              | 79,4                               | 82,7  | 93,8  | NS  | gl        | 4      | 15                   | 19     |        |       |
| 180               | 12,0                              | 10,0 | 10,0 | 10,0 | S   | MQ        | 6,8763               | 0,3665 |        | 180   | 89,7              | 86,3                               | 74,3  | 69,2  | NS  | MQ        | 147,53 | 61,312               |        |        |       |
| 270               | 9,6                               | 10,0 | 9,3  | 9,8  | S   | F         | 18,765               |        |        | 270   | 94,9              | 89,6                               | 84,1  | 74,7  | NS  | F         | 2,4062 |                      |        |        |       |
| 360               | 11,8                              | 11,8 | 11,4 | 10,8 | NS  | valor-P   | 1E-05                |        |        | 360   | 96,8              | 87,2                               | 81,7  | 73,4  | NS  | valor-P   | 0,0955 |                      |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico | 3,0556               |        |        |       |                   |                                    |       |       |     | F crítico | 3,0556 |                      |        |        |       |
| idades            | RAA isolada - AGR - CPV           |      |      |      |     | Tukey     | Fonte                | Entre  | Dentro | Total | idades            | RAA isolada - AGR - CPIV           |       |       |     |           | Tukey  | Fonte                | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 0,0                               | 0,0  | 0,0  | 0,0  | REF | SQ        | 12,902               | 14,606 | 27,509 | 28    | 59,8              | 62,2                               | 61,3  | 62,9  | REF | SQ        | 417,62 | 108,96               | 526,57 |        |       |
| 91                | 12,7                              | 12,5 | 12,4 | 11,8 | NS  | gl        | 3                    | 12     | 15     | 91    | 71,7              | 68,5                               | 79,7  | 73,1  | S   | gl        | 4      | 15                   | 19     |        |       |
| 180               | 10,4                              | 9,9  | 10,8 | 11,1 | NS  | MQ        | 4,3008               | 1,2172 |        | 180   | 59,4              | 65,7                               | 59,6  | 63,5  | NS  | MQ        | 104,4  | 7,2638               |        |        |       |
| 270               | 11,1                              | 11,6 | 7,0  | 10,5 | NS  | F         | 3,5334               |        |        | 270   | 62,8              | 62,1                               | 61,7  | 63,4  | NS  | F         | 14,373 |                      |        |        |       |
| 360               | 11,6                              | 11,6 | 11,9 | 11,2 | NS  | valor-P   | 0,0484               |        |        | 360   | 60,5              | 63,6                               | 60,5  | 60,8  | NS  | valor-P   | 5E-05  |                      |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico | 3,4903               |        |        |       |                   |                                    |       |       |     | F crítico | 3,0556 |                      |        |        |       |
| idades            | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |      |      |      |     | Tukey     | Fonte                | Entre  | Dentro | Total | idades            | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |       |       |     |           | Tukey  | Fonte                | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 9,6                               | 9,7  | 9,7  | 9,7  | REF | SQ        | 22,899               | 1,0311 | 23,93  | 28    | 99,2              | 98,5                               | 121,3 | 115,4 | REF | SQ        | 4536,2 | 736,48               | 5272,7 |        |       |
| 91                | 8,5                               | 9,0  | 9,0  | 8,7  | S   | gl        | 4                    | 15     | 19     | 91    | 75,5              | 82,6                               | 91,1  | 79,3  | S   | gl        | 4      | 15                   | 19     |        |       |
| 180               | 7,5                               | 6,9  | 6,7  | 6,8  | S   | MQ        | 5,7246               | 0,0687 |        | 180   | 73,3              | 73,7                               | 67,6  | 60,3  | S   | MQ        | 1134,1 | 49,099               |        |        |       |
| 270               | 7,8                               | 7,5  | 7,9  | 7,6  | S   | F         | 83,282               |        |        | 270   | 71,8              | 63,4                               | 69,1  | 61,7  | S   | F         | 23,097 |                      |        |        |       |
| 360               | 7,0                               | 6,5  | 7,1  | 7,2  | S   | valor-P   | 5E-10                |        |        | 360   | 86,6              | 87,7                               | 84,4  | 81,8  | S   | valor-P   | 3E-06  |                      |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico | 3,0556               |        |        |       |                   |                                    |       |       |     | F crítico | 3,0556 |                      |        |        |       |
| idades            | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica   |      |      |      |     | Tukey     | Fonte                | Entre  | Dentro | Total | idades            | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica   |       |       |     |           | Tukey  | Fonte                | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 9,6                               | 8,8  | 9,4  | 10,5 | REF | SQ        | 28,663               | 2,4092 | 31,072 | 28    | 65,2              | 67,0                               | 62,7  | 65,5  | REF | SQ        | 550,18 | 184,73               | 734,91 |        |       |
| 91                | 6,2                               | 6,4  | 6,1  | 6,4  | S   | gl        | 4                    | 15     | 19     | 91    | 58,3              | 61,9                               | 57,9  | 58,8  | NS  | gl        | 4      | 15                   | 19     |        |       |
| 180               | 6,9                               | 7,6  | 7,1  | 7,0  | S   | MQ        | 7,1657               | 0,1606 |        | 180   | 72,1              | 69,6                               | 70,6  | 62,8  | NS  | MQ        | 137,55 | 12,315               |        |        |       |
| 270               | 6,7                               | 6,5  | 6,3  | 6,2  | S   | F         | 44,615               |        |        | 270   | 62,6              | 62,4                               | 61,2  | 51,2  | NS  | F         | 11,169 |                      |        |        |       |
| 360               | 7,1                               | 6,4  | 7,1  | 7,1  | S   | valor-P   | 4E-08                |        |        | 360   | 76,9              | 71,0                               | 70,9  | 71,6  | NS  | valor-P   | 0,0002 |                      |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico | 3,0556               |        |        |       |                   |                                    |       |       |     | F crítico | 3,0556 |                      |        |        |       |

O QUADRO K4 apresenta os resultados referentes à expansão em barras prismáticas de argamassa, unidade de medida: (%).

QUADRO K4 – Expansão – Argamassa.

| Dados individuais |                         |       |       |     |           |        | Análise de variância |        |        |       | Dados individuais |                          |       |     |           |        |        | Análise de variância |       |        |       |
|-------------------|-------------------------|-------|-------|-----|-----------|--------|----------------------|--------|--------|-------|-------------------|--------------------------|-------|-----|-----------|--------|--------|----------------------|-------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPV         |       |       |     |           | Tukey  | Fonte                | Entre  | Dentro | Total | idades            | REF - AGN - CPIV         |       |     |           |        | Tukey  | Fonte                | Entre | Dentro | Total |
| 28                | 0,003                   | 0,004 | 0,005 | REF | SQ        | 0,0003 | 4E-06                | 0,0003 |        | 28    | 0,010             | 0,012                    | 0,011 | REF | SQ        | 4E-05  | 7E-05  | 0,0001               |       |        |       |
| 91                | 0,004                   | 0,005 | 0,004 | NS  | gl        | 4      | 10                   | 14     |        | 91    | 0,011             | 0,012                    | 0,012 | NS  | gl        | 4      | 10     | 14                   |       |        |       |
| 180               | 0,003                   | 0,004 | 0,004 | NS  | MQ        | 8E-05  | 4E-07                |        |        | 180   | 0,012             | 0,015                    | 0,016 | NS  | MQ        | 1E-05  | 7E-06  |                      |       |        |       |
| 270               | 0,004                   | 0,004 | 0,004 | NS  | F         | 209,57 |                      |        |        | 270   | 0,009             | 0,012                    | 0,019 | NS  | F         | 1,3612 |        |                      |       |        |       |
| 360               | 0,015                   | 0,016 | 0,016 | S   | valor-P   | 1E-09  |                      |        |        | 360   | 0,012             | 0,016                    | 0,018 | NS  | valor-P   | 0,3143 |        |                      |       |        |       |
|                   |                         |       |       |     | F crítico | 3,478  |                      |        |        |       |                   |                          |       |     | F crítico | 3,478  |        |                      |       |        |       |
| idades            | RAA isolada - AGR - CPV |       |       |     |           | Tukey  | Fonte                | Entre  | Dentro | Total | idades            | RAA isolada - AGR - CPIV |       |     |           |        | Tukey  | Fonte                | Entre | Dentro | Total |
| 28                | 0,008                   | 0,010 | 0,400 | REF | SQ        | 0,0408 | 0,1019               | 0,1427 |        | 28    | 0,007             | 0,012                    | 0,013 | REF | SQ        | 1E-05  | 0,0002 | 0,0002               |       |        |       |
| 91                | 0,008                   | 0,006 | 0,010 | NS  | gl        | 4      | 10                   | 14     |        | 91    | 0,006             | 0,012                    | 0,015 | NS  | gl        | 4      | 10     | 14                   |       |        |       |
| 180               | 0,008                   | 0,006 | 0,007 | NS  | MQ        | 0,0102 | 0,0102               |        |        | 180   | 0,007             | 0,014                    | 0,018 | NS  | MQ        | 3E-06  | 2E-05  |                      |       |        |       |
| 270               | 0,006                   | 0,005 | 0,006 | NS  | F         | 1,001  |                      |        |        | 270   | 0,006             | 0,012                    | 0,015 | NS  | F         | 0,1498 |        |                      |       |        |       |
| 360               | 0,014                   | 0,014 | 0,016 | NS  | valor-P   | 0,4511 |                      |        |        | 360   | 0,006             | 0,016                    | 0,017 | NS  | valor-P   | 0,9588 |        |                      |       |        |       |
|                   |                         |       |       |     | F crítico | 3,478  |                      |        |        |       |                   |                          |       |     | F crítico | 3,478  |        |                      |       |        |       |

| idades | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |       |       | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        |                                   |       |       |       |           |        |        |        |
| 28     | 0,002                             | 0,001 | 0,000 | REF   | SQ        | 0,0023 | 0,0006 | 0,0028 |
| 91     | 0,012                             | 0,010 | 0,002 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,026                             | 0,020 | 0,009 | NS    | MQ        | 0,0006 | 6E-05  |        |
| 270    | 0,029                             | 0,024 | 0,013 | S     | F         | 9,657  |        |        |
| 360    | 0,046                             | 0,041 | 0,024 | S     | valor-P   | 0,0018 |        |        |
|        |                                   |       |       |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |       |       | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        |                                    |       |       |       |           |        |        |        |
| 28     | 0,000                              | 0,001 | 0,002 | REF   | SQ        | 0,0004 | 3E-06  | 0,0004 |
| 91     | 0,003                              | 0,002 | 0,003 | S     | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,001                              | 0,001 | 0,000 | NS    | MQ        | 0,0001 | 3E-07  |        |
| 270    | 0,002                              | 0,002 | 0,002 | NS    | F         | 348,87 |        |        |
| 360    | 0,015                              | 0,016 | 0,015 | S     | valor-P   | 1E-10  |        |        |
|        |                                    |       |       |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica |       |       | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|---------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        |                                 |       |       |       |           |        |        |        |
| 28     | 0,008                           | 0,007 | 0,008 | REF   | SQ        | 0,2174 | 0,0009 | 0,2184 |
| 91     | 0,038                           | 0,046 | 0,040 | S     | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,182                           | 0,206 | 0,196 | S     | MQ        | 0,0544 | 9E-05  |        |
| 270    | 0,264                           | 0,284 | 0,285 | S     | F         | 573,96 |        |        |
| 360    | 0,287                           | 0,309 | 0,311 | S     | valor-P   | 9E-12  |        |        |
|        |                                 |       |       |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica |       |       | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|----------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        |                                  |       |       |       |           |        |        |        |
| 28     | 0,000                            | 0,000 | 0,000 | REF   | SQ        | 0,0003 | 9E-07  | 0,0003 |
| 91     | 0,000                            | 0,001 | 0,000 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,001                            | 0,001 | 0,001 | NS    | MQ        | 8E-05  | 9E-08  |        |
| 270    | 0,001                            | 0,001 | 0,001 | NS    | F         | 916,44 |        |        |
| 360    | 0,012                            | 0,012 | 0,012 | S     | valor-P   | 9E-13  |        |        |
|        |                                  |       |       |       | F crítico | 3,478  |        |        |

O QUADRO K5 apresenta os resultados referentes à expansão em prismas de concreto, unidade de medida: (%).

QUADRO K5 – Expansão – Concreto.

| Dados individuais |                 |        |        |       | Análise de variância |        |        |        | Dados individuais |                  |       |       |       | Análise de variância |        |        |       |
|-------------------|-----------------|--------|--------|-------|----------------------|--------|--------|--------|-------------------|------------------|-------|-------|-------|----------------------|--------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPV |        |        | Tukey | Fonte                | Entre  | Dentro | Total  | idades            | REF - AGN - CPIV |       |       | Tukey | Fonte                | Entre  | Dentro | Total |
|                   |                 |        |        |       |                      |        |        |        |                   |                  |       |       |       |                      |        |        |       |
| 28                | -0,003          | -0,002 | -0,004 | REF   | SQ                   | 0,0018 | 4E-05  | 0,0018 | 28                | 0,002            | 0,003 | 0,002 | REF   | SQ                   | 1E-05  | 4E-05  | 5E-05 |
| 91                | 0,002           | 0,005  | 0,002  | S     | gl                   | 4      | 10     | 14     | 91                | 0,002            | 0,001 | 0,000 | NS    | gl                   | 4      | 10     | 14    |
| 180               | 0,002           | 0,002  | 0,000  | NS    | MQ                   | 0,0004 | 4E-06  |        | 180               | 0,002            | 0,001 | 0,003 | NS    | MQ                   | 3E-06  | 4E-06  |       |
| 270               | 0,026           | 0,028  | 0,022  | S     | F                    | 104,71 |        |        | 270               | 0,005            | 0,002 | 0,000 | NS    | F                    | 0,7911 |        |       |
| 360               | 0,018           | 0,022  | 0,017  | S     | valor-P              | 4E-08  |        |        | 360               | 0,015            | 0,001 | 0,003 | NS    | valor-P              | 0,5569 |        |       |
|                   |                 |        |        |       | F crítico            | 3,478  |        |        |                   |                  |       |       |       | F crítico            | 3,478  |        |       |

| idades | RAA isolada - AGR - CPV |       |       | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA isolada - AGR - CPIV |       |        | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------------------------|-------|--------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        |                         |       |       |       |           |        |        |        |        |                          |       |        |       |           |        |        |        |
| 28     | 0,007                   | 0,010 | 0,010 | REF   | SQ        | 0,0042 | 3E-05  | 0,0042 | 28     | 0,001                    | 0,003 | 0,000  | REF   | SQ        | 0,0005 | 0,0003 | 0,0008 |
| 91     | 0,030                   | 0,032 | 0,029 | S     | gl        | 4      | 10     | 14     | 91     | 0,003                    | 0,002 | -0,005 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,046                   | 0,045 | 0,043 | S     | MQ        | 0,0011 | 3E-06  |        | 180    | 0,009                    | 0,005 | 0,000  | NS    | MQ        | 0,0001 | 3E-05  |        |
| 270    | 0,040                   | 0,040 | 0,046 | S     | F         | 303,91 |        |        | 270    | 0,012                    | 0,011 | 0,001  | NS    | F         | 3,5731 |        |        |
| 360    | 0,060                   | 0,058 | 0,060 | S     | valor-P   | 2E-10  |        |        | 360    | 0,026                    | 0,010 | 0,011  | NS    | valor-P   | 0,0466 |        |        |
|        |                         |       |       |       | F crítico | 3,478  |        |        |        |                          |       |        |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |        |        | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |       |       | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-----------------------------------|--------|--------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        |                                   |        |        |       |           |        |        |        |        |                                    |       |       |       |           |        |        |        |
| 28     | -0,002                            | 0,004  | -0,002 | REF   | SQ        | 0,3433 | 0,0006 | 0,3439 | 28     | -0,004                             | 0,002 | 0,004 | REF   | SQ        | 0,0006 | 0,0001 | 0,0007 |
| 91     | -0,006                            | -0,001 | -0,003 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     | 91     | -0,001                             | 0,000 | 0,002 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,036                             | 0,040  | 0,033  | S     | MQ        | 0,0858 | 6E-05  |        | 180    | 0,001                              | 0,002 | 0,002 | NS    | MQ        | 0,0001 | 1E-05  |        |
| 270    | 0,257                             | 0,256  | 0,231  | S     | F         | 1415,1 |        |        | 270    | 0,006                              | 0,013 | 0,015 | S     | F         | 13,189 |        |        |
| 360    | 0,378                             | 0,364  | 0,364  | S     | valor-P   | 1E-13  |        |        | 360    | 0,011                              | 0,015 | 0,019 | S     | valor-P   | 0,0005 |        |        |
|        |                                   |        |        |       | F crítico | 3,478  |        |        |        |                                    |       |       |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica |       |       | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica |       |        | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|---------------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|-------|--------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        | 28                              | 91    | 180   |       |           |        |        |        |        | 270                              | 360   | 28     |       |           |        |        |        |
| 28     | 0,000                           | 0,002 | 0,016 | REF   | SQ        | 0,4244 | 0,0026 | 0,4269 | 28     | 0,005                            | 0,002 | 0,001  | REF   | SQ        | 0,0022 | 0,0005 | 0,0026 |
| 91     | 0,033                           | 0,032 | 0,041 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     | 91     | -0,001                           | 0,007 | -0,004 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,175                           | 0,233 | 0,194 | S     | MQ        | 0,1061 | 0,0003 |        | 180    | 0,008                            | 0,021 | 0,007  | NS    | MQ        | 0,0005 | 5E-05  |        |
| 270    | 0,344                           | 0,370 | 0,365 | S     | F         | 409,48 |        |        | 270    | 0,021                            | 0,034 | 0,017  | S     | F         | 11,57  |        |        |
| 360    | 0,415                           | 0,430 | 0,435 | S     | valor-P   | 5E-11  |        |        | 360    | 0,028                            | 0,041 | 0,026  | S     | valor-P   | 0,0009 |        |        |
|        |                                 |       |       |       | F crítico | 3,478  |        |        |        |                                  |       |        |       | F crítico | 3,478  |        |        |

O QUADRO K6 apresenta os resultados referentes à resistência à compressão em corpos de prova de argamassa, unidade de medida: (MPa).

QUADRO K6 – Compressão – Argamassa.

| Dados individuais |                 |      |      |      | Análise de variância |           |        |        | Dados individuais |        |                  |      |      | Análise de variância |       |           |        |        |        |
|-------------------|-----------------|------|------|------|----------------------|-----------|--------|--------|-------------------|--------|------------------|------|------|----------------------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| idades            | REF - AGN - CPV |      |      |      | Tukey                | Fonte     | Entre  | Dentro | Total             | idades | REF - AGN - CPIV |      |      |                      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|                   | 28              | 91   | 180  | 270  |                      |           |        |        |                   |        | 360              | 28   | 91   | 180                  |       |           |        |        |        |
| 28                | 48,7            | 49,4 | 49,0 | 50,6 | REF                  | SQ        | 186,15 | 137,95 | 324,1             | 28     | 47,4             | 47,4 | 53,3 | 48,3                 | REF   | SQ        | 462,32 | 161,87 | 624,19 |
| 91                | 48,3            | 52,4 | 49,1 | 50,8 | NS                   | gl        | 4      | 15     | 19                | 91     | 52,4             | 54,5 | 54,5 | 56,6                 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19     |
| 180               | 52,4            | 46,0 | 51,7 | 50,0 | NS                   | MQ        | 46,537 | 9,1967 |                   | 180    | 68,4             | 64,7 | 58,9 | 62,0                 | S     | MQ        | 115,58 | 10,791 |        |
| 270               | 58,0            | 51,8 | 58,0 | 59,8 | S                    | F         | 5,0601 |        |                   | 270    | 59,6             | 55,1 | 56,2 | 57,0                 | S     | F         | 10,711 |        |        |
| 360               | 54,0            | 42,7 | 47,5 | 48,8 | NS                   | valor-P   | 0,0088 |        |                   | 360    | 64,6             | 58,7 | 53,1 | 60,8                 | S     | valor-P   | 0,0003 |        |        |
|                   |                 |      |      |      |                      | F crítico | 3,0556 |        |                   |        |                  |      |      |                      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |

| idades | RAA isolada - AGR - CPV |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA isolada - AGR - CPIV |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        | 28                      | 91   | 180  | 270  |       |           |        |        |        |        | 360                      | 28   | 91   | 180  |       |           |        |        |        |
| 28     | 58,3                    | 50,1 | 53,0 | 50,6 | REF   | SQ        | 339,39 | 215,95 | 555,35 | 28     | 54,1                     | 54,6 | 44,6 | 52,1 | REF   | SQ        | 547,2  | 821,15 | 1368,3 |
| 91     | 48,9                    | 54,5 | 51,4 | 50,7 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19     | 91     | 56,4                     | 41,5 | 64,8 | 46,3 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19     |
| 180    | 62,4                    | 55,4 | 57,9 | 60,3 | NS    | MQ        | 84,848 | 14,397 |        | 180    | 62,8                     | 63,6 | 60,4 | 63,7 | NS    | MQ        | 136,8  | 54,743 |        |
| 270    | 68,6                    | 58,7 | 60,1 | 61,5 | S     | F         | 5,8936 |        |        | 270    | 65,4                     | 49,2 | 59,3 | 40,0 | NS    | F         | 2,4989 |        |        |
| 360    | 60,0                    | 65,1 | 59,4 | 53,2 | NS    | valor-P   | 0,0047 |        |        | 360    | 65,4                     | 67,7 | 60,9 | 59,0 | NS    | valor-P   | 0,0868 |        |        |
|        |                         |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |        |                          |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |

| idades | DEF isolada - AGR - CPV - Térmica |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total | idades | DEF isolada - AGR - CPIV - Térmica |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-----------------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|-------|--------|------------------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        | 28                                | 91   | 180  | 270  |       |           |        |        |       |        | 360                                | 28   | 91   | 180  |       |           |        |        |        |
| 28     | 39,8                              | 45,1 | 43,0 | 35,9 | REF   | SQ        | 66,214 | 189,09 | 255,3 | 28     | 40,4                               | 43,2 | 43,2 | 43,2 | REF   | SQ        | 141,89 | 134,76 | 276,66 |
| 91     | 45,8                              | 48,5 | 46,2 | 40,9 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19    | 91     | 36,8                               | 41,5 | 40,7 | 43,7 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19     |
| 180    | 47,8                              | 40,4 | 47,2 | 41,4 | NS    | MQ        | 16,554 | 12,606 |       | 180    | 45,0                               | 46,4 | 44,4 | 44,7 | NS    | MQ        | 35,473 | 8,9843 |        |
| 270    | 47,0                              | 49,2 | 47,0 | 41,1 | NS    | F         | 1,3131 |        |       | 270    | 47,9                               | 51,5 | 52,5 | 41,9 | NS    | F         | 3,9483 |        |        |
| 360    | 49,8                              | 43,0 | 43,3 | 45,4 | NS    | valor-P   | 0,3099 |        |       | 360    | 46,6                               | 48,8 | 40,9 | 45,4 | NS    | valor-P   | 0,022  |        |        |
|        |                                   |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |       |        |                                    |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total |
|--------|---------------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|-------|
|        | 28                              | 91   | 180  | 270  |       |           |        |        |        |        | 360                              | 28   | 91   | 180  |       |           |        |        |       |
| 28     | 45,2                            | 39,8 | 50,2 | 47,3 | REF   | SQ        | 483,25 | 169,15 | 652,39 | 28     | 43,0                             | 40,2 | 48,0 | 48,0 | REF   | SQ        | 291,5  | 323,4  | 614,9 |
| 91     | 40,8                            | 42,2 | 42,2 | 43,7 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19     | 91     | 37,9                             | 42,3 | 52,4 | 36,7 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19    |
| 180    | 51,6                            | 48,1 | 56,0 | 51,9 | NS    | MQ        | 120,81 | 11,276 |        | 180    | 51,1                             | 44,0 | 47,1 | 47,6 | NS    | MQ        | 72,876 | 21,56  |       |
| 270    | 57,9                            | 59,3 | 48,3 | 55,3 | S     | F         | 10,714 |        |        | 270    | 57,0                             | 57,4 | 47,2 | 51,3 | NS    | F         | 3,3802 |        |       |
| 360    | 44,1                            | 42,5 | 44,8 | 45,1 | NS    | valor-P   | 0,0003 |        |        | 360    | 53,6                             | 46,5 | 48,5 | 51,4 | NS    | valor-P   | 0,0368 |        |       |
|        |                                 |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |        |                                  |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |       |

O QUADRO K7 apresenta os resultados referentes à resistência à compressão em corpos de prova de concreto, unidade de medida: (MPa).

QUADRO K7 – Compressão – Concreto.

| Dados individuais |                                   |      |      |      |     | Análise de variância |        |        |        | Dados individuais |        |                                    |      |      |     | Análise de variância |        |        |        |        |       |
|-------------------|-----------------------------------|------|------|------|-----|----------------------|--------|--------|--------|-------------------|--------|------------------------------------|------|------|-----|----------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPV                   |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | REF - AGN - CPIV                   |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 48,7                              | 49,6 | 49,3 | 41,2 | REF | SQ                   | 93,905 | 107,53 | Total  | 28                | 50,8   | 51,0                               | 52,4 | 50,6 | REF | SQ                   | 41,734 | 116,13 | 157,87 |        |       |
| 91                | 46,7                              | 47,1 | 50,3 | 42,8 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 201,44 | 91                | 54,4   | 56,3                               | 51,6 | 55,5 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 47,0                              | 49,3 | 48,2 | 48,2 | NS  | MQ                   | 23,476 | 7,169  | 19     | 180               | 52,1   | 55,4                               | 50,9 | 58,1 | NS  | F                    | 1,3476 |        |        |        |       |
| 270               | 50,1                              | 49,1 | 45,7 | 51,4 | NS  | F                    | 3,2747 |        |        | 270               | 50,6   | 56,9                               | 59,5 | 52,8 | NS  | valor-P              | 0,2983 |        |        |        |       |
| 360               | 53,9                              | 52,6 | 54,5 | 50,3 | NS  | valor-P              | 0,0406 |        |        | 360               | 59,0   | 53,0                               | 53,7 | 55,1 | NS  | F crítico            | 3,0556 |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     |                      |        |        |        |        |       |
| idades            | RAA isolada - AGR - CPV           |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | RAA isolada - AGR - CPIV           |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 42,2                              | 45,9 | 46,2 | 45,3 | REF | SQ                   | 164,92 | 153,7  | 318,62 | 28                | 47,1   | 42,5                               | 46,9 | 44,1 | REF | SQ                   | 106,44 | 111,46 | 217,9  |        |       |
| 91                | 47,7                              | 48,1 | 52,5 | 51,2 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     | 91                | 45,2   | 49,6                               | 46,9 | 46,4 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 37,0                              | 50,0 | 48,0 | 45,0 | NS  | MQ                   | 41,23  | 10,247 |        | 180               | 46,4   | 50,9                               | 46,8 | 54,2 | NS  | MQ                   | 26,611 | 7,4308 |        |        |       |
| 270               | 48,4                              | 53,1 | 51,6 | 53,2 | NS  | F                    | 4,0237 |        |        | 270               | 47,4   | 48,6                               | 54,0 | 53,9 | NS  | F                    | 3,5812 |        |        |        |       |
| 360               | 51,5                              | 53,0 | 50,0 | 48,1 | NS  | valor-P              | 0,0206 |        |        | 360               | 50,3   | 48,9                               | 52,6 | 52,2 | NS  | valor-P              | 0,0306 |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |        |       |
| idades            | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 35,0                              | 41,2 | 37,8 | 37,8 | REF | SQ                   | 110,85 | 51,743 | 162,59 | 28                | 47,0   | 39,7                               | 47,5 | 45,5 | REF | SQ                   | 153,82 | 139,9  | 293,72 |        |       |
| 91                | 38,6                              | 41,4 | 43,0 | 42,5 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     | 91                | 43,2   | 42,8                               | 46,6 | 41,6 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 41,2                              | 41,8 | 39,3 | 39,2 | NS  | MQ                   | 27,712 | 3,4495 |        | 180               | 37,8   | 39,4                               | 40,7 | 45,0 | NS  | MQ                   | 38,455 | 9,3265 |        |        |       |
| 270               | 38,6                              | 38,2 | 40,9 | 36,1 | NS  | F                    | 8,0335 |        |        | 270               | 48,4   | 40,2                               | 44,2 | 44,0 | NS  | F                    | 4,1232 |        |        |        |       |
| 360               | 34,0                              | 36,2 | 33,9 | 34,1 | NS  | valor-P              | 0,0011 |        |        | 360               | 51,6   | 49,8                               | 50,7 | 45,1 | NS  | valor-P              | 0,0189 |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |        |       |
| idades            | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica   |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica   |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 39,2                              | 41,5 | 41,6 | 38,6 | REF | SQ                   | 253,44 | 30,5   | 283,94 | 28                | 40,5   | 39,7                               | 38,6 | 40,1 | REF | SQ                   | 73,257 | 44,241 | 117,5  |        |       |
| 91                | 41,6                              | 41,0 | 43,9 | 40,7 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     | 91                | 42,0   | 43,5                               | 41,0 | 41,5 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 38,1                              | 38,6 | 40,8 | 38,4 | NS  | MQ                   | 63,36  | 2,0333 |        | 180               | 42,0   | 42,1                               | 39,2 | 45,2 | NS  | MQ                   | 18,314 | 2,9494 |        |        |       |
| 270               | 36,0                              | 34,2 | 33,8 | 32,2 | S   | F                    | 31,161 |        |        | 270               | 40,1   | 42,5                               | 44,9 | 42,5 | NS  | F                    | 6,2095 |        |        |        |       |
| 360               | 34,1                              | 31,4 | 31,7 | 33,5 | S   | valor-P              | 4E-07  |        |        | 360               | 45,4   | 46,0                               | 47,8 | 43,6 | S   | valor-P              | 0,0037 |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |        |       |

O QUADRO K8 apresenta os resultados referentes ao módulo de elasticidade em corpos de prova de argamassa, unidade de medida: (GPa).

QUADRO K8 – Módulo estático – Argamassa.

| Dados individuais |                 |      |      |     |  | Análise de variância |        |        |        | Dados individuais |        |                  |      |     |           | Análise de variância |        |        |       |        |       |
|-------------------|-----------------|------|------|-----|--|----------------------|--------|--------|--------|-------------------|--------|------------------|------|-----|-----------|----------------------|--------|--------|-------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPV |      |      |     |  | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | REF - AGN - CPIV |      |     |           |                      | Tukey  | Fonte  | Entre | Dentro | Total |
| 28                | 30,7            | 30,6 | 30,8 | REF |  | SQ                   | 12,552 | 4,6585 | 17,21  | 28                | 32,1   | 31,9             | 32,3 | REF | SQ        | 15,195               | 9,8516 | 25,047 |       |        |       |
| 91                | 33,5            | 31,9 | 33,6 | S   |  | gl                   | 4      | 10     | 14     | 91                | 33,3   | 32,8             | 33,2 | NS  | gl        | 4                    | 10     | 14     |       |        |       |
| 180               | 30,7            | 31,3 | 30,9 | NS  |  | MQ                   | 3,138  | 0,4658 |        | 180               | 33,6   | 35,6             | 32,6 | NS  | MQ        | 3,7987               | 0,9852 |        |       |        |       |
| 270               | 32,7            | 32,6 | 32,8 | S   |  | F                    | 6,7361 |        |        | 270               | 35,8   | 35,3             | 32,8 | NS  | F         | 3,856                |        |        |       |        |       |
| 360               | 31,0            | 33,0 | 30,9 | NS  |  | valor-P              | 0,0068 |        |        | 360               | 34,7   | 35,0             | 34,7 | S   | valor-P   | 0,038                |        |        |       |        |       |
|                   |                 |      |      |     |  | F crítico            | 3,478  |        |        |                   |        |                  |      |     | F crítico | 3,478                |        |        |       |        |       |

| idades | RAA isolada - AGR - CPV |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        | 28                      | 91   | 180  |       |           |        |        |        |
| 28     | 31,8                    | 29,6 | 30,2 | REF   | SQ        | 36,688 | 10,435 | 47,123 |
| 91     | 28,9                    | 28,2 | 30,0 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 33,7                    | 33,2 | 33,3 | S     | MQ        | 9,1721 | 1,0435 |        |
| 270    | 31,2                    | 31,4 | 32,8 | NS    | F         | 8,7901 |        |        |
| 360    | 33,2                    | 31,1 | 34,0 | NS    | valor-P   | 0,0026 |        |        |
|        |                         |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | RAA isolada - AGR - CPIV |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total |
|--------|--------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|-------|
|        | 28                       | 91   | 180  |       |           |        |        |       |
| 28     | 31,5                     | 31,8 | 31,2 | REF   | SQ        | 55,718 | 6,2622 | 61,98 |
| 91     | 32,1                     | 33,8 | 33,2 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14    |
| 180    | 30,0                     | 28,2 | 30,9 | NS    | MQ        | 13,929 | 0,6262 |       |
| 270    | 33,4                     | 33,9 | 34,6 | S     | F         | 22,244 |        |       |
| 360    | 35,6                     | 35,1 | 35,0 | S     | valor-P   | 6E-05  |        |       |
|        |                          |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |       |

| idades | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-----------------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        | 28                                | 91   | 180  |       |           |        |        |        |
| 28     | 26,0                              | 26,0 | 24,6 | REF   | SQ        | 48,103 | 17,189 | 65,292 |
| 91     | 27,5                              | 26,0 | 27,7 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 25,2                              | 25,9 | 23,5 | NS    | MQ        | 12,026 | 1,7189 |        |
| 270    | 22,2                              | 22,4 | 21,4 | S     | F         | 6,9961 |        |        |
| 360    | 21,0                              | 22,6 | 25,5 | NS    | valor-P   | 0,0059 |        |        |
|        |                                   |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|------------------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        | 28                                 | 91   | 180  |       |           |        |        |        |
| 28     | 29,5                               | 29,3 | 29,4 | REF   | SQ        | 19,426 | 5,5497 | 24,975 |
| 91     | 31,4                               | 30,9 | 30,9 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 31,9                               | 30,9 | 32,3 | S     | MQ        | 4,8564 | 0,555  |        |
| 270    | 32,7                               | 33,8 | 30,9 | S     | F         | 8,7507 |        |        |
| 360    | 32,5                               | 32,2 | 32,6 | S     | valor-P   | 0,0026 |        |        |
|        |                                    |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|---------------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        | 28                              | 91   | 180  |       |           |        |        |        |
| 28     | 26,1                            | 26,5 | 26,3 | REF   | SQ        | 16,595 | 12,57  | 29,165 |
| 91     | 23,9                            | 22,4 | 25,5 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 26,9                            | 28,1 | 25,8 | NS    | MQ        | 4,1489 | 1,257  |        |
| 270    | 27,6                            | 25,4 | 26,4 | NS    | F         | 3,3007 |        |        |
| 360    | 24,3                            | 26,4 | 26,2 | NS    | valor-P   | 0,0572 |        |        |
|        |                                 |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|----------------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
|        | 28                               | 91   | 180  |       |           |        |        |        |
| 28     | 30,2                             | 30,5 | 29,9 | REF   | SQ        | 24,337 | 1,546  | 25,883 |
| 91     | 31,2                             | 31,7 | 32,4 | S     | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 32,2                             | 31,9 | 32,8 | S     | MQ        | 6,0843 | 0,1546 |        |
| 270    | 33,4                             | 33,4 | 33,4 | S     | F         | 39,357 |        |        |
| 360    | 34,1                             | 33,8 | 33,4 | S     | valor-P   | 4E-06  |        |        |
|        |                                  |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |        |

O QUADRO K9 apresenta os resultados referentes ao módulo de elasticidade em corpos de prova de concreto, unidade de medida: (GPa).

QUADRO K9 – Módulo estático – Concreto.

| Dados individuais |                 |      |      |       | Análise de variância |        |        |        | Dados individuais |                  |      |      |       | Análise de variância |        |        |        |
|-------------------|-----------------|------|------|-------|----------------------|--------|--------|--------|-------------------|------------------|------|------|-------|----------------------|--------|--------|--------|
| idades            | REF - AGN - CPV |      |      | Tukey | Fonte                | Entre  | Dentro | Total  | idades            | REF - AGN - CPIV |      |      | Tukey | Fonte                | Entre  | Dentro | Total  |
|                   | 28              | 91   | 180  |       |                      |        |        |        |                   | 28               | 91   | 180  |       |                      |        |        |        |
| 28                | 27,5            | 28,3 | 28,3 | REF   | SQ                   | 10,371 | 6,1572 | 16,528 | 28                | 30,1             | 30,7 | 29,9 | REF   | SQ                   | 23,495 | 11,776 | 35,271 |
| 91                | 29,1            | 28,9 | 28,6 | NS    | gl                   | 4      | 10     | 14     | 91                | 31,3             | 31,1 | 29,9 | NS    | gl                   | 4      | 10     | 14     |
| 180               | 28,7            | 30,5 | 31,5 | S     | MQ                   | 2,5927 | 0,6157 |        | 180               | 31,9             | 31,3 | 32,4 | NS    | MQ                   | 5,8738 | 1,1776 |        |
| 270               | 28,7            | 28,5 | 29,7 | NS    | F                    | 4,2108 |        |        | 270               | 34,0             | 34,6 | 32,1 | S     | F                    | 4,9881 |        |        |
| 360               | 28,6            | 27,4 | 27,7 | NS    | valor-P              | 0,0297 |        |        | 360               | 32,3             | 31,5 | 34,9 | NS    | valor-P              | 0,018  |        |        |
|                   |                 |      |      |       | F crítico            | 3,478  |        |        |                   |                  |      |      |       | F crítico            | 3,478  |        |        |

| idades | RAA isolada - AGR - CPV |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total | idades | RAA isolada - AGR - CPIV |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total |
|--------|-------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|-------|--------|--------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|-------|
|        | 28                      | 91   | 180  |       |           |        |        |       |        | 28                       | 91   | 180  |       |           |        |        |       |
| 28     | 29,6                    | 28,7 | 29,8 | REF   | SQ        | 52,115 | 3,6947 | 55,81 | 28     | 29,2                     | 32,3 | 32,0 | REF   | SQ        | 36,957 | 21,772 | 58,73 |
| 91     | 28,3                    | 28,5 | 28,1 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14    | 91     | 34,6                     | 33,2 | 32,2 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14    |
| 180    | 26,3                    | 24,9 | 25,6 | S     | MQ        | 13,029 | 0,3695 |       | 180    | 34,4                     | 33,6 | 33,8 | NS    | MQ        | 9,2394 | 2,1772 |       |
| 270    | 23,6                    | 24,1 | 24,7 | S     | F         | 35,264 |        |       | 270    | 38,1                     | 33,4 | 34,8 | S     | F         | 4,2436 |        |       |
| 360    | 27,2                    | 25,6 | 26,7 | S     | valor-P   | 7E-06  |        |       | 360    | 35,6                     | 35,8 | 34,6 | S     | valor-P   | 0,029  |        |       |
|        |                         |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |       |        |                          |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |       |

| idades | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |      |      |  | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-----------------------------------|------|------|--|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 25,4                              | 24,6 | 0,0  |  | REF   | SQ        | 116,35 | 420,1  | 536,45 |
| 91     | 24,5                              | 24,3 | 25,2 |  | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 22,6                              | 22,9 | 22,5 |  | NS    | MQ        | 29,088 | 42,01  |        |
| 270    | 19,5                              | 20,4 | 19,8 |  | NS    | F         | 0,6924 |        |        |
| 360    | 19,0                              | 20,0 | 18,5 |  | NS    | valor-P   | 0,6139 |        |        |
|        |                                   |      |      |  |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |      |      |  | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|------------------------------------|------|------|--|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 28,3                               | 29,8 | 29,3 |  | REF   | SQ        | 11,441 | 7,6664 | 19,108 |
| 91     | 29,0                               | 28,7 | 29,7 |  | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 30,4                               | 32,3 | 31,6 |  | NS    | MQ        | 2,8603 | 0,7666 |        |
| 270    | 31,9                               | 29,3 | 29,8 |  | NS    | F         | 3,731  |        |        |
| 360    | 30,0                               | 30,6 | 30,4 |  | NS    | valor-P   | 0,0415 |        |        |
|        |                                    |      |      |  |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica |      |      |  | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|---------------------------------|------|------|--|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 25,3                            | 25,8 | 25,8 |  | REF   | SQ        | 193,21 | 3,3096 | 196,52 |
| 91     | 22,9                            | 23,8 | 24,5 |  | S     | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 19,4                            | 18,7 | 19,4 |  | S     | MQ        | 48,301 | 0,331  |        |
| 270    | 16,7                            | 16,7 | 16,4 |  | S     | F         | 145,94 |        |        |
| 360    | 17,3                            | 16,3 | 18,1 |  | S     | valor-P   | 8E-09  |        |        |
|        |                                 |      |      |  |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica |      |      |  | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|----------------------------------|------|------|--|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 29,5                             | 28,5 | 31,9 |  | REF   | SQ        | 48,592 | 16,727 | 65,319 |
| 91     | 30,8                             | 31,0 | 31,0 |  | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 33,0                             | 30,9 | 34,7 |  | NS    | MQ        | 12,148 | 1,6727 |        |
| 270    | 35,2                             | 34,3 | 36,2 |  | S     | F         | 7,2625 |        |        |
| 360    | 31,9                             | 33,7 | 32,7 |  | NS    | valor-P   | 0,0052 |        |        |
|        |                                  |      |      |  |       | F crítico | 3,478  |        |        |

O QUADRO K10 apresenta os resultados referentes ao módulo de elasticidade dinâmico em corpos de prova de argamassa, unidade de medida: (GPa).

QUADRO K10 – Módulo dinâmico – Argamassa.

| Dados individuais |                 |      |      |      | Análise de variância |           |        |        | Dados individuais |        |                  |      |      | Análise de variância |       |           |        |        |        |
|-------------------|-----------------|------|------|------|----------------------|-----------|--------|--------|-------------------|--------|------------------|------|------|----------------------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| idades            | REF - AGN - CPV |      |      |      | Tukey                | Fonte     | Entre  | Dentro | Total             | idades | REF - AGN - CPIV |      |      |                      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
| 28                | 41,8            | 43,1 | 42,9 | 42,0 | REF                  | SQ        | 65,955 | 6,4936 | 72,448            | 28     | 40,2             | 40,4 | 41,0 | 40,5                 | REF   | SQ        | 193,92 | 8,7733 | 202,69 |
| 91                | 45,6            | 46,2 | 45,6 | 46,2 | S                    | gl        | 4      | 15     | 19                | 91     | 43,1             | 44,3 | 45,0 | 45,3                 | S     | gl        | 4      | 15     | 19     |
| 180               | 45,7            | 45,4 | 46,6 | 44,0 | S                    | MQ        | 16,489 | 0,4329 |                   | 180    | 47,9             | 49,3 | 49,3 | 50,5                 | S     | MQ        | 48,479 | 0,5849 |        |
| 270               | 46,2            | 46,6 | 46,9 | 46,3 | S                    | F         | 38,089 |        |                   | 270    | 46,8             | 48,1 | 47,8 | 48,6                 | S     | F         | 82,886 |        |        |
| 360               | 47,2            | 48,3 | 48,6 | 48,0 | S                    | valor-P   | 1E-07  |        |                   | 360    | 47,0             | 47,3 | 48,0 | 47,0                 | S     | valor-P   | 5E-10  |        |        |
|                   |                 |      |      |      |                      | F crítico | 3,0556 |        |                   |        |                  |      |      |                      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |

| idades | RAA isolada - AGR - CPV |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA isolada - AGR - CPIV |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 45,9                    | 42,7 | 45,9 | 44,5 | REF   | SQ        | 76,495 | 20,867 | 97,362 | 28     | 40,3                     | 41,1 | 41,6 | 40,9 | REF   | SQ        | 159,77 | 7,7511 | 167,52 |
| 91     | 46,3                    | 44,7 | 44,3 | 44,9 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19     | 91     | 45,3                     | 45,3 | 44,2 | 46,4 | S     | gl        | 4      | 15     | 19     |
| 180    | 49,7                    | 50,0 | 47,0 | 49,7 | S     | MQ        | 19,124 | 1,3911 |        | 180    | 49,4                     | 49,8 | 48,6 | 48,9 | S     | MQ        | 39,942 | 0,5167 |        |
| 270    | 50,2                    | 49,2 | 48,6 | 49,8 | S     | F         | 13,747 |        |        | 270    | 45,8                     | 46,3 | 46,9 | 46,8 | S     | F         | 77,296 |        |        |
| 360    | 48,3                    | 48,3 | 45,7 | 46,6 | NS    | valor-P   | 7E-05  |        |        | 360    | 49,3                     | 47,8 | 47,5 | 47,3 | S     | valor-P   | 8E-10  |        |        |
|        |                         |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |        |                          |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |

| idades | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-----------------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|------------------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 39,8                              | 39,9 | 39,1 | 41,4 | REF   | SQ        | 14,313 | 9,2306 | 23,543 | 28     | 38,9                               | 40,0 | 38,8 | 38,3 | REF   | SQ        | 69,036 | 25,31  | 94,346 |
| 91     | 40,8                              | 42,1 | 41,8 | 42,1 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19     | 91     | 43,0                               | 38,6 | 41,0 | 40,9 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19     |
| 180    | 42,2                              | 43,0 | 42,2 | 41,5 | S     | MQ        | 3,5782 | 0,6154 |        | 180    | 42,0                               | 43,4 | 40,3 | 40,3 | NS    | MQ        | 17,259 | 1,6873 |        |
| 270    | 41,0                              | 42,4 | 41,2 | 40,5 | NS    | F         | 5,8146 |        |        | 270    | 44,9                               | 45,0 | 44,7 | 43,5 | S     | F         | 10,229 |        |        |
| 360    | 42,7                              | 41,6 | 41,8 | 43,5 | S     | valor-P   | 0,005  |        |        | 360    | 43,4                               | 40,7 | 43,4 | 43,7 | S     | valor-P   | 0,0003 |        |        |
|        |                                   |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |        |                                    |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica |      |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total |
|--------|---------------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|------|------|------|-------|-----------|--------|--------|-------|
| 28     | 41,0                            | 41,4 | 41,5 | 41,8 | REF   | SQ        | 39,541 | 9,9073 | 49,449 | 28     | 40,9                             | 40,4 | 39,7 | 40,6 | REF   | SQ        | 77,774 | 12,557 | 90,33 |
| 91     | 41,5                            | 41,4 | 41,4 | 42,1 | NS    | gl        | 4      | 15     | 19     | 91     | 44,2                             | 42,7 | 43,4 | 43,3 | S     | gl        | 4      | 15     | 19    |
| 180    | 42,2                            | 41,1 | 41,4 | 40,5 | NS    | MQ        | 9,8854 | 0,6605 |        | 180    | 44,3                             | 41,3 | 43,8 | 44,2 | S     | MQ        | 19,443 | 0,8371 |       |
| 270    | 46,6                            | 44,1 | 44,1 | 43,9 | S     | F         | 14,967 |        |        | 270    | 48,0                             | 47,2 | 45,6 | 45,6 | S     | F         | 23,227 |        |       |
| 360    | 44,6                            | 42,5 | 43,9 | 44,3 | S     | valor-P   | 4E-05  |        |        | 360    | 43,8                             | 43,8 | 44,7 | 44,2 | S     | valor-P   | 3E-06  |        |       |
|        |                                 |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |        |        |                                  |      |      |      |       | F crítico | 3,0556 |        |       |

O QUADRO K11 apresenta os resultados referentes ao módulo de elasticidade dinâmico em corpos de prova de concreto, unidade de medida: (GPa).

QUADRO K11 – Módulo dinâmico – Concreto.

| Dados individuais |                                   |      |      |      |     | Análise de variância |        |        |        | Dados individuais |        |                                    |      |      |     | Análise de variância |        |        |        |        |       |
|-------------------|-----------------------------------|------|------|------|-----|----------------------|--------|--------|--------|-------------------|--------|------------------------------------|------|------|-----|----------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPV                   |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | REF - AGN - CPIV                   |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 42,5                              | 44,3 | 44,0 | 45,2 | REF | SQ                   | 96,131 | 8,7445 | 104,88 | 28                | 45,7   | 45,6                               | 44,9 | 47,5 | REF | SQ                   | 7,2099 | 16,307 | 23,516 |        |       |
| 91                | 45,9                              | 45,3 | 45,3 | 46,3 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     | 91                | 45,3   | 42,8                               | 43,8 | 45,0 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 49,8                              | 49,0 | 48,5 | 50,6 | S   | MQ                   | 24,033 | 0,583  |        | 180               | 44,5   | 46,1                               | 45,8 | 45,0 | NS  | MQ                   | 1,8025 | 1,0871 |        |        |       |
| 270               | 48,4                              | 48,7 | 49,6 | 49,4 | S   | F                    | 41,225 |        |        | 270               | 47,2   | 46,2                               | 45,8 | 43,8 | NS  | F                    | 1,658  |        |        |        |       |
| 360               | 48,8                              | 48,6 | 49,1 | 49,6 | S   | valor-P              | 6E-08  |        |        | 360               | 46,1   | 45,0                               | 45,1 | 44,9 | NS  | valor-P              | 0,2118 |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |        |       |
| idades            | RAA isolada - AGR - CPV           |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | RAA isolada - AGR - CPIV           |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 45,7                              | 48,3 | 49,7 | 46,9 | REF | SQ                   | 32,812 | 41,5   | 74,312 | 28                | 49,5   | 47,6                               | 48,0 | 46,0 | REF | SQ                   | 22,168 | 20,278 | 42,446 |        |       |
| 91                | 46,5                              | 43,7 | 44,2 | 45,8 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     | 91                | 44,5   | 46,0                               | 47,9 | 45,4 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 46,8                              | 47,0 | 46,2 | 46,5 | NS  | MQ                   | 8,203  | 2,7667 |        | 180               | 47,4   | 47,2                               | 48,6 | 47,5 | NS  | MQ                   | 5,5419 | 1,3519 |        |        |       |
| 270               | 51,6                              | 48,9 | 44,7 | 49,8 | NS  | F                    | 2,9649 |        |        | 270               | 46,1   | 48,4                               | 45,4 | 47,1 | NS  | F                    | 4,0994 |        |        |        |       |
| 360               | 47,9                              | 48,9 | 48,1 | 47,2 | NS  | valor-P              | 0,0546 |        |        | 360               | 46,0   | 44,5                               | 45,3 | 44,2 | S   | valor-P              | 0,0193 |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |        |       |
| idades            | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 43,0                              | 43,8 | 46,1 | 44,0 | REF | SQ                   | 12,391 | 13,975 | 26,366 | 28                | 41,0   | 41,0                               | 41,0 | 39,9 | REF | SQ                   | 59,859 | 6,6616 | 66,521 |        |       |
| 91                | 44,5                              | 44,6 | 44,1 | 44,9 | NS  | gl                   | 4      | 15     | 19     | 91                | 37,4   | 39,1                               | 39,2 | 38,7 | S   | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 44,5                              | 43,8 | 42,7 | 43,1 | NS  | MQ                   | 3,0977 | 0,9316 |        | 180               | 41,6   | 41,6                               | 42,0 | 40,8 | NS  | MQ                   | 14,965 | 0,4441 |        |        |       |
| 270               | 44,0                              | 46,7 | 45,1 | 45,4 | NS  | F                    | 3,325  |        |        | 270               | 43,2   | 43,3                               | 42,0 | 42,2 | S   | F                    | 33,697 |        |        |        |       |
| 360               | 44,4                              | 42,3 | 42,7 | 42,8 | NS  | valor-P              | 0,0387 |        |        | 360               | 43,5   | 44,4                               | 44,1 | 42,7 | S   | valor-P              | 2E-07  |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |        |       |
| idades            | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica   |      |      |      |     | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica   |      |      |     |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 47,7                              | 45,8 | 47,5 | 46,0 | REF | SQ                   | 96,145 | 20,801 | 116,95 | 28                | 42,5   | 42,2                               | 40,4 | 42,4 | REF | SQ                   | 118,49 | 9,7143 | 128,2  |        |       |
| 91                | 46,0                              | 45,2 | 42,3 | 41,8 | S   | gl                   | 4      | 15     | 19     | 91                | 45,0   | 44,6                               | 43,9 | 43,9 | S   | gl                   | 4      | 15     | 19     |        |       |
| 180               | 41,5                              | 41,0 | 41,4 | 41,8 | S   | MQ                   | 24,036 | 1,3867 |        | 180               | 46,7   | 45,6                               | 46,6 | 45,1 | S   | MQ                   | 29,622 | 0,6476 |        |        |       |
| 270               | 42,7                              | 40,7 | 43,4 | 42,4 | S   | F                    | 17,333 |        |        | 270               | 48,2   | 48,5                               | 48,2 | 46,2 | S   | F                    | 45,74  |        |        |        |       |
| 360               | 40,0                              | 40,1 | 41,0 | 40,9 | S   | valor-P              | 2E-05  |        |        | 360               | 48,6   | 47,9                               | 48,9 | 49,1 | S   | valor-P              | 3E-08  |        |        |        |       |
|                   |                                   |      |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |                   |        |                                    |      |      |     | F crítico            | 3,0556 |        |        |        |       |

O QUADRO K12 apresenta os resultados referentes à variação de massa em barras prismáticas de argamassa, unidade de medida: (%).

QUADRO K12 – Variação de massa – Argamassa.

| Dados individuais |                 |      |      |     |  | Análise de variância |        |        |        | Dados individuais |        |                  |      |     |  | Análise de variância |        |        |        |        |       |
|-------------------|-----------------|------|------|-----|--|----------------------|--------|--------|--------|-------------------|--------|------------------|------|-----|--|----------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPV |      |      |     |  | Tukey                | Fonte  | Entre  | Dentro | Total             | idades | REF - AGN - CPIV |      |     |  |                      | Tukey  | Fonte  | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 0,57            | 0,62 | 0,62 | REF |  | SQ                   | 0,0678 | 0,0063 | 0,0742 | 28                | 0,32   | 0,38             | 0,44 | REF |  | SQ                   | 0,1115 | 0,0193 | 0,1309 |        |       |
| 91                | 0,68            | 0,69 | 0,71 | S   |  | gl                   | 4      | 10     | 14     | 91                | 0,44   | 0,47             | 0,53 | NS  |  | gl                   | 4      | 10     | 14     |        |       |
| 180               | 0,67            | 0,72 | 0,70 | S   |  | MQ                   | 0,017  | 0,0006 |        | 180               | 0,53   | 0,47             | 0,54 | S   |  | MQ                   | 0,0279 | 0,0019 |        |        |       |
| 270               | 0,68            | 0,67 | 0,69 | S   |  | F                    | 26,75  |        |        | 270               | 0,52   | 0,53             | 0,56 | S   |  | F                    | 14,411 |        |        |        |       |
| 360               | 0,79            | 0,80 | 0,85 | S   |  | valor-P              | 3E-05  |        |        | 360               | 0,60   | 0,64             | 0,70 | S   |  | valor-P              | 0,0004 |        |        |        |       |
|                   |                 |      |      |     |  | F crítico            | 3,478  |        |        |                   |        |                  |      |     |  | F crítico            | 3,478  |        |        |        |       |

|        |                                   |      |      |     |       |           |        |        |        |        |                                    |      |      |     |       |           |        |        |        |
|--------|-----------------------------------|------|------|-----|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|------------------------------------|------|------|-----|-------|-----------|--------|--------|--------|
| idades | RAA isolada - AGR - CPV           |      |      |     | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA isolada - AGR - CPIV           |      |      |     | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
| 28     | 0,42                              | 0,50 | 0,44 | REF |       | SQ        | 0,1145 | 0,0162 | 0,1307 | 28     | 0,26                               | 0,20 | 0,25 | REF |       | SQ        | 0,1521 | 0,0182 | 0,1703 |
| 91     | 0,56                              | 0,61 | 0,58 | S   |       | gl        | 4      | 10     | 14     | 91     | 0,39                               | 0,28 | 0,33 | NS  |       | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,55                              | 0,66 | 0,61 | S   |       | MQ        | 0,0286 | 0,0016 |        | 180    | 0,42                               | 0,40 | 0,44 | S   |       | MQ        | 0,038  | 0,0018 |        |
| 270    | 0,59                              | 0,66 | 0,61 | S   |       | F         | 17,707 |        |        | 270    | 0,48                               | 0,38 | 0,44 | S   |       | F         | 20,894 |        |        |
| 360    | 0,70                              | 0,77 | 0,71 | S   |       | valor-P   | 0,0002 |        |        | 360    | 0,55                               | 0,48 | 0,57 | S   |       | valor-P   | 8E-05  |        |        |
|        |                                   |      |      |     |       | F crítico | 3,478  |        |        |        |                                    |      |      |     |       | F crítico | 3,478  |        |        |
| idades | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |      |      |     | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |      |      |     | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
| 28     | 0,19                              | 0,25 | 0,27 | REF |       | SQ        | 0,7006 | 0,0145 | 0,715  | 28     | 0,32                               | 0,34 | 0,33 | REF |       | SQ        | 0,4725 | 0,0096 | 0,4821 |
| 91     | 0,42                              | 0,43 | 0,44 | S   |       | gl        | 4      | 10     | 14     | 91     | 0,43                               | 0,44 | 0,52 | S   |       | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,66                              | 0,54 | 0,61 | S   |       | MQ        | 0,1751 | 0,0014 |        | 180    | 0,55                               | 0,51 | 0,59 | S   |       | MQ        | 0,1181 | 0,001  |        |
| 270    | 0,68                              | 0,67 | 0,72 | S   |       | F         | 121,09 |        |        | 270    | 0,66                               | 0,63 | 0,67 | S   |       | F         | 123,41 |        |        |
| 360    | 0,85                              | 0,85 | 0,89 | S   |       | valor-P   | 2E-08  |        |        | 360    | 0,86                               | 0,85 | 0,86 | S   |       | valor-P   | 2E-08  |        |        |
|        |                                   |      |      |     |       | F crítico | 3,478  |        |        |        |                                    |      |      |     |       | F crítico | 3,478  |        |        |
| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica   |      |      |     | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica   |      |      |     | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
| 28     | 0,00                              | 0,00 | 0,00 | REF |       | SQ        | 1,4389 | 0,0033 | 1,4422 | 28     | 0,25                               | 0,25 | 0,31 | REF |       | SQ        | 0,2855 | 0,0112 | 0,2967 |
| 91     | 0,19                              | 0,18 | 0,13 | S   |       | gl        | 4      | 10     | 14     | 91     | 0,52                               | 0,53 | 0,58 | S   |       | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,61                              | 0,62 | 0,60 | S   |       | MQ        | 0,3597 | 0,0003 |        | 180    | 0,49                               | 0,49 | 0,54 | S   |       | MQ        | 0,0714 | 0,0011 |        |
| 270    | 0,74                              | 0,76 | 0,74 | S   |       | F         | 1089,5 |        |        | 270    | 0,57                               | 0,52 | 0,59 | S   |       | F         | 63,702 |        |        |
| 360    | 0,73                              | 0,76 | 0,73 | S   |       | valor-P   | 4E-13  |        |        | 360    | 0,69                               | 0,73 | 0,66 | S   |       | valor-P   | 4E-07  |        |        |
|        |                                   |      |      |     |       | F crítico | 3,478  |        |        |        |                                    |      |      |     |       | F crítico | 3,478  |        |        |

O QUADRO K13 apresenta os resultados referentes à variação de massa em prismas de concreto, unidade de medida: (%).

QUADRO K13 – Variação de massa – Concreto.

| Dados individuais |                         |      |      |     | Análise de variância |           |        |        | Dados individuais |        |                          |      |      | Análise de variância |       |           |        |        |        |
|-------------------|-------------------------|------|------|-----|----------------------|-----------|--------|--------|-------------------|--------|--------------------------|------|------|----------------------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| idades            | REF - AGN - CPV         |      |      |     | Tukey                | Fonte     | Entre  | Dentro | Total             | idades | REF - AGN - CPIV         |      |      |                      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
| 28                | 0,20                    | 0,20 | 0,20 | REF |                      | SQ        | 0,2139 | 0,0047 | 0,2185            | 28     | 0,05                     | 0,05 | 0,07 | REF                  |       | SQ        | 0,0464 | 0,003  | 0,0494 |
| 91                | 0,44                    | 0,42 | 0,47 | S   |                      | gl        | 4      | 10     | 14                | 91     | 0,10                     | 0,13 | 0,14 | S                    |       | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180               | 0,51                    | 0,46 | 0,50 | S   |                      | MQ        | 0,0535 | 0,0005 |                   | 180    | 0,12                     | 0,13 | 0,14 | S                    |       | MQ        | 0,0116 | 0,0003 |        |
| 270               | 0,54                    | 0,51 | 0,52 | S   |                      | F         | 114,58 |        |                   | 270    | 0,16                     | 0,16 | 0,19 | S                    |       | F         | 38,754 |        |        |
| 360               | 0,55                    | 0,50 | 0,51 | S   |                      | valor-P   | 3E-08  |        |                   | 360    | 0,21                     | 0,22 | 0,25 | S                    |       | valor-P   | 5E-06  |        |        |
|                   |                         |      |      |     |                      | F crítico | 3,478  |        |                   |        |                          |      |      |                      |       | F crítico | 3,478  |        |        |
| idades            | RAA isolada - AGR - CPV |      |      |     | Tukey                | Fonte     | Entre  | Dentro | Total             | idades | RAA isolada - AGR - CPIV |      |      |                      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
| 28                | 0,30                    | 0,31 | 0,31 | REF |                      | SQ        | 0,2831 | 0,0143 | 0,2974            | 28     | 0,08                     | 0,08 | 0,06 | REF                  |       | SQ        | 0,0527 | 0,0021 | 0,0548 |
| 91                | 0,68                    | 0,63 | 0,57 | S   |                      | gl        | 4      | 10     | 14                | 91     | 0,11                     | 0,12 | 0,10 | NS                   |       | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180               | 0,62                    | 0,62 | 0,66 | S   |                      | MQ        | 0,0708 | 0,0014 |                   | 180    | 0,18                     | 0,18 | 0,15 | S                    |       | MQ        | 0,0132 | 0,0002 |        |
| 270               | 0,63                    | 0,64 | 0,70 | S   |                      | F         | 49,367 |        |                   | 270    | 0,19                     | 0,21 | 0,19 | S                    |       | F         | 62,482 |        |        |
| 360               | 0,64                    | 0,64 | 0,73 | S   |                      | valor-P   | 1E-06  |        |                   | 360    | 0,23                     | 0,26 | 0,23 | S                    |       | valor-P   | 5E-07  |        |        |
|                   |                         |      |      |     |                      | F crítico | 3,478  |        |                   |        |                          |      |      |                      |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-----------------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|------------------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 0,28                              | 0,31 | 0,32 | REF   | SQ        | 1,2863 | 0,0109 | 1,2972 | 28     | 0,15                               | 0,13 | 0,12 | REF   | SQ        | 0,1692 | 0,0017 | 0,1709 |
| 91     | 0,22                              | 0,16 | 0,24 | S     | gl        | 4      | 10     | 14     | 91     | 0,23                               | 0,22 | 0,20 | S     | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,41                              | 0,44 | 0,50 | S     | MQ        | 0,3216 | 0,0011 |        | 180    | 0,29                               | 0,28 | 0,30 | S     | MQ        | 0,0423 | 0,0002 |        |
| 270    | 0,75                              | 0,78 | 0,79 | S     | F         | 294,51 |        |        | 270    | 0,39                               | 0,36 | 0,39 | S     | F         | 244,1  |        |        |
| 360    | 0,97                              | 0,97 | 1,01 | S     | valor-P   | 3E-10  |        |        | 360    | 0,42                               | 0,42 | 0,43 | S     | valor-P   | 6E-10  |        |        |
|        |                                   |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |        |        |                                    |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |        |

| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica |      |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|---------------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 0,36                            | 0,36 | 0,32 | REF   | SQ        | 2,1746 | 0,0027 | 2,1774 | 28     | 0,11                             | 0,10 | 0,07 | REF   | SQ        | 0,2028 | 0,0355 | 0,2383 |
| 91     | 0,58                            | 0,58 | 0,60 | S     | gl        | 4      | 10     | 14     | 91     | 0,09                             | 0,13 | 0,08 | NS    | gl        | 4      | 10     | 14     |
| 180    | 0,89                            | 0,85 | 0,87 | S     | MQ        | 0,5437 | 0,0003 |        | 180    | 0,26                             | 0,28 | 0,24 | S     | MQ        | 0,0507 | 0,0035 |        |
| 270    | 1,22                            | 1,21 | 1,22 | S     | F         | 1998,5 |        |        | 270    | 0,31                             | 0,33 | 0,30 | S     | F         | 14,303 |        |        |
| 360    | 1,38                            | 1,36 | 1,37 | S     | valor-P   | 2E-14  |        |        | 360    | 0,31                             | 0,31 | 0,53 | S     | valor-P   | 0,0004 |        |        |
|        |                                 |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |        |        |                                  |      |      |       | F crítico | 3,478  |        |        |

O QUADRO K14 apresenta os resultados referentes à resistência à tração em corpos de prova de concreto, unidade de medida: (MPa).

QUADRO K14 – Tração indireta – Concreto.

| Dados individuais |                 |      |       | Análise de variância |        |        |        | Dados individuais |                  |      |       | Análise de variância |        |        |       |
|-------------------|-----------------|------|-------|----------------------|--------|--------|--------|-------------------|------------------|------|-------|----------------------|--------|--------|-------|
| idades            | REF - AGN - CPV |      | Tukey | Fonte                | Entre  | Dentro | Total  | idades            | REF - AGN - CPIV |      | Tukey | Fonte                | Entre  | Dentro | Total |
| 28                | 3,61            | 4,09 | REF   | SQ                   | 0,3025 | 0,2271 | 0,5296 | 28                | 2,93             | 3,17 | REF   | SQ                   | 6,1291 | 0,0508 | 6,18  |
| 91                | 4,63            | 4,17 | NS    | gl                   | 2      | 3      | 5      | 91                | 5,28             | 5,49 | S     | gl                   | 2      | 3      | 5     |
| 270               | 4,07            | 4,18 | NS    | MQ                   | 0,1513 | 0,0757 |        | 270               | 4,93             | 4,93 | S     | MQ                   | 3,0646 | 0,017  |       |
|                   |                 |      |       | F                    | 1,9985 |        |        |                   |                  |      |       | F                    | 180,8  |        |       |
|                   |                 |      |       | valor-P              | 0,2808 |        |        |                   |                  |      |       | valor-P              | 0,0007 |        |       |
|                   |                 |      |       | F crítico            | 9,5521 |        |        |                   |                  |      |       | F crítico            | 9,5521 |        |       |

| idades | RAA isolada - AGR - CPV |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA isolada - AGR - CPIV |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-------------------------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------------------------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 3,59                    | 3,59 | REF   | SQ        | 0,4627 | 0,0534 | 0,5162 | 28     | 3,07                     | 2,72 | REF   | SQ        | 3,589  | 0,0854 | 3,6745 |
| 91     | 4,12                    | 4,42 | S     | gl        | 2      | 3      | 5      | 91     | 4,85                     | 4,63 | S     | gl        | 2      | 3      | 5      |
| 270    | 3,85                    | 3,98 | NS    | MQ        | 0,2314 | 0,0178 |        | 270    | 4,19                     | 4,19 | S     | MQ        | 1,7945 | 0,0285 |        |
|        |                         |      |       | F         | 12,985 |        |        |        |                          |      |       | F         | 63,002 |        |        |
|        |                         |      |       | valor-P   | 0,0333 |        |        |        |                          |      |       | valor-P   | 0,0035 |        |        |
|        |                         |      |       | F crítico | 9,5521 |        |        |        |                          |      |       | F crítico | 9,5521 |        |        |

| idades | DEF isolada - AGN - CPV - Térmica |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | DEF isolada - AGN - CPIV - Térmica |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|-----------------------------------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|------------------------------------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 3,34                              | 3,01 | REF   | SQ        | 0,2704 | 0,087  | 0,3574 | 28     | 3,72                               | 4,05 | REF   | SQ        | 0,5149 | 0,0616 | 0,5766 |
| 91     | 3,24                              | 3,07 | NS    | gl        | 2      | 3      | 5      | 91     | 4,21                               | 4,09 | NS    | gl        | 2      | 3      | 5      |
| 270    | 2,81                              | 2,62 | NS    | MQ        | 0,1352 | 0,029  |        | 270    | 3,44                               | 3,44 | NS    | MQ        | 0,2575 | 0,0206 |        |
|        |                                   |      |       | F         | 4,6647 |        |        |        |                                    |      |       | F         | 12,528 |        |        |
|        |                                   |      |       | valor-P   | 0,12   |        |        |        |                                    |      |       | valor-P   | 0,035  |        |        |
|        |                                   |      |       | F crítico | 9,5521 |        |        |        |                                    |      |       | F crítico | 9,5521 |        |        |

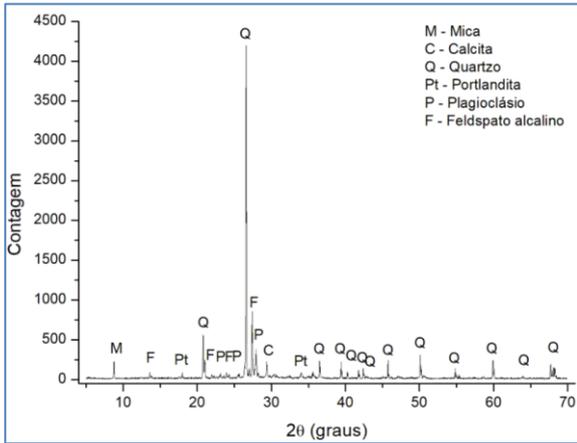
  

| idades | RAA + DEF - AGR - CPV - Térmica |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  | idades | RAA + DEF - AGR - CPIV - Térmica |      | Tukey | Fonte     | Entre  | Dentro | Total  |
|--------|---------------------------------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| 28     | 3,23                            | 3,43 | REF   | SQ        | 1,283  | 0,1619 | 1,4449 | 28     | 3,69                             | 4,20 | REF   | SQ        | 0,139  | 0,7907 | 0,9297 |
| 91     | 3,63                            | 3,22 | NS    | gl        | 2      | 3      | 5      | 91     | 4,03                             | 4,45 | NS    | gl        | 2      | 3      | 5      |
| 270    | 2,23                            | 2,57 | NS    | MQ        | 0,6415 | 0,0539 |        | 270    | 4,43                             | 3,36 | NS    | MQ        | 0,0695 | 0,2636 |        |
|        |                                 |      |       | F         | 11,891 |        |        |        |                                  |      |       | F         | 0,2638 |        |        |
|        |                                 |      |       | valor-P   | 0,0375 |        |        |        |                                  |      |       | valor-P   | 0,7843 |        |        |
|        |                                 |      |       | F crítico | 9,5521 |        |        |        |                                  |      |       | F crítico | 9,5521 |        |        |

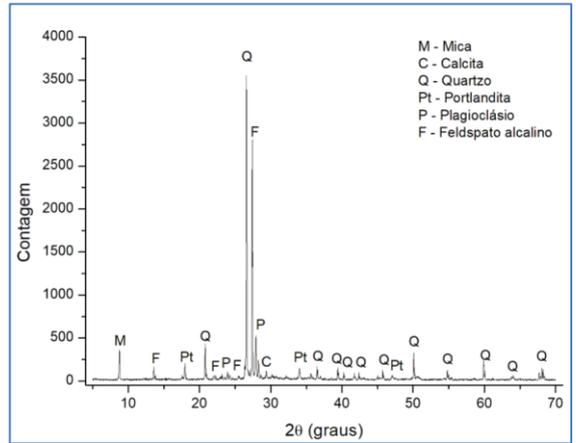
## APÊNDICE L

Neste APÊNDICE estão apresentados os difratogramas (DRX) para as argamassas utilizando o CP IV e o CP V, bem como para os concretos com o CP IV, nas idades de 91, 270 e 365 dias (*DEF* isolada e *DEF* + RAA).

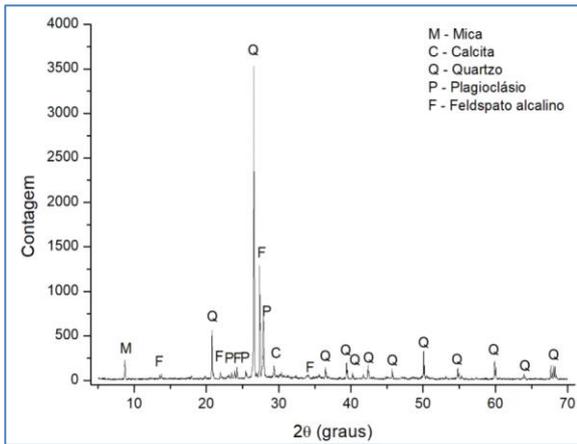
QUADRO L1 – DRX – Argamassa e concreto.



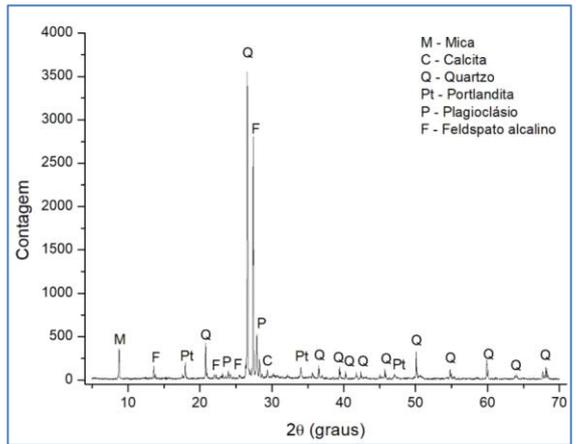
(a) Argamassa *DEF* isolada com CP IV – 91 dias



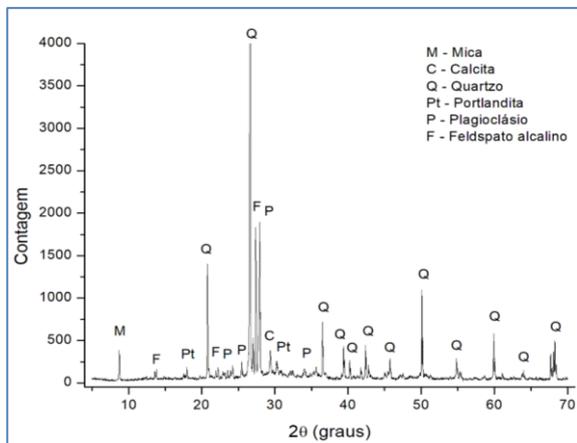
(b) Argamassa *DEF* isolada com CP V – 91 dias



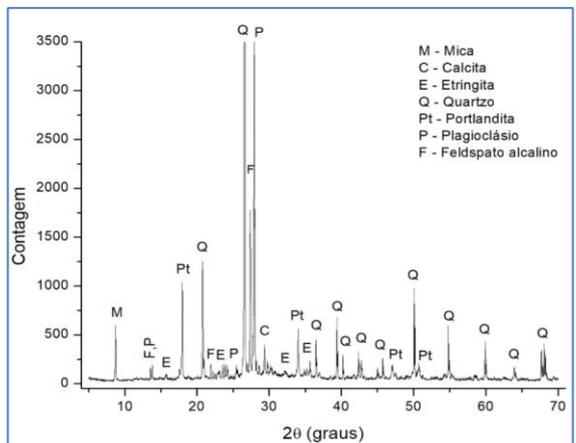
(c) Argamassa *DEF* isolada com CP IV – 270 dias



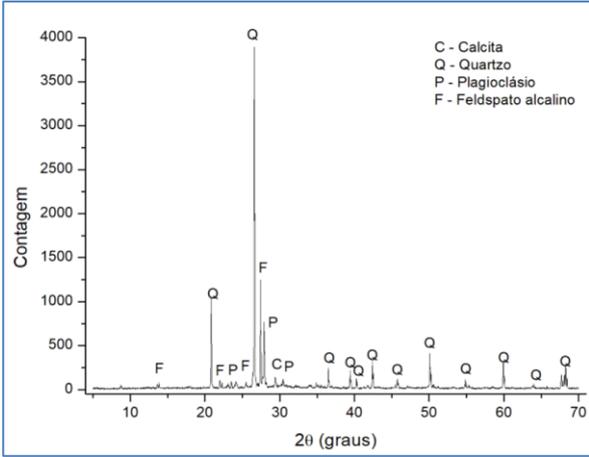
(d) Argamassa *DEF* isolada com CP V – 270 dias



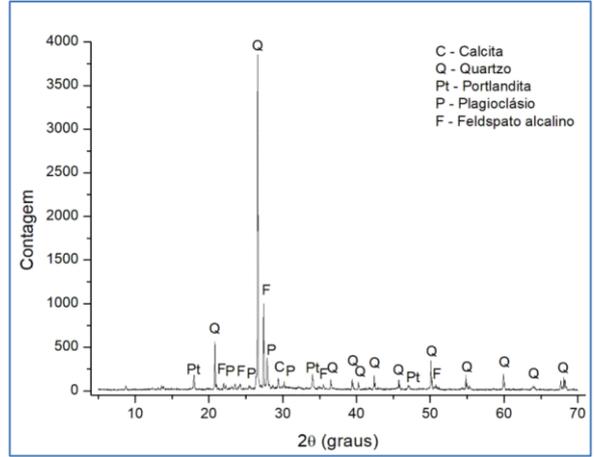
(e) Argamassa *DEF* isolada com CP IV – 365 dias



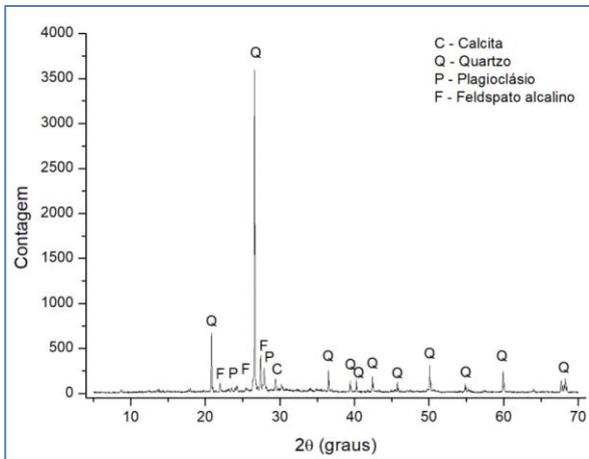
(f) Argamassa *DEF* isolada com CP V – 365 dias



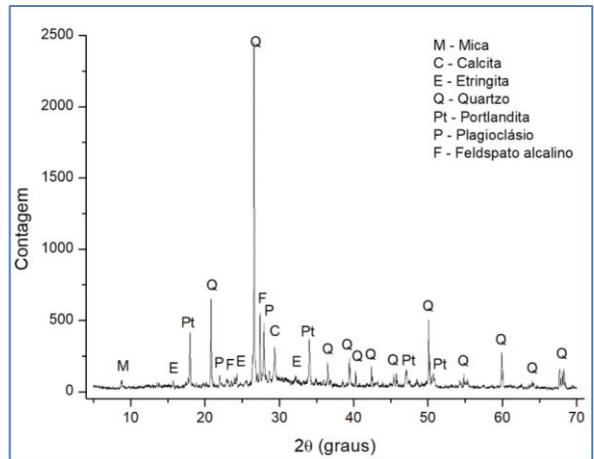
(g) Argamassa DEF+RAA com CP IV – 91 dias



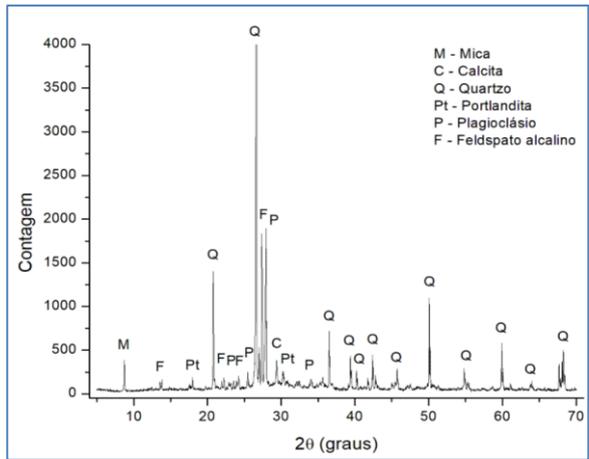
(h) Argamassa DEF+RAA com CP V – 91 dias



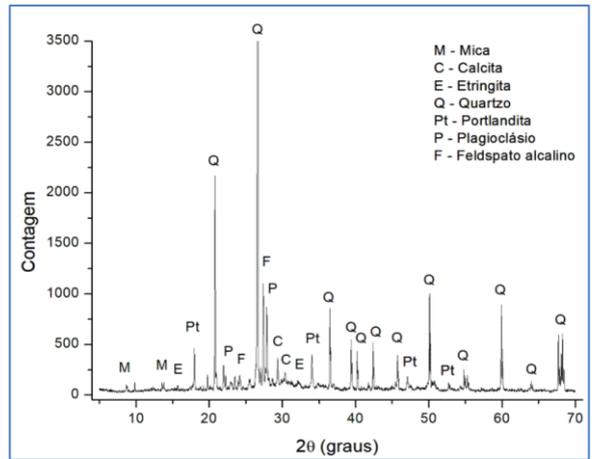
(i) Argamassa DEF+RAA com CP IV – 270 dias



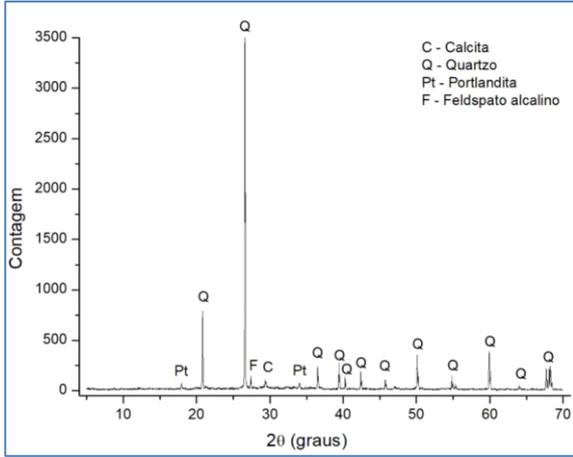
(j) Argamassa DEF isolada com CP V – 270 dias



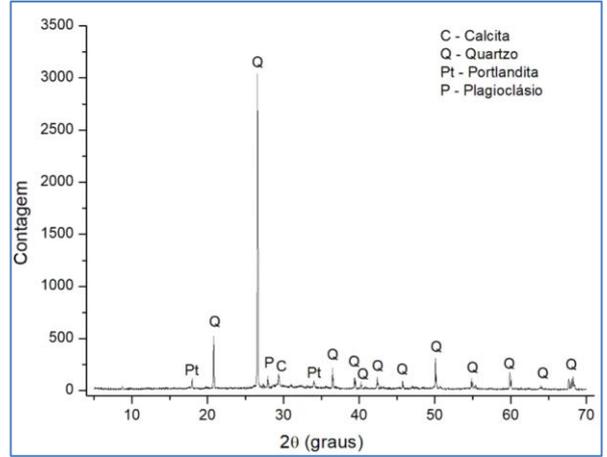
(k) Argamassa DEF+RAA com CP IV – 365 dias



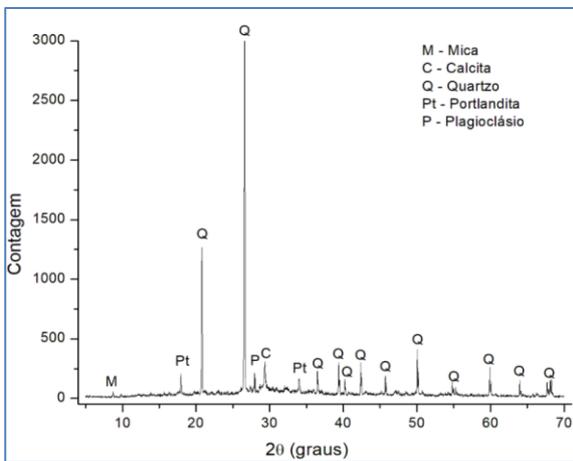
(l) Argamassa DEF isolada com CP V – 365 dias



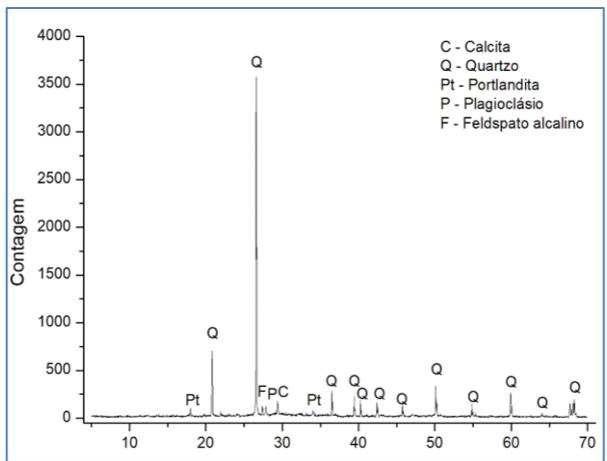
(m) Concreto DEF isolada com CP IV – 91 dias



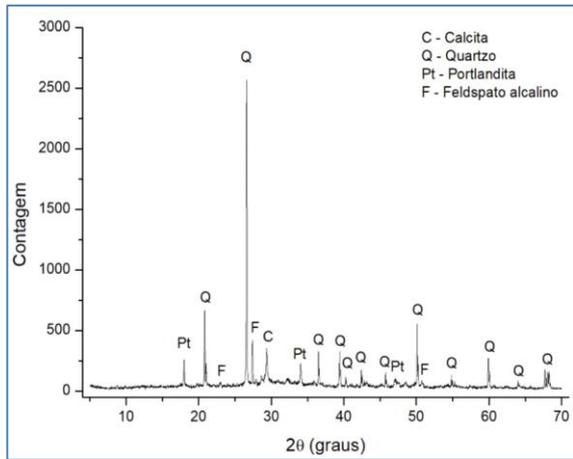
(n) Concreto DEF isolada com CP IV – 270 dias



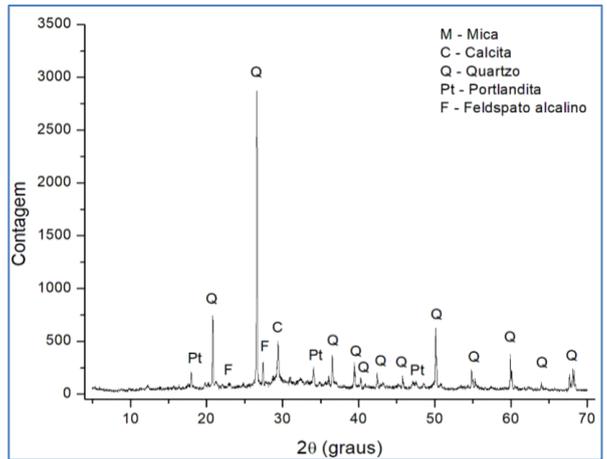
(o) Concreto DEF isolada com CP IV – 365 dias



(p) Concreto DEF+RAA com CP IV – 91 dias



(q) Concreto DEF+RAA com CP IV – 270 dias



(r) Concreto DEF+RAA com CP IV – 365 dias