FACULDADE IMED ESCOLA POLITÉCNICA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENGENHARIA CIVIL

MARINÊS LANGOSKI Engenheira Civil

ESTUDO DA FORMAÇÃO DA ETRINGITA TARDIA (DEF) EM ARGAMASSAS PREPARADAS COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

Passo Fundo 2021

MARINÊS LANGOSKI

ESTUDO DA FORMAÇÃO DA ETRINGITA TARDIA (DEF) EM ARGAMASSAS PREPARADAS COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Faculdade Meridional – IMED como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dr.a Francieli Tiecher Bonsembiante

CIP – Catalogação na Publicação

L284e LANGOSKI, Marinês

Estudo da formação de etringita tardia (DEF) em argamassas preparadas com diferentes tipos de cimento Portland / Marinês Langoski. – 2021.

139 f., il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade IMED, Passo Fundo, 2021.

Orientadora: Profa. Dra. Francieli Tiecher Bonsembiante.

1. Argamassa – Durabilidade. 2. Cimento Portland. 3. Etringita tardia --Deteriorização. I. BONSEMBIANTE, Francieli Tiecher, orientador. II. Título.

CDU: 628.4

Catalogação: Bibliotecária Angela Saadi Machado - CRB 10/1857

MARINÊS LANGOSKI

ESTUDO DA FORMAÇÃO DA ETRINGITA TARDIA (DEF) EM ARGAMASSAS PREPARADAS COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Faculdade Meridional – IMED como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Passo Fundo, 12 de julho de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Francieli Tiecher Bonsembiante - Pós-Doutora - IMED - Orientadora

Prof. Richard Thomas Lermen – Doutor – IMED – Avaliador Interno

Nicole Pagan Hasparyk – Doutora – Furnas Centrais Elétricas S.A. – Avaliador Externo

Profa. Mariana d'Orey Gaivão Portella Bragança – Doutora – LACTEC – Avaliador Externo

À minha família, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus. Pelo dom da vida, por me dar coragem, força e saúde, e por permitir a realização dos meus sonhos.

Agradeço à minha família, especialmente ao meu marido Marcos, pelo amor, compreensão e paciência, e por estar há tantos anos me transmitindo paz e segurança.

À IMED, pela acolhida e estrutura disponibilizada para a realização dessa pesquisa.

À minha orientadora, Dra. Francieli Tiecher Bonsembiante, pela oportunidade de trabalho conjunto, e pelas infinitas correções que permitiram que, pouco a pouco, a pesquisa fosse se concretizando e enriquecendo. Muito Obrigada!

À Dra. Nicole Pagan Hasparyk, pela oportunidade, pelas valorosas contribuições à cada conversa. Com certeza, aprendi muito contigo.

À Banca Examinadora, pelas valorosas contribuições.

Ao professor Dr. Richard Thomas Lermen, por toda a ajuda no laboratório e também no tratamento estatístico, e a professora Dra. Aline Zanchet, pelo auxilio no ensaio de TGA.

À FURNAS Centrais Elétricas, pela oportunidade de fazer parte do Projeto de P&D FURNAS/ANEEL, intitulado "Metodologias e infraestrutura tecnológica para aperfeiçoamento das avaliações de confiabilidade e otimização de empreendimentos de energia". Agradeço todo o apoio estrutural.

Às colegas e amigas de mestrado: Rafaela, Lara, Taís, Jessica, Louise e Pietra, pela amizade, paciência, por não me deixarem desistir, e por estarem sempre disponíveis para ouvir e compartilhar experiências. Obrigada!

Aos laboratoristas Rafael Kaiser e Rafael Passos, por toda a ajuda na moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios.

À minha sócia Amanda, por ter trabalhado dobrado em todas as minhas ausências no escritório, pela paciência, compreensão e companheirismo.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização desse sonho.

RESUMO

O presente estudo contempla a avaliação da DEF (Delayed Ettringite Formation), que é o termo empregado para descrever a formação da etringita tardia, e que ocorre, no concreto endurecido, após a cristalização dos demais compostos da hidratação do cimento, devido à elevação da temperatura a patamares superiores a 60 °C, nas primeiras horas da hidratação. A DEF promove a ocorrência de fissuração generalizada nas estruturas e danos às propriedades mecânicas do concreto. Uma vez desencadeada, a DEF não pode ser cessada. Por isso estudos que visem a prevenção de sua ocorrência são relevantes, no entanto, ainda não existem métodos normalizados para o estudo do potencial da DEF em laboratório. Além disso, não é completamente compreendida a influência das adições pozolânicas na DEF. Sendo assim, o objetivo desta pesquisa foi estudar o potencial de ocorrência da DEF em argamassas desenvolvidas com diferentes tipos de cimento, os quais são constituídos de diferentes percentuais de adição pozolânica. O estudo foi realizado empregandose quatro tipos de cimento, CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z e CP IV. O programa experimental contemplou dois métodos para o desencadeamento da DEF em laboratório, um método brasileiro e outro método francês. O estudo considerou o período de 1 ano para as avaliações físicas, mecânicas e microestruturais, em corpos de prova de argamassa, curados pelo método brasileiro. As mesmas avaliações foram feitas ao longo de 9 meses para o método francês. Em relação aos métodos de cura empregados, verificou-se que apenas pelo método brasileiro foi possível constatar a DEF. Os resultados mostraram maior suscetibilidade do CP V-ARI à DEF, seguido do CP II-F, CP II-Z e CP IV. O ciclo térmico proposto por Schovanz (2019) foi considerado adequado para o estudo de DEF em argamassas, uma vez que foi constatada a presença de DEF nos concretos. No entanto, o método francês mostrou-se mais lento nos reflexos da DEF nos concretos, sendo observadas as menores reduções de resistência à tração, menores visualizações da DEF na inspeção visual, e formações menos expressivas (cristais nos poros) através de MEV em relação ao método brasileiro. As argamassas produzidas com CP V-ARI foram as que apresentaram maiores expansões, aumentos mais expressivos de massa, bem como maiores reduções das propriedades mecânicas, seguidas das argamassas produzidas com CP II-F. A partir dessas constatações é possível concluir que as adições pozolânicas não foram capazes de inibir a DEF, apenas retardar o surgimento dos seus reflexos nos concretos.

Palavras-chave: Etringita tardia (DEF); argamassa; expansão; deterioração; durabilidade.

ABSTRACT

Delayed Ettringite Formation (DEF) is a term reserved for the formation of late ettringite, which takes place in hardened concrete after the crystallization of the other compounds of cement hydration. That occurs due to the elevation of its temperature to levels above 60 °C during the first hours of hydration. DEF leads to the occurrence of widespread cracking in structures and damages to the mechanical properties of concrete. Once DEF is triggered it cannot be stopped. That's why studies aiming to prevent its occurrence are relevant. However, there are no methods normalized for accessing the potential of DEF in laboratory. Moreover, the influence of pozzolanic aditives on DEF is not fully understood. Thus, the aim of this research is to study the potential for occurrence of DEF in mortar specimens that are develop with different types of cement, which are composed of different percentages of pozzolanic addition. The study was carried out by using four types of cement: CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z and CP IV. The experimental program includes two methods for triggering DEF in laboratory. One method is Brazilian and the other is French. The study took into account a one-year time course for physical, mechanical and microstructural evaluations in mortar specimens which were cured through the Brazilian method. The same evaluations were done over the course of 9 months through the French method. The analysis of the curing methods ascertained that the Brazilian method was the only one through which DEF could be verified. The results showed that CP V-ARI has greater susceptibility to DEF, followed by CP II-F, CP II-Z and CP IV. The presence of DEF in concrete was found once the thermal cycle, proposed by Schovanz (2019), was considered appropriate for the DEF's study. But, on the other hand, the French method was considered slower in the DEF concrete reflexes. A smaller reduction, in tensile strength, and smaller visualization of DEF in visual inspection were observed as less expressive formation (crystals in the pores) through MEV too compering to the Brazilian method. The mortars, which were produced with CP V-ARI, showed a greatest expansion, the most expressive increases in mass, as well as the decreases in mechanical properties, followed by the mortars produced with CP II-F. Considering these findings, it is possible to say that the pozzolanic addiction were not able to inhibit DEF only by delaying the appearance of its effects in concrete addiction.

Keywords: Late ettringite (DEF); mortar; expansion; deterioration; durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fissuração decorrente de DEF a) e b) vista superior e vista lateral de
bloco de concreto de fundação de edifício em Recife/PE; e RAA c) e d) vertedouros
da barragem Pirapora/SP19
Figura 2 - Evolução do calor de hidratação dos compostos do cimento Portland25
Figura 3 – Evolução da hidratação dos diferentes tipos de cimento
Figura 4 – Fissuras de RAS (a) e de DEF (b)34
Figura 5 - Expansão ocasionada pela DEF38
Figura 6 - Presença de DEF na interface entre a pasta de cimento e o agregado39
Figura 7 – DEF em concretos com cimento CP V-ARI, observada através de análises
por MEV, aos 9 meses
Figura 8 - Fatores necessários para expansão e fissuração por DEF40
Figura 9 – Fissuração intensa – Barragem de Fagilde - Portugal43
Figura 10 – Seções do viaduto afetado pela DEF43
Figura 11 – Resultados obtidos para resistência à tração45
Figura 12 – Resultados de SDI para concretos produzidos com CP V-ARI e CP IV.46
Figura 13 – Fluxograma do programa experimental50
Figura 14 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo55
Figura 15 – Cura e ambiente de exposição proposto pelo Método Brasileiro57
Figura 16 - Cura e ambiente de exposição proposto pelo Método Francês58
Figura 17 - Resultados de expansão e variação de massa para as argamassas -
método brasileiro – CPV e CP II-F61
Figura 18 - Resultados de expansão e variação de massa para as argamassas -
método brasileiro – CPIV e CP II-Z62
Figura 19 – Resultados de resistência à tração para as argamassas – método
brasileiro69
Figura 20 - Resultados de resistência à tração para as argamassas – método
francês70
Figura 21 - Imagem do interior dos corpos de prova aos 365 dias73
Figura 22 – Inspeção visual do aspecto interno da argamassa com cimento Portland
CP V-ARI74
Figura 23 - Inspeção visual do aspecto interno da argamassa com cimento Portland
CP II-F

Figura 24 - Inspeção visual do aspecto interno da argamassa com cimento Portland
CP II-Z77
Figura 25 - Inspeção visual do aspecto interno da argamassa com cimento Portland
CP IV
Figura 26 - Inspeção visual do aspecto interno da argamassa com cimento Portland
CP V-ARI – Método francês80
Figura 27 - Inspeção visual do aspecto interno da argamassa com cimento Portland
CP IV – Método francês81
Figura 28 – MEV aos 365 dias na argamassa com CP V-ARI82
Figura 29 - MEV aos 365 dias na argamassa com CP II-F83
Figura 30 - MEV aos 365 dias na argamassa com CP II-Z84
Figura 31 - MEV aos 365 dias na argamassa com CP IV85
Figura 32 - MEV aos 168 dias na argamassa com CP V-ARI86
Figura 33 - MEV aos 168 dias na argamassa com CP IV87
Figura 34 – TGA aos 365 dias na argamassa com CP V-ARI88
Figura 35 - TGA aos 365 dias na argamassa com CPII-F
Figura 36 - TGA aos 365 dias na argamassa com CP II-Z90
Figura 37 - TGA aos 365 dias na argamassa com CP IV91
Figura 38 - Verificação do nível de pH da água de imersão – Método brasileiro93
Figura 39 - Verificação do nível de pH da água de imersão – Método francês93
Figura 40 – Reatividade potencial do agregado111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Emprego de adições ativas na mitigação da DEF	17
Tabela 2 – Calor de hidratação dos compostos do cimento Portland	24
Tabela 3 – Adições presentes nos cimentos brasileiros	29
Tabela 4 – Características químicas dos cimentos utilizados	52
Tabela 5 – Características físicas dos cimentos utilizados	53
Tabela 6 – Caraterísticas mecânicas dos cimentos utilizados – resistência à	
compressão	53
Tabela 7 – Índices físicos do agregado miúdo	54
Tabela 8 – Análise de variância das expansões (%)	64
Tabela 9 – Análise da idade e do tipo de cimento nas expansões (%)	64
Tabela 10 - Análise de variância da variação de massa (%)	65
Tabela 11 - Análise da idade e do tipo de cimento na variação de massa (%)	65
Tabela 12 - Análise de variância das expansões (%)	67
Tabela 13 - Análise de variância da variação de massa (%)	67
Tabela 14 - Análise de variância do cimento na resistência à tração	71
Tabela 15 – Análise de variância da idade e do tipo de cimento na resistência à	l
tração	72
Tabela 16 – Perda de massa dos produtos presentes nas argamassas, na base	e de
voláteis – método brasileiro	91
Tabela 17 – Perda de massa dos produtos presentes nas argamassas, na base	e de
não voláteis – método brasileiro	92
Tabela 18 – Resumo dos resultados obtidos na idade final para cada análise	
realizada	96
Tabela 19 – Reatividade potencial do agregado	111

LISTA DE SIGLAS

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
- Al₂O₃ Trióxido de alumínio
- AFm Monossulfoaluminato
- AFt Trissulfoaluminato de cálcio
- AFtp Etringita
- ANEEL Agência Nacional de energia elétrica
- ASTM American Society for Testing and material
- C₃A Aluminato tricálcico
- Ca²⁺ Cálcio
- CaO Óxido de cálcio
- CaCO₃ Carbonato de cálcio
- Ca(OH)₂ Hidróxido de cálcio
- CaSiO₃ Taumasita
- CaSO₄ Sulfato de cálcio anidro
- C₃S₂H₃ Gel de C-S-H
- C₄AF Ferroaluminato de cálcio
- C₂S Silicato dicálcico
- C₃S Silicato tricálcico
- CH Portlandita
- CP I Cimento Portland comum
- CP B Cimento Portland branco
- CP I S Cimento Portland comum com adições
- CP II-E Cimento Portland composto com escória
- CP III Cimento Portland de Alto Forno
- CP II-F Cimento Portland composto com material carbonático
- CP II-Z Cimento Portland composto com material pozolânico
- CP IV Cimento Portland Pozolânico
- CPB Cimento Portland branco
- CPS Corpos de prova
- CPV ARI Cimento Portland de alta resistência inicial

C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
-------	------------------------------

- DEF Delayed Ettringite Formation
- DRX Difração de Raios X
- EDS Espectrometria por Energia Dispersiva de Raios X
- H₂O Água
- IAP Índice de atividade pozolânica
- K⁺ Potássio
- K₂O Óxido de potássio
- LCPC Laboratoire central des ponts et chaussées
- MEV Microscopia eletrônica de varredura
- MgO Óxido de magnésio
- Na₂O Óxido de sódio
- pH Potencial hidrogeniônico
- RAA Reação álcali-agregado
- RAS Reação álcali-sílica
- RS Resistente a sulfatos
- Na₂SO₄ Sulfato de sódio
- PDI Plastic Deformation Index
- OH⁻ Hidroxila
- RS Resistente à sulfatos
- SDI Stiffness Damage Index
- SDT Stiffness Damage Test
- SiO₂ Dióxido de silício
- SO₃ Trióxido de enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Contexto e justificativa	17
1.4 Objetivos	22
2 REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1 Cimento Portland	23
2.1.1 Hidratação do cimento Portland	26
2.1.2 Tipos de cimento Portland	28
2.2 Reações expansivas no concreto	32
2.3 Formação da Etringita Tardia	37
2.3.2 Consequências da DEF	42
2.3.3 Métodos de laboratório para provocar DEF	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 Materiais	51
3.1.1 Aglomerantes	51
3.1.2 Agregado	54
3.2 Produção das argamassas	55
3.3 Procedimentos de cura	56
3.3 Procedimentos de cura3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje	56 itas às
3.3 Procedimentos de cura3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje condições para desenvolvimento da DEF	56 itas às 59
 3.3 Procedimentos de cura 3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje condições para desenvolvimento da DEF	56 itas às 59 59
 3.3 Procedimentos de cura. 3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje condições para desenvolvimento da DEF. 3.4.1 Avaliação das propriedades físicas	56 itas às 59 59 59
 3.3 Procedimentos de cura. 3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje condições para desenvolvimento da DEF. 3.4.1 Avaliação das propriedades físicas	56 itas às 59 59 59 60
 3.3 Procedimentos de cura. 3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje condições para desenvolvimento da DEF. 3.4.1 Avaliação das propriedades físicas. 3.4.2 Avaliação da resistência à tração. 3.4.3 Inspeção visual dos corpos de prova	56 itas às 59 59 60 60
 3.3 Procedimentos de cura. 3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje condições para desenvolvimento da DEF. 3.4.1 Avaliação das propriedades físicas. 3.4.2 Avaliação da resistência à tração. 3.4.3 Inspeção visual dos corpos de prova 3.4.4 Avaliação microestrutural das argamassas 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES. 	56 itas às 59 59 60 60 61
 3.3 Procedimentos de cura. 3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje condições para desenvolvimento da DEF. 3.4.1 Avaliação das propriedades físicas. 3.4.2 Avaliação da resistência à tração. 3.4.3 Inspeção visual dos corpos de prova	56 itas às 59 59 60 61 61
 3.3 Procedimentos de cura. 3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje condições para desenvolvimento da DEF. 3.4.1 Avaliação das propriedades físicas 3.4.2 Avaliação da resistência à tração 3.4.3 Inspeção visual dos corpos de prova 3.4.4 Avaliação microestrutural das argamassas 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES. 4.1 Avaliação da expansão e da variação de massa 4.2 Resistência à tração. 	56 itas às 59 59 60 61 61 68
 3.3 Procedimentos de cura. 3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje condições para desenvolvimento da DEF. 3.4.1 Avaliação das propriedades físicas 3.4.2 Avaliação da resistência à tração. 3.4.3 Inspeção visual dos corpos de prova 3.4.4 Avaliação microestrutural das argamassas 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES. 4.1 Avaliação da expansão e da variação de massa 4.2 Resistência à tração. 4.3 Inspeção visual. 	56 itas às 59 59 60 61 61 61 68 72
 3.3 Procedimentos de cura. 3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas suje condições para desenvolvimento da DEF. 3.4.1 Avaliação das propriedades físicas. 3.4.2 Avaliação da resistência à tração. 3.4.3 Inspeção visual dos corpos de prova . 3.4.4 Avaliação microestrutural das argamassas. 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES. 4.1 Avaliação da expansão e da variação de massa . 4.2 Resistência à tração. 4.3 Inspeção visual. 4.4 Análise microestrutural . 	56 itas às 59 59 60 61 61 61 61 61 61 63 72 81
 3.3 Procedimentos de cura	56 itas às 59 59 60 61
 3.3 Procedimentos de cura	56 itas às 59 59 60 61 61 61 61 61 61 61 61 61 61 81 81 81
 3.3 Procedimentos de cura	56 itas às 59 59 60 61 61 61 61 61 61 61 61 61 81 81 81 81

5. CONCLUSÕES	96
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	98
REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A	111
APÊNDICE B	112
APÊNDICE C	117
APÊNDICE D	122
APÊNDICE F	126
APÊNDICE G	128
APÊNDICE H	129
APÊNDICE I	133

1 INTRODUÇÃO

A qualidade e durabilidade das estruturas de concreto pode ser prejudicada quando não são utilizados materiais adequados na mistura, em função dos ambientes nos quais essas estão expostas, ou, ainda, pela falta de cuidados no processo executivo.

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas visando minimizar os problemas de durabilidade das estruturas de concreto. Entre os focos desses estudos estão algumas reações químicas que colocam em risco o desempenho e a segurança das estruturas de concreto, sendo as mais comuns o ataque de íons cloreto, a carbonatação, a reação álcali-sílica (RAS), a ação de sulfatos de origem externa e os sulfatos de origem interna, fenômeno também conhecido como Formação da Etringita Tardia (DEF – *Delayed Ettringite Formation*) (NEVILLE, 1997; TORRES; ANDRADE, 2016).

O efeito deletério da DEF se deve à característica expansiva da etringita, que leva à fissuração da matriz cimentícia ao cristalizar tardiamente dentro de poros ou fissuras pré-existentes, quando a matriz já se encontra rígida. A fissuração compromete as propriedades mecânicas do concreto e a durabilidade das estruturas, isso porque, a partir da existência de fissuras, o elemento estrutural fica vulnerável ao acesso de outros agentes agressivos (FERRARIS *et al.* 1997; SOUZA, 2006; ZHANG *et al.* 2017; KARTHIK *et al.* 2018; MALBOIS *et al.* 2019).

Uma vez desencadeada, a DEF não pode ser cessada, por isso a prevenção é a melhor forma de evitar o problema (MELO, 2010; HASPARYK *et al.* 2012; TORRES; ANDRADE, 2016; TANKASALA; SCHINDLER, 2017; SCHMALZ, 2018).

Um dos principais fatores que afeta a ocorrência da DEF é a elevação da temperatura nas primeiras horas da hidratação do cimento, assim como o teor de C₃A presente no cimento (TAYLOR, 1998 apud QUARCIONI, 2008; COLLEPARDI, 2003; ODLER, 2007; BRYANT, 2011).

Em relação à temperatura que desencadeia a formação da DEF, Schovanz (2019) esclarece que existem contradições na literatura, porém, de modo geral, as pesquisas apontam para temperaturas de cura superiores a 65 °C. As temperaturas elevadas são atingidas com aquecimento dos CPs, em ciclos pré-definidos, após a moldagem. Neste sentido, muitos autores citam o emprego de adições pozolânicas como forma de minimizar a elevação da temperatura durante a hidratação do cimento (RAMLOCHAN *et al.* 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2014; AMINE *et al.* 2017). As

adições também têm sido estudadas na tentativa de evitar problemas decorrentes da DEF a partir dos produtos de hidratação por elas formados, contudo, ainda não são consenso. A Tabela 1 apresenta os principais resultados encontrados na literatura a respeito do emprego de diferentes adições pozolânicas em relação à DEF.

Pesquisador	Adição pozolânica	Temperatura de cura	Tempo de avaliação	Principal resultado observado
Ramlochan <i>et al.</i> (2003)	Sílica ativa, escória de alto forno, metacaulim e cinza volante	60, 70, 80 e 95 ⁰C	1200 dias	 Sílica ativa: não foi eficaz no controle da expansão; Metacaulim: 8% foi capaz de mitigar a DEF; Escória de alto forno: 25% foi capaz de mitigar a DEF; Cinza volante: sua eficiência depende da sua composição.
Dayarathne et al. (2013)	Cinza volante	95 °C	100 dias	- Cinza volante: 50% foi eficiente contra a DEF.
Amine <i>et al.</i> (2017)	Cinza volante e metacaulim	80 °C	700 dias	 Metacaulim: 15% não foi eficiente contra a DEF; Cinza volante: 15% foi eficiente contra a DEF.
Asamoto <i>et al.</i> (2017)	Cinza volante	90 °C	400 dias	- Cinza volante: 25% foi eficiente contra a DEF, mesmo quando empregados cimentos com alto teor de SO ₃ e fíler calcário.
Leklou <i>et al.</i> (2017)	Cinza volante	80 °C	650 dias	- Cinza volante: 20% a 30% foram eficientes para controlar o fenômeno da expansão.

Tabela 1 – Emprego de adições ativas na mitigação da DEF

No Brasil existem 10 tipos de cimento que contém adições pozolânicas. Nesse sentido, em relação à DEF, alguns estudos já abordaram o emprego do cimento Portland pozolânico (CP IV), comparativamente ao cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) (SCHOVANZ, 2019; BRONHOLO, 2020), porém, com resultados inconclusivos a respeito do comportamento do cimento pozolânico, devido à necessidade da avaliação em idades mais avançadas. Diante disso, o foco principal desta pesquisa foi avaliar a influência de quatro diferentes tipos de cimentos Portland na ocorrência da DEF.

1.1 Contexto e justificativa

O ataque por sulfatos passou a ser estudado em 1936, após o aparecimento de deteriorações precoces (entre 10 e 15 anos) em estruturas de concreto, de acordo

Fonte: PRÓPRIA AUTORIA (2021)

com Mehta e Monteiro (2014). Historicamente, os primeiros casos foram registrados ao longo da Costa do Golfo, ao Leste da Arábia Saudita, na Província da Pradaria Canadense, e ao Oeste dos Estados Unidos.

Com o passar dos anos, inúmeros outros casos de ataque por sulfatos foram sendo observados e estudados em todo o mundo, com destaque para as estruturas localizadas em ambientes úmidos, sendo comum em barragens, pontes, estruturas de fundação, marinhas e em concretos pré-moldados.

Em condições de laboratório, a ocorrência da DEF normalmente é avaliada através da expansão de corpos de prova e da análise de propriedades mecânicas (DESCHNER *et al.* 2013). Dentre as propriedades mecânicas, a mais afetada, segundo a literatura, é o módulo de elasticidade, assim como acontece com outras reações expansivas que podem ocorrer nas estruturas de concreto, como por exemplo a RAA (reação álcali-agregado) (LEKLOU *et al.* 2016; GIANNINI *et al.* 2018).

Muitos estudos também apontam que a resistência à compressão é outra propriedade que apresenta redução devido à deterioração por DEF; normalmente as reações expansivas afetam a resistência à compressão, mas para a RAA, por exemplo, isso não é tão comum no início do seu processo deletério, como acontece na DEF (HASPARYK, 2011; SANCHEZ, 2018; SCHOVANZ, 2019). Sanchez *et al.* (2018) verificaram reduções de até 80% da resistência à compressão em concretos afetados pela DEF. Jeong *et al.* (2017) explicam que ambos, resistência à compressão e módulo de elasticidade, têm decréscimos proporcionais, visto que dependem da situação física do corpo de prova ensaiado, quanto à existência, ou não, de microfissuras.

Outra propriedade mecânica muito sensível às fissurações da matriz cimentícia é a resistência à tração, mais até que a resistência à compressão. Hasparyk (2005) apresenta decréscimos de 8 a 17% em concretos acometidos pela RAS. Do mesmo modo, porém em relação à DEF, Sanchez *et al.* (2018) relatam que para níveis de expansão entre 0 e 0,03%, a redução da resistência à tração pode ser mais expressiva, e de até 75%. Schovanz (2019) também verificou elevadas reduções para essa propriedade, da ordem de 60% para concretos contendo cimento do tipo CP V-ARI, e 17% para concretos com o cimento CP IV (com cinza volante), na idade de 252 dias.

A principal manifestação visível da DEF nas estruturas de concreto é a fissuração mapeada na superfície, sendo similar àquela da RAS, conforme pode ser

observado na Figura 1. Muitas vezes, inclusive, as manifestações visuais da DEF se confundem com as da RAA, uma vez que ambas ocorrem em grandes maciços de concreto, sujeitos à umidade (TORRES; ANDRADE, 2016). A Figura 1 apresenta fissurações geradas por ambas as reações expansivas, conforme Hasparyk *et al.* (2012) e Sollero *et al.* (2016).

Figura 1 – Fissuração decorrente de DEF a) e b) vista superior e vista lateral de bloco de concreto de fundação de edifício em Recife/PE; e RAA c) e d) vertedouros da barragem Pirapora/SP



Fonte: a) b) Hasparyk et al. (2012); c) d) Sollero et al. (2016)

Por se tratar de um fenômeno influenciado por alterações ocorridas nas reações de hidratação do cimento Portland, a ocorrência da DEF é mais comum em elementos de concreto com grandes seções, produzidos com altos consumos de cimento. Outro aspecto importante a ser considerado é o ambiente de exposição; ambientes úmidos são propícios à DEF. Neste sentido, Zhang *et al.* (2002) demonstraram a presença de DEF em estruturas sujeitas à 85% de umidade, aproximadamente. No estudo de Graf (2007), a umidade medida nas estruturas acometidas pela DEF foi de 92% e, segundo Godart (2017), essa deve estar entre 90% e 95% para que a DEF se desenvolva. A cura térmica e exposição à altas umidades na etapa de serviço pode promover expansão e consequente fissuração, culminando na ruptura e lascamento do material, levando-o à severa deterioração.

Comparativamente a outros problemas que afetam a durabilidade do concreto, existem poucas pesquisas feitas no Brasil a respeito da DEF até o presente momento. Os principais trabalhos publicados foram:

 Melo (2010): pesquisa da DEF em 3 estudos distintos: efeito do calor de hidratação em concreto de cimento Portland pozolânico, influência do consumo de cimento para a elevação do calor de hidratação e efeito da temperatura sobre a microestrutura da pasta;

- Hasparyk *et al.* (2012): estudo de caso envolvendo o ataque combinado da RAS e da DEF em fundações de estruturas no Recife/PE;

 Brito (2013): avaliação de aspectos relacionados à influência da cura na ocorrência da DEF e comprometimento da resistência à compressão de blocos de concreto;

- Torres e Andrade (2016): análise do risco de ocorrência da DEF em blocos de fundação;

 Schmalz (2018): estudo da durabilidade de argamassas com adição de nanosílica coloidal e sílica ativa submetidas ao ataque de sulfatos de origem interna e externa;

- Silva et al. (2018): revisão de literatura sobre o tema;

- Hasparyk e Kuperman (2019): revisão de literatura sobre reações expansivas, incluindo a DEF, e apresentação de casos de estruturas deterioradas;

 Schovanz (2019): estudo da DEF em concretos produzidos com dois tipos de cimento (pozolânico e de alta resistência inicial) ao longo do tempo;

- Bronholo (2020): estudo da RAA e da DEF, isolados e mistos, em concretos e argamassas, contendo dois tipos de cimento Portland, o pozolânico e o de alta resistência inicial;

- Miranda (2020): estudo da DEF em pastas de cimento e argamassas submetidas à cura térmica e à cura convencional, com adição de nanosílica.

Em âmbito internacional, as pesquisas em relação à DEF estão mais avançadas, com um número maior de publicações sobre o processo da formação da etringita tardia (MYURAN *et al.* 2015; GODART, 2017), assim como estudos de casos, prognósticos e diagnósticos (ADAMOPOULOU *et al.* 2011; AMINE *et al.* 2017).

Um aspecto que chama atenção na literatura é o fato de não haver consenso em como avaliar a ocorrência de DEF em âmbito laboratorial, muito provavelmente pela complexidade do processo. As diferenças observadas nas pesquisas dificultam a comparação de resultados e a compreensão do fenômeno.

O fenômeno da DEF acontece a partir de modificações ocorridas durante o processo inicial de geração dos produtos de hidratação do cimento. Por isso, apesar de ser uma patologia das estruturas de concreto, muitos estudos são realizados por meio de corpos de prova de argamassa, tais como Adamopoulou *et al.* (2011), que analisaram argamassas expostas a diferentes tipos de cura, Dayarathne *et al.* (2013) que avaliaram o potencial de DEF para diferentes tipos de cimento, e que continham diferentes tipos de adições; Leklou *et al.* (2017), que avaliaram o efeito da cinza volante na formação da DEF em argamassas, e Rashidi *et al.* (2017), que analisaram os danos causados em argamassas a partir do surgimento da DEF. Além disso, muitas vezes, os estudos em argamassa podem auxiliar, em tempo reduzido, a projeção do comportamento de concretos frente a ataques expansivos. Isso já ocorre para a RAA, onde existem normas para avaliar o potencial de reatividade de agregados em argamassas, por meio de métodos acelerados, além daqueles executados em concretos, com ensaios de longa duração (ABNT NBR 15577, 2018).

Porém, independentemente de os estudos serem realizados em concreto ou em argamassa, poucas pesquisas foram feitas a respeito da influência de adições pozolânicas para a ocorrência da DEF. As principais pesquisas encontradas até o presente momento são: Ramlochan *et al.* (2003), que investigaram a expansibilidade de argamassas, produzidas com diferentes adições pozolânicas; Dayarathne *et al.* (2013), que avaliaram a formação da DEF com diferentes tipos de cimento e Leklou *et al.* (2017), que estudaram três teores diferentes de substituição de cinza volante em argamassas sujeitas à DEF.

Em relação à metodologia a ser empregada para avaliar DEF em laboratório, também não há consenso sobre as condições a serem empregadas de temperatura, umidade e acondicionamento dos corpos de prova, conforme aborda Schovanz (2019). A autora aponta 9 trabalhos com metodologias diferentes para a avaliação da DEF, segundo levantamento da literatura realizado.

Assim, tendo em vista a contextualização apresentada, buscou-se com a presente pesquisa avaliar o comportamento de argamassas produzidas com quatro diferentes tipos de cimento, e o seu potencial de desencadeamento da DEF ao longo do tempo, empregando-se 2 metodologias de cura e acondicionamento dos corpos de prova.

Esta pesquisa fez parte de um projeto P&D FURNAS/ANEEL, desenvolvido por Furnas Centrais Elétricas S.A., que buscou avaliar o comportamento de pastas, argamassas e concretos produzidos com variados cimentos quando submetidos às condições propícias para DEF. O projeto intitula-se "Metodologias e infraestrutura tecnológica para aperfeiçoamento das avaliações de confiabilidade e otimização de empreendimentos de energia".

1.4 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar o potencial de ocorrência da DEF por meio de duas diferentes metodologias, na presença de quatro diferentes tipos de cimento Portland, em corpos de prova de argamassa.

A fim de alcançar o objetivo principal da pesquisa, seguem os objetivos específicos:

- a) verificar se existe diferença de comportamento das argamassas em função dos diferentes cimentos testados frente à DEF por meio de análises laboratoriais, incluindo microestruturais ao final do estudo;
- b) avaliar se o procedimento de indução da DEF, denominado "método brasileiro", disposto em Schovanz (2019) e Hasparyk *et al.* (2020) - e o método do LCPC (2007) – método francês - possuem alguma equivalência e potencial para estudos da ocorrência da DEF em corpos de prova de argamassa;
- c) verificar se há influência dos procedimentos de indução da DEF adotados no comportamento da DEF ao longo do tempo, por meio da avaliação de propriedades físicas e mecânicas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é o produto da mistura do clínquer com outros materiais, tais como adições ativas e gesso, em proporções adequadas. O clínquer, por sua vez, é o produto da queima de calcário e argila à 1450 °C.

Durante o processo de produção do clínquer, antes da queima, é adicionado minério de ferro à mistura, a fim de ajustar a composição química do material. A indústria cimenteira também adiciona gipsita e realiza a moagem de clínquer, para que não ocorra a hidratação espontânea dos seus componentes (COUTINHO, 2006).

O processo de aquecimento é feito após a mistura e moagem da matéria-prima, e tem por função promover a evaporação da água e outros materiais voláteis. Após, ocorre o processo de calcinação a temperaturas entre 500 e 900 °C, responsável pela descarbonatação do material calcário. Por fim, ocorre a reação entre o óxido de cálcio e as substâncias sílico-aluminosas, em temperaturas entre 850 °C à 1450 °C, originando os constituintes do cimento: C₄AF, C₃A, C₂S e C₃S (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Mehta e Monteiro (2014) explicam as funções dos principais minerais constituintes da seguinte maneira:

 - C₃S (45 a 60%): também conhecido como alita, ou silicato tricálcico; é responsável pela liberação de média quantidade de calor durante a hidratação e, em contato com a água, contribui para as resistências iniciais e finais de hidratação;

 - C₂S (15 a 30%): silicato dicálcico, ou belita; contribui para as resistências iniciais, sendo menor sua contribuição para as resistências finais. A velocidade de reação da belita com a água é lenta, e o calor de hidratação é baixo;

- C₃A (6 a 12%): aluminato tricálcico, também conhecido por celita; é responsável por reduzir a atividade das pozolanas, e é considerado o maior responsável pela liberação de calor durante a hidratação. A celita promove a pega rápida, e é responsável pela formação da etringita quando os materiais cimentícios estiverem expostos ao ataque por sulfatos. Os cimentos resistentes a sulfatos possuem baixos teores de C₃A;

 - C₄AF (6 a 8%): ferroaluminato de cálcio ou ferrita; possui médio calor de hidratação, velocidade média de reação com a água, contribui para a resistência, principalmente nas primeiras idades e, de forma mediana, nas idades finais.

Além dos constituintes supracitados, ainda estão presentes no clínquer, em menores proporções, cal livre (CaO) (1%), álcalis - K₂O; Na₂O - (1%), óxido de magnésio livre (MgO) (1%), entre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A Tabela 2 demonstra as taxas relativas da evolução do calor em função dos quatro compostos principais do cimento Portland.

Composto	Calor de hidratação a uma dada idade (cal/g)			
Composio	3 dias	90 dias	13 anos	
C₃S	58	104	122	
C ₂ S	12	42	59	
C ₃ A	212	311	324	
C ₄ AF	69	98	102	

Tabela 2 – Calor de hidratação dos compostos do cimento Portland

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2014)

A NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece todos os requisitos para os cimentos brasileiros. Os cimentos normalizados no Brasil são: cimento Portland puro (CP I), que pode receber adições e se subdividir em cimento Portland comum com adição (CP I–S); cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno (CP II–E); cimento Portland composto com material carbonático (CP II–F); cimento Portland composto com material carbonático (CP II–F); cimento Portland composto com material pozolânico (CP II–Z); cimento Portland de alto-forno (CP III); cimento Portland pozolânico (CP IV); cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) e cimento Portland branco não estrutural (CPB) e estrutural. Para evitar o ataque por sulfatos, a normalização brasileira recomenda que o teor de C₃A no clínquer seja de até 8%. No entanto, o controle apenas da composição do cimento não garantirá a resistência a esse ataque agressivo. De acordo com Monteiro e Kurtis (2003), o baixo teor de C₃A será efetivo apenas quando aliado a uma baixa relação água/cimento (<0,5).

Além de limitar o teor de C₃A, a NBR 16697 (ABNT, 2018) determina que para que um cimento seja resistente a sulfatos deve apresentar expansão menor ou igual a 0,03%, aos 56 dias de idade, quando ensaiado pelo método estabelecido pela NBR 13583 (ABNT, 2014). No Brasil, os cimentos que respeitam os limites da normalização em relação ao potencial de inibição ao ataque de íons sulfato podem receber a sigla RS (resistente a sulfatos).

A NBR 16697 (ABNT, 2018) ainda estabelece requisitos para que os cimentos sejam classificados como 'de baixo calor de hidratação'. Segundo a referida norma, para que o cimento Portland atenda a esse critério o calor de hidratação deve ser menor ou igual à 270 j.g⁻¹ após 41 h de ensaio pela NBR 12006 (ABNT, 2018).

A Figura 2 apresenta as curvas de calor de hidratação para cada composto do clínquer.



Figura 2 - Evolução do calor de hidratação dos compostos do cimento Portland

Fonte: Adaptado de MEHTA; MONTEIRO (2014)

O conhecimento da quantidade de calor liberado é importante, tendo em vista que o calor é algumas vezes favorável e outras vezes desfavorável. Após o início da hidratação do cimento, o concreto gera calor e, nas primeiras idades, apresenta um módulo de elasticidade baixo e há o início de ganho de resistência. Aparecem, então, tensões de compressão que não acarretam fissuras, mas as tensões de compressão instaladas na estrutura começarão a diminuir até se reverterem em tensões de tração no material. O concreto, que resiste pouco à tração, passará a apresentar os problemas de fissuração a partir deste momento, desde que as tensões de tração sejam maiores que a tensão admissível do concreto à tração (MEHTA; MONTEIRO, 2014; GAMBALE *et al.* 2019).

2.1.1 Hidratação do cimento Portland

O termo hidratação refere-se ao conjunto de mudanças que ocorrem quando o cimento anidro, ou uma de suas fases constituintes, é misturado à água. A hidratação do cimento resulta em produtos que possuem características de pega e endurecimento (QUARCIONI, 2008).

O calor de hidratação é justamente a quantidade de calor liberada durante a hidratação das fases do cimento (TAYLOR, 1999; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Em obras nas quais são utilizados grandes volumes de concreto, a alta liberação de calor ocasionada pela reação de hidratação pode gerar fissuras, devido à baixa condutividade térmica do concreto (BRYANT, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os principais minerais formados a partir da hidratação são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), a etringita (AFtp), o monossulfoaluminato (AFm) e a portlandita (CH ou Ca(OH)₂). Segundo Mehta e Monteiro (2014), após o contato do cimento com a água, imediatamente inicia-se uma troca iônica entre a fase líquida e os sólidos. Isso ocorre porque alguns compostos do cimento possuem solubilidade elevada, o que acarreta rápido aumento da concentração dos aluminatos de cálcio, sulfatos e álcalis na fase líquida (DIAMOND, 1996 apud SILVA, 2000).

O processo de hidratação do cimento é dividido, para fins de estudo, em cinco etapas, sendo elas: estágio inicial, período de indução, período de aceleração, período de desaceleração e estágio final, ou período de reação lenta (SILVA, 2000; KADRI; DUVAL, 2002; MOSTAFA; BROWN, 2005; QUARCIONI, 2008).

Mehta e Monteiro (2014) explicam que no estágio inicial ocorre o primeiro pico de liberação de calor, as primeiras reações de dissolução de sulfatos alcalinos, liberação de íons (K⁺, Na⁺, Ca²⁺ e SO²⁻₄) e dissolução do sulfato de cálcio. Também nesse estágio inicia-se a dissolução das fases anidras.

De acordo com Quarcioni (2008), o período de indução caracteriza-se pelo aumento na concentração de Ca²⁺, K⁺, SO²⁻₄ e OH⁻. No período de aceleração ocorre a rápida formação de C-S-H, sendo este o principal composto formado, por ser o principal responsável pela resistência mecânica. A partir desse período ocorre o fenômeno da pega, no qual o C₃S hidrata rapidamente, sendo esta etapa a que corresponde ao máximo do calor liberado. A taxa de hidratação é controlada pela

formação do C-S-H, e é nesse período que ocorre a precipitação de etringita. No período de desaceleração, ocorre redução da taxa de elevação do calor, as reações lentas continuam e originam C-S-H e CH. Por sua vez, o estágio final é associado à hidratação da ferrita (Fe₂O₃) e do monossulfoaluminato de cálcio, a partir da reação do trissulfoaluminato de cálcio (AFt) com o C₃A e o C₄AF.

Segundo Scrivener (1989, apud SILVA, 2000), quanto mais fino o cimento, mais rápida a reação de hidratação. Desse fato também pode-se concluir que o tamanho do grão tem importância no controle de qualidade dos cimentos, tendo em vista que existe uma relação entre a dimensão da partícula e o tempo de hidratação (grau de hidratação). A hidratação também é influenciada pela quantidade de água empregada na mistura. Com uma relação água/aglomerante baixa, os produtos sólidos gerados possuem baixa solubilidade, boa resistência mecânica e estabilidade de volume (TAYLOR, 1998 apud QUARCIONI, 2008).

A etringita (C₆AS₃H₃₂) é um produto das reações de hidratação do cimento, a partir da reação do C₃A e do C₄AF com o gesso e é o primeiro mineral a se cristalizar, não causando qualquer manifestação patológica. Em alguns estudos, para diferenciála da DEF, chama-se de etringita primária (SCHOVANZ, 2019). A etringita se torna instável e é convertida em monossulfato na hidratação de C₃A e C₄AF, quando a concentração de íons aluminato se eleva (TAYLOR *et al.*, 2002; ODLER, 2007).

Nos cimentos que contém até 3% de gipsita, a precipitação da etringita contribui para a pega e resistência inicial (MAIA, 2008). É importante salientar que nas reações de hidratação do cimento, a gipsita é responsável pela redução da velocidade de endurecimento (DIAMOND, 1996 apud QUARCIONI, 2008).

Após a etringita, o próximo mineral a se formar é a portlandita. Mehta e Monteiro (2014) explicam que o C-S-H é formado pela hidratação dos silicatos - C₃S e βC₂S. Os silicatos formados possuem estruturas semelhantes, mas variam o teor de água combinada e a relação cálcio/sílica. A relação água/cimento, o tempo de hidratação e a temperatura ocasionam variação na composição química dos diferentes C-S-H. Os autores expressam as reações de formação do C-S-H segundo as Equações 01 e 02:

$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$	(01)	
$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$	(02)	

A resistência final após a hidratação de um cimento Portland com alto teor de C₃S é menor do que a do cimento com alto teor de C₂S. Em contrapartida, um cimento com alto teor de C₂S será mais durável em ambientes ácidos e sulfatados, se comparado aos cimentos com alta proporção de C₃S (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Quarcioni (2008) explica que o C₂S hidrata mais rapidamente em presença de C₃S devido às alterações de concentração de íons hidroxila (OH⁻). São condições que também afetam a hidratação do C₃A e do C₄AF.

Conforme mencionado anteriormente, a etringita é um dos primeiros compostos a cristalizar durante a hidratação do cimento. Neste momento a pasta de cimento não se encontra endurecida e nenhum dano é causado à matriz cimentícia. Contudo, se durante a hidratação do cimento a temperatura for superior a 65°C, a etringita se torna instável, não cristalizando. Após o endurecimento do concreto, e ao longo do tempo, a etringita vem a cristalizar de forma tardia, quando o concreto resfria, e os sulfatos existentes na matriz passam a reagir quimicamente para a sua ocorrência (GODART, 2017).

2.1.2 Tipos de cimento Portland

Conforme já citado anteriormente, a norma brasileira que define as características dos cimentos é a NBR 16697 (ABNT, 2018). Os diferentes tipos de cimento existentes possuem características para os mais distintos empregos em concretos e argamassas. Nesse aspecto, as principais diferenças nos cimentos estão relacionadas ao tipo e ao teor de adição empregado, bem como à finura. A Tabela 4, adaptada da referida norma, apresenta os teores de adição presentes nos cimentos brasileiros.

3	Adições			
Tipos de cimento	Cinza	Escória de	Fíler	
	volante	alto forno	calcário	
CP I		0 – 5		
CP I – S	0	0	6 - 10	
CP II – E	0	6 – 34	0 - 15	
CP II – Z	6 – 14	0	0 - 15	
CP II – F	0	0	11 - 25	
CP III	0	35 - 75	0 - 10	
CP IV	15 – 50	0	0 - 10	
CP V-ARI	0	0	0 - 10	
CPB Estrutural	-	-	0 - 25	
CPB Não estrutural	-	-	26 - 50	

Tabela 3 – Adições presentes nos cimentos brasileiros

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (ABNT, 2018).

Dentre os cimentos brasileiros, o CP V-ARI tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias de aplicação. De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), a resistência final do CP V-ARI deve ser atingida aos 7 dias. Paula (2009) explica que o desenvolvimento da alta resistência inicial é alcançado pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer e pela moagem mais fina do clínquer.

Os cimentos que contém adições pozolânicas são os mais indicados para situações onde há maior suscetibilidade de perda de durabilidade das estruturas de concreto. Os cimentos compostos, CP II-Z e CP II-F, caracterizam-se por possuírem na sua composição material carbonático (11-25%) e pozolânico (6-14%), respectivamente. Já os cimentos CP III e CP IV possuem elevados teores de escória e cinza volante, respectivamente, sendo indicados especialmente para situações em que há suscetibilidade de elevação da temperatura durante a hidratação (concreto massa, por exemplo) ou ataques químicos.

Um dos compostos do cimento Portland hidratado é o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), que possui alta solubilidade e é quimicamente instável. O principal papel das adições pozolânicas é, justamente reagir com o hidróxido de cálcio e formar produtos similares ao C-S-H, levando a um refinamento dos poros, reduzindo a permeabilidade e aumentando a durabilidade das estruturas de concreto (TAYLOR, 1998).

Além de interferir na durabilidade, as adições presentes no cimento também interferem no ganho de resistência ao longo do tempo. Quanto maior o teor de adição,

menor é a velocidade de hidratação. O gráfico apresentado na Figura 3 apresenta a evolução da hidratação dos diferentes tipos de cimento.



Figura 3 – Evolução da hidratação dos diferentes tipos de cimento.

De acordo com Neville (2015), a velocidade de endurecimento não deve ser confundida com a velocidade de pega, pois o cimento CP I e o de alta resistência inicial têm tempos de início de pega semelhantes. A velocidade do ganho de resistência está relacionada ao teor mais elevado de C₃S e à finura do clínquer.

As reações de hidratação do cimento são exotérmicas, ou seja, os compostos do cimento reagem com a água com a finalidade de adquirir estados de baixa energia, e a energia é liberada em forma de calor (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Neville (2015) cita que um cimento com baixo calor de hidratação deve ser utilizado quando for empregada uma grande massa de concreto ou quando houver alto consumo de cimento, pois nessas situações há maior probabilidade de elevação da temperatura, podendo haver fissuração.

A presença de SO₃ no cimento Portland é inevitável, uma vez que a adição de gipsita é imprescindível para que não ocorra a pega instantânea do clínquer (TAYLOR *et al.*, 2001). Nos cimentos resistentes à sulfatos (RS), de acordo com a normalização brasileira, há limitação do teor de SO₃, que deve ser de no máximo 4,5% (NBR 16697, 2018). Além disso, para receberem a classificação RS, esses cimentos precisam ser ensaiados de acordo com a NBR 13583 (ABNT, 2014), que estabelece as expansões

individuais de cada corpo de prova, bem como as expansões médias em solução agressiva e em água saturada com cal devida à ação de sulfatos.

Outra característica dos cimentos RS é que a quantidade de C₃A deve ser de até 8%. De acordo com Crammond (2003), a quantidade restrita de C₃A, contribui para a redução de danos causados pelo ataque por sulfatos, contudo tal medida não impede a formação da taumasita (CaSiO₃.CaCO₃.CaSO₄.15H₂O); nesse caso o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) é atacado e não as fases do aluminato.

De acordo com Trentin (2020), os cimentos resistentes a sulfatos tendem a apresentar maior durabilidade, quando comparados aos cimentos tradicionalmente utilizados e têm maior resistência em ambientes agressivos, como água do mar e esgotos.

Os cimentos Portland podem ser considerados resistentes aos sulfatos, desde que atendam a pelo menos um dos seguintes critérios (NBR 16697, 2018):

 Teor de aluminato tricálcico (C₃A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente;

- Cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 75% de escória granulada de alto-forno, em massa;

- Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;

- Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

Ainda, de acordo a NBR 16697 (ABNT, 2018) para que o cimento CP V-ARI seja resistente a sulfatos, podem ser adicionados escória granulada de alto-forno ou materiais pozolânicos.

O calor de hidratação dos cimentos resistentes a sulfatos é próximo do cimento com baixo calor de hidratação. Apesar disso, devido à composição especial de matérias-primas, o cimento resistente a sulfatos tem maior custo, devendo ser utilizado somente em casos de real necessidade (NEVILLE; BROOKS, 2013; TRENTIN, 2020).

Quanto ao cimento Portland pozolânico, a adição de cinza volante se caracteriza por ser responsável pela capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, em temperatura ambiente e na presença de água, formando compostos com propriedades hidráulicas. Métodos indiretos de quantificar

o potencial reativo destas adições minerais são comumente utilizados por meio do índice de atividade pozolânica (IAP) (CAMACHO *et al.,* 2018).

De acordo com Cezar (2011) a cinza volante proporciona a formação de compostos hidratados mais homogêneos com baixo teor de C-S-H e CH, resultando em uma pasta mais densa, diminuindo a permeabilidade da mistura.

As adições pozolânicas são constituídas por material silicoso ou sílicoaluminoso que, quando finamente divididos e na presença de umidade, tem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) para formar compostos com propriedades cimentantes (C-S-H).

As adições consideradas fíler atuam na matriz cimentícia, por meio da criação de pontos de nucleação e do empacotamento granulométrico para a hidratação do cimento (DAL MOLIN, 2011; MIRANDA, 2020).

2.2 Reações expansivas no concreto

A formação de produtos expansivos no concreto no estado endurecido pode contribuir para a ocorrência de danos nos elementos estruturais. Quando ocorre expansão, se o aumento das tensões internas for contínuo e alcançar grandes proporções, resulta em deformações, deslocamentos em diferentes partes da estrutura e fissuração.

As principais reações expansivas que ocorrem no concreto são a RAS e o ataque por sulfatos (externo ou interno), ataque por sulfetos e ataques combinados. Dentre as reações expansivas citadas, ocorrem com maior frequência a RAS e o ataque por sulfatos.

A RAA, em termos gerais, envolve alguns minerais reativos, presentes nos agregados e hidróxidos alcalinos, normalmente provenientes do cimento. A partir da reação, são formados produtos higroscópicos que, na presença de umidade, expandem, geram fissurações, deslocamentos, e comprometimento das estruturas (HASPARYK, 1999; TIECHER, 2006).

Segundo Tiecher (2010), qualquer silicato que apresente deformações e/ou alterações pode reagir, pois a sílica presente nos minerais que constituem os agregados é que reage com os álcalis. Neste sentido, os agregados contendo quartzo deformado ou microcristalino são mais suscetíveis à reação com os hidróxidos

alcalinos. A norma brasileira para estudo da RAS é a NBR 15577, dividida em 6 partes. A parte 4 apresenta a metodologia para realização do ensaio acelerado em barras de argamassa (NBR 15577-4, ABNT, 2018), e a parte 6 (NBR 15577-6, ABNT, 2009) a metodologia para o ensaio em prismas de concreto; ambas têm por objetivo determinar se um agregado é, ou não, potencialmente álcali reativo.

A RAS tem sido registrada desde 1930, quando foi identificada (HOBBS, 1988). Os principais registros de RAS são de obras hidráulicas, tais como pontes e barragens, porém existem registros do problema, inclusive, em fundações de edifícios (TORRES; ANDRADE, 2016; HASPARYK; KUPERMAN, 2019).

A RAA e a DEF são processos endógenos que, embora diferentes, ocasionam fissuras, que geram redução das propriedades mecânicas dos concretos afetados (MARTIN *et al.*, 2012). Taylor *et al.* (2001) explicam que na RAS o gel oriundo da reação espalha-se pela matriz e, ao longo do tempo, por ser higroscópico, causa tensões internas levando à fissuração, enquanto a DEF é resultante de uma expansão uniforme da própria pasta de cimento.

A fissuração contribui para enfraquecer o material e facilitar a ocorrência de outras manifestações patológicas. Martin *et al.* (2016) explica que os álcalis do cimento reagem e garantem um pH interno propício para a RAA, favorecendo a precipitação da etringita e, portanto, a expansão por DEF (MARTIN *et al.*, 2016).

Em relação à DEF, a presença de álcalis tenderá a diminuir a formação da etringita primária e, assim, liberará sulfatos na solução, que são adsorvidos pelo C-S-H e, se houverem condições propícias, levarão à ocorrência de DEF (WIGUM *et al.*, 2006; MARTIN *et al.*, 2012; GODART *et al.*, 2016).

Alguns estudos mostram casos combinados de RAS e DEF, como por exemplo Torres e Andrade (2016), Hasparyk *et al.* (2012; 2016), Martin *et al.* (2017), Ma *et al.* (2017) e Zhang *et al.* (2017).

O padrão de fissuração da RAS e da DEF é bem semelhante. A Figura 4(a) mostra um bloco de concreto fissurado por RAA (LIMA, 2009) e a Figura 4(b) outro bloco, porém fissurado por DEF (AGUADO *et al.*, 1993 apud LIMA, 2009).



Fonte: a) Lima (2009); b) Aguado et al. (1993) apud Lima (2009)

Quando comparada a outros fenômenos patológicos, a reação álcali-agregado pode ter variações na velocidade da reação, dependendo do tipo de agregado envolvido, principalmente as reações que envolvem silicatos. Ou seja, as manifestações do problema demoram a aparecer.

De acordo com Hasparyk (2005), as estruturas afetadas pela RAA podem levar vários anos para apresentar problemas. Segundo a pesquisadora, em um primeiro estágio da reação álcali-silicato a resistência à compressão pode crescer e o módulo de elasticidade cair e, posteriormente, ambos apresentam quedas. A velocidade de ocorrência da DEF é mais acelerada, pois têm sido registrados problemas estruturais precocemente (HASPARYK; KUPERMAN, 2019). Em estudos sobre a DEF realizados em laboratório, Schovanz (2019) observou deposições de cristais de etringita tardia aos 3 meses, com expansões da ordem de 1% aos 9 meses.

O ataque por sulfatos pode se manifestar de várias formas, pois a origem dos íons sulfato pode ser tanto externa, quando os sulfatos provenientes do meio penetram na estrutura, quanto interna, que ocorre devido à liberação tardia de sulfatos presentes na própria matriz, que podem ser provenientes de agregados ou de fases do cimento Portland. De acordo com Brown (2002) as manifestações do ataque por sulfatos podem ser decorrentes de:

- formação da etringita e da gipsita;
- cristalização dos sais de sulfato;
- ataque interno, associado à formação de etringita tardia (DEF);

- formação de taumasita.

Sulfatos de origem externa penetram na matriz cimentícia e ocasionam a formação de etringita e de gipsita. No interior da pasta de cimento, os sulfatos reagem com o cálcio para formar gipsita e com cálcio e alumínio para formar etringita (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A cristalização de sais, citada por Brown (2002), é uma forma específica de ataque, não sendo relacionada às reações químicas entre sulfatos e compostos da pasta de cimento hidratado. Souza (2006) explica que os sais de sulfato em meio aquoso adentram os materiais cimentícios por capilaridade, difusão ou permeabilidade. Quando a água evapora, os sulfatos ficam cristalizados nos poros ocupando maior volume do que quando estavam dissolvidos no meio líquido, causando expansão.

De acordo com Crammond (2003), a formação da taumasita é resultado do ataque simultâneo de sulfatos e carbonatos, associado a temperaturas mais baixas, da ordem de 5 a 15 °C. Os cimentos resistentes a sulfatos têm menores teores de aluminatos, porém, essa característica não previne a formação da taumasita, tendo em vista que o ataque ocorre preponderantemente no C-S-H, ao invés de ocorrer nas fases aluminato. Batista (2013) identificou fases sulfatadas, incluindo a taumasita, em concretos de usinas hidrelétricas brasileiras deterioradas por ataques expansivos.

A DEF, conforme já relatado, acontece quando a formação da etringita 'primária' é prejudicada por se tornar instável, isso ocorre devido ao aumento da temperatura durante o início da hidratação, se a temperatura atingir patamares da ordem de 65°C, quando a matriz cimentícia já se encontra endurecida. Havendo redução da temperatura e aluminatos disponíveis forma-se a DEF (COLLEPARDI, 2003; MELO, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014; MYURAN *et al.*, 2015; AL SHAMAA *et al.*, 2016; GODART, 2017). No princípio a ocorrência da DEF se dá no contorno dos agregados (zona de transição), posteriormente disseminando-se pela matriz. Taylor *et al.* (2001) explicam, ainda, que pode haver recristalização da etringita tardia, também chamada de DEF microcristalina.

O fenômeno expansivo da DEF será abordado com maior profundidade no item 2.3.
2.2.1 Agentes mitigadores das reações expansivas

De modo geral, os cimentos contendo adições pozolânicas propiciam um aumento da durabilidade do concreto, independente da manifestação patológica analisada, ou seja, em relação ao ataque externo de sulfatos, à RAS, à penetração de íons cloreto e à carbonatação (FILHO *et al.*, 2015).

Hasparyk, em 1999, já mostrava o potencial mitigador de adições pozolânicas no combate das expansões da RAS gerada por quartzito e basalto reativos. As adições estudadas pela autora foram a cinza de casca de arroz e a sílica ativa. Nessa mesma linha, no estudo de Tiecher (2006), ficou evidente que o único cimento capaz de evitar a ocorrência da RAS foi o do tipo CP IV, especificamente com cinza volante, dentre os cimentos que foram avaliados em sua pesquisa. Outros estudos também mostram o potencial do CP IV como inibidor de manifestações patológicas. Raisdorfer (2015) mostrou sua eficiência no ataque por cloretos e carbonatação. O efeito do CP IV na inibição da carbonatação dos concretos e, por consequência, a corrosão das armaduras também foi apresentado por Pauletti (2009).

Diferentemente da DEF, a RAA é comprovadamente mitigada por meio de adições pozolânicas. O estudo realizado por Moffatt *et al.* (2016) reforça o potencial da cinza volante em mitigar os efeitos da RAS, tendo sido utilizada em estudo de recuperação de uma barragem no Canadá. Habuchi *et al.* (2016) estudaram a escória de alto forno para prevenção de expansão por RAS em concreto autoadensável, produzido com água do mar. Águas *et al.* (2016) avaliaram a expansão em amostras de argamassa com substituição de 8% do cimento por sílica ativa, evidenciando sua capacidade de mitigação da RAA.

Thomas *et al.* (2008) investigaram a expansão em pilares de concreto e identificaram DEF como a única causa para a deterioração. Já em outras, verificou-se que tanto a DEF quanto a RAS contribuíram para o dano aparente. Dos pilares estudados, apenas os executados com cimento contendo cinza volante não aparentavam deterioração.

Tosun (2006) verificou que quanto mais fino o cimento maior a expansão por DEF nas primeiras idades, devido à rápida formação de etringita na superfície das partículas de cimento não hidratadas, o que também corrobora com a ideia de maior suscetibilidade à DEF de misturas produzidas com CP V-ARI, que é um tipo de cimento mais fino que os demais. Em idades avançadas, a taxa de formação da etringita tende a desacelerar devido à dificuldade de penetração da água em regiões internas, onde o cimento não se encontra hidratado.

Segundo Amine *et al.* (2017) teores de 15% de adição de cinza volante já são eficientes para controlar a expansão por DEF à longo prazo. Resultado semelhante foi obtido por Zhang *et al.* (2002). Nos cimentos brasileiros constituídos por cinza volante, CP IV e CP II-Z, os teores mínimos prescritos pela NBR 16697 (ABNT, 2018) para essa adição são de 15% e 6%, respectivamente, enquanto os valores máximos são de, respectivamente, 50% e 14%.

No que diz respeito à RAA, e mais especificamente à RAS, está bem claro o procedimento a ser empregado para o combate às suas expansões. A própria norma NBR 15577 (ABNT, 2018) apresenta orientações específicas, enfatizando que cada agregado possuirá um comportamento distinto, devendo ser testados em laboratório as melhores adições e teores para emprego e mitigação da RAS.

No estudo de Miranda (2020), avaliou-se a utilização de nanosílica em corpos de prova de argamassa, na idade de 270 dias. Segundo a autora, a adição de nanosílica não causou alterações nas propriedades mecânicas em relação à DEF, porém, nos traços com nanoadição não se observou DEF na microestrutura, diferente dos traços sem adição. A propriedade de expansão apresentou resultados menores em relação aos traços sem adição, assim como a propriedade resistência à compressão, na qual se observou resultados melhores. O módulo de elasticidade foi o parâmetro que mais se mostrou sensível aos efeitos da DEF, com algumas reduções nas idades finais do estudo, e de forma mais pronunciada no traço sem a nanosílica.

Em relação à DEF não há consenso a respeito da eficiência das adições e não existe método de ensaio normalizado para avaliá-la (conforme será abordado em 2.3.2), quanto menos critérios para definir precisamente o melhor agente mitigador das expansões e deterioração do concreto.

2.3 Formação da Etringita Tardia

Para Taylor *et al.* (2001), a DEF pode ser definida como a formação da etringita em material cimentício por um processo que ocorre após o endurecimento completo da matriz, quando o sulfato não provém do meio externo. A Figura 5, comumente empregada pelos pesquisadores da área, e adaptada de Taylor *et al.* (2001), mostra esquematicamente o processo de formação da DEF em matrizes cimentícias. Conforme já mencionado, a DEF inicia-se na interface entre o agregado e a pasta de cimento, promovendo microfissuras. Nessas fissuras a etringita e o CH recristalizam, porém, em um primeiro momento, isso não acarreta expansão significativa. Contudo, se estruturas que desenvolveram DEF forem mantidas em local úmido e com temperatura elevada, expansões maiores podem ocorrer (MARTIN *et al.*, 2012; KCHAKECH *et al.*, 2016). A Figura 6 apresenta uma micrografia da interface pasta/agregado de uma matriz afetada pela DEF.



Figura 5 - Expansão ocasionada pela DEF

Fonte: adaptado de TAYLOR; FAMY; SCRIVENER (2001)



Figura 6 - Presença de DEF na interface entre a pasta de cimento e o agregado

Fonte: retirado de RASHIDI et al. (2017)

De acordo com Collepardi (2003), a formação da etringita tardia não acontece de forma homogênea na matriz cimentícia, ou seja, ocorrem núcleos de formação, que ficam isolados uns dos outros em um primeiro estágio. Com a evolução e crescimento dos cristais há tendência de que a DEF se espalhe de maneira generalizada, conforme foi observado por Schovanz (2019) (Figura 7).

Figura 7 – DEF em concretos com cimento CP V-ARI, observada através de análises por MEV, aos 9 meses



Fonte: cedido por Schovanz (2019)

A ocorrência da DEF, relatada na maior parte da literatura, e a ser tratada nesse trabalho, está relacionada essencialmente à elevação da temperatura durante a hidratação do cimento. Por isso, a sua ocorrência é mais comum em elementos de concreto massa, que atingem elevadas temperaturas em decorrência do calor de hidratação gerado, ou elementos pré-fabricados, que são submetidos à cura térmica.

2.3.1 Fatores intervenientes para ocorrência da DEF

A DEF pode ser identificada no concreto pela incidência de fissuração em a nível macro. A principal diferença em relação à RAA é a ausência do gel característico que se deposita ao redor dos agregados. A olho nu, em concretos acometidos por DEF, é possível observar pontos brancos disseminados na matriz, principalmente em poros, fissuras e interface pasta/agregado, relacionados à tal formação (MIRANDA, 2020). Em suma, a Figura 8 mostra os principais fatores necessários para que a DEF se desenvolva em matrizes cimentícias.



Figura 8 - Fatores necessários para expansão e fissuração por DEF

Fonte: Adaptado de MEHTA; MONTEIRO (2014)

A literatura cita que quanto menor o tamanho do agregado, maior será a expansão (SHYMADA *et al.,* 2005; TOSUN, 2006; FU *et al.,* 2006; BRYANT, 2011; AL SHAMAA *et al.,* 2016).

Também com as características do cimento, segundo Mehta e Monteiro (2014), altos teores de sulfatos (4-5% de SO₃) devem ser limitados para inibir a DEF.

Algumas características do cimento são apontadas como fatores influentes para a ocorrência da DEF, tendo em vista que favorecem a sua expansão. Teores de SO₃ superiores a 2,6%, C₃A entre 7 e 11% e álcalis equivalentes superiores a 3 kg/m³ (LCPC, 2007) são exemplos destes fatores. Outras características dos cimentos que podem influenciar na DEF são elevados teores de álcalis e de MgO.

Em relação às características físicas do cimento, há interferência da finura do cimento (SILVA *et al.* 2018). Para Melo (2010) a finura (área de superfície específica de 500 m²/kg) afeta a expansão porque influi sobre a porosidade da microestrutura da pasta nas primeiras e nas idades tardias.

Além dessas características, Kirchheim *et al.* (2018) mostram que a forma do cristal de C₃A influencia a formação da etringita e, por consequência, a ocorrência da DEF. Segundo os pesquisadores, o C₃A de forma ortorrômbica, na presença de gipsita, é muito mais reativo nas primeiras idades do que o aluminato de forma cúbica.

Para Taylor *et al.* (2001) a probabilidade de ocorrência da DEF pode ser correlacionada às quantidades de sulfato e alumínio presentes no cimento por meio da relação SO₃/Al₂O₃. A fase sulfoaluminato não irá se formar se houver muito sulfato e nenhum alumínio ou, se em outro extremo, nenhum sulfato e muito alumínio (MELO *et al.,* 2011). Portanto, se houver a presença de muito SO₃ e pouco Al₂O₃, a fase sulfoaluminato presente ao final do tratamento térmico será a etringita, e, do contrário, será o monossulfato. Porém, dependerá do tipo de cimento e das condições de cura e exposição do concreto, podendo existir uma relação péssima de SO₃/Al₂O₃.

Vários autores citam que a correlação das quantidades de sulfato e alumínio presentes, por meio da relação SO₃/Al₂O₃ deve estar acima de 0,5% (TOSUN; BARADAN, 2010; SCHOVANZ, 2019).

Alguns autores também empregam a relação SO₄-²/Al₂O₃ como parâmetro (BATIC *et al.,* 2000; GRATTAN-BELLEW, 2000; BAUER *et al.,* 2006; BRYANT, 2011). Bauer *et al.* (2006) citam que cimentos com uma relação SO₃/Al₂O₃ menor de 2% não são suscetíveis ao ataque por etringita tardia. Acima desse valor os riscos aumentam da DEF.

Ainda em relação ao cimento, a presença de álcalis diminui a estabilidade da etringita, reduzindo a formação de etringita primária e liberando sulfatos para a solução dos poros (FERREIRA, 2013). Por outro lado, no concreto endurecido, de acordo com Martin *et al.* (2012), um alto teor de álcalis tende a dificultar, ou até evitar a ocorrência de DEF. O álcali inibe a formação de etringita, deixando o sulfato no C-

S-H, no monossulfato ou na solução do poro. Quando ocorre armazenamento do cimento em água, o pH da solução intersticial diminui devido à lixiviação do sulfato do C-S-H e a consequente substituição do monossulfato por etringita. Já em ataques combinados DEF+RAA (MARTIN *et al.,* 2016; BRONHOLO, 2020), a partir do momento que a RAA ocorre, haverá redução da concentração de álcalis na solução dos poros, predispondo à formação da etringita tardia.

Ao realizar ensaios em corpos de prova de argamassa, Bryant (2011) constatou que menores relações água/cimento ocasionam um aumento do potencial para a ocorrência da DEF, possivelmente devido à maior quantidade de cimento (SHYMADA *et al.*, 2005; BRYANT, 2011).

Algumas pesquisas também indicam que o pH da solução contendo sulfatos influencia na intensidade da agressividade do ataque. Alguns pesquisadores analisaram como se dá essa influência e os resultados indicaram que uma redução no pH também reduz a resistência ao ataque por sulfatos, aumentando a expansão do concreto (FERRARIS et al., 1997; SCHMALZ, 2018).

Para Irassar (2009) o pH é considerado um fator importante nos ensaios de resistência a sulfatos, uma vez que pode alterar as fases predominantes de ataque, especialmente a formação de gesso a partir do CH. À medida que todo o CH é consumido, o C-S-H se decompõe na tentativa de elevar o pH da solução dos poros e, consequentemente, tem-se a perda de coesão e de rigidez da matriz cimentícia.

2.3.2 Consequências da DEF

A Figura 9 apresenta a barragem de Fagilde, com fissuração intensa, devido à presença de DEF.



Figura 9 – Fissuração intensa – Barragem de Fagilde - Portugal.

Fonte: Fernandes et al. (2008) apud Hasparyk; Kuperman (2019)

Microfissuras ocasionadas por níveis moderados de expansão são suficientes para ocasionar redução significativa no módulo de elasticidade (NOEL *et al.* 2016). Esta tem sido a propriedade mais afetada, segundo relatos da literatura.

Segundo Noel *et al.* (2016), nas estruturas de concreto armado e nas descontinuidades das estruturas, as fissuras podem se apresentar de forma orientada pelos esforços internos. Ao longo do tempo, com o aumento da fissuração, há redução das propriedades mecânicas, podendo causar danos estruturais.

Quanto aos aspectos físicos das estruturas afetadas pela DEF, as expansões podem gerar deslocamentos e lascamentos, de modo semelhante ao que ocorre nas estruturas afetadas pela RAS. Godart *et al.* (2016) mostram a fissuração generalizada ocasionada pela DEF na estrutura de um viaduto (Figura 10), construído em 1995, com vão de 44,95 m e largura de 13 m.



Figura 10 – Seções do viaduto afetado pela DEF

Fonte: Godart et al. (2016)

Os danos ocasionados pela DEF são prejudiciais às várias propriedades do concreto, bem como ao desempenho das estruturas ao longo do tempo. As propriedades mecânicas são as mais afetadas, especialmente a rigidez, segundo Sanchez *et al.* (2015).

Em estudo realizado por Giannini *et al.* (2018) o módulo de elasticidade também se apresentou muito afetado pela DEF, havendo redução de até 75%. Segundo os autores, embora a resistência à compressão seja um parâmetro significativo para avaliar a capacidade de suporte da estrutura, o módulo de elasticidade é o parâmetro mais adequado para caracterizar o dano por DEF. Sanchez *et al.* (2018) verificaram redução de até 50% no módulo de elasticidade para diferentes níveis de expansão avaliados. Já Schovanz (2019) observou redução de 82% no módulo de elasticidade em concretos produzidos com cimento CP V-ARI, em laboratório, e afetados pela DEF, e 10% de redução em concretos produzidos com cimento CP IV.

De modo geral, a resistência à compressão é uma propriedade que se mostra menos afetada por reações expansivas, como foi observado por Hasparyk (2005) em concretos com a RAS, especificamente. No entanto, alguns estudos tem mostrado que no caso da DEF, a resistência à compressão também pode ser afetada, especialmente, quando os níveis de expansão são da ordem de 0,20 a 0,30%; segundo estudos realizados por Martin *et al.* (2012), observou-se redução de até 80% na resistência à compressão.

No estudo de Schovanz (2019) também foram observadas quedas de resistência à compressão a partir dos 28 dias (CP V-ARI) e 56 dias (CP IV). No trabalho, ao final de 9 meses, as reduções chegaram a 63,3% e 5,83%, respectivamente. De acordo com Zhang *et al.* (2019), análises microscópicas podem auxiliar num diagnóstico mais precoce, indicando a presença de DEF antes que o material afetado apresente reduções significativas nas propriedades mecânicas e, em especial, na resistência à compressão.

Bouzabata *et al.* (2012) avaliaram a DEF por meio de argamassas e verificaram redução de 40% na resistência à compressão e, até a idade de 180 dias, ao mesmo tempo em que se verificava um grande aumento nos percentuais de expansão.

Segundo Monteiro e Kurtis (2003), uma das principais consequências das deformações expansivas, em geral, é a queda da resistência à tração, pois esta propriedade também é influenciada pela fissuração. A Figura 11 mostra os resultados

obtidos por Sanchez et al. (2018), os quais relacionam a resistência à tração às expansões causadas pela DEF.



Figura 11 – Resultados obtidos para resistência à tração

Tx – Areia polimítica; NM – cascalho polimítico; HP – calcário de alta pureza; Lav – natural derivado de granito. Fonte: Sanchez et al. (2018)

Nota-se que, para níveis de fissuração da ordem de 0,30%, na idade de 250 dias, a queda na resistência à tração foi expressiva, chegando a 60%, em corpos de prova de concreto. Os autores realizaram a pesquisa em corpos de prova de concreto, com diferentes materiais e propriedades avaliadas, sendo FT – ciclos de congelamento e descongelamento.

Já em outros estudos realizados por Sanchez *et al.* (2018) e Thiebaut *et al.* (2018) em estruturas afetadas pela DEF, a redução da resistência à tração atingiu valores da ordem de 65%. Nessa mesma linha, Schovanz (2019), ao realizar estudos em DEF com dois tipos de cimento, verificou redução média da resistência à tração de 59% aos 9 meses de ensaio empregando-se CP V-ARI; na mesma idade a queda foi reduzida, e de 17% quando empregado o CP IV.

O teste de danos de rigidez (SDT – *Stiffness Damage Test*) tem sido empregado para avaliar os índices de danos de rigidez (PDI e SDI – *Plastic Deformation Index* e *Stifness Damage Index*, respectivamente) de concretos afetados pela DEF (MARTIN *et al.*, 2016; SANCHEZ *et al.*, 2018; SCHOVANZ *et al.*, 2020). Os resultados de SDI fornecem informações sobre a magnitude das trincas no interior dos materiais, pois representam a relação entre a energia consumida para selar as rachaduras na amostra de concreto e a energia total implantada no sistema (ALLARD *et al.*, 2016).

Em estudo realizado por Martin *et al.* (2016), os resultados obtidos nos ensaios de SDT, obtendo-se os parâmetros PDI e SDI, foram utilizados para avaliar as condições de um elemento estrutural afetado pelo ataque combinado de DEF e RAS; os resultados se mostraram eficazes para uma estimativa quantitativa do diagnóstico de expansão do concreto.

Schovanz (2019) apresentou os resultados de SDI para concretos produzidos com CP V-ARI e CP IV. No estudo da DEF, conforme pode ser visualizado na Figura 12, os resultados de SDI são muito superiores para o CP V-ARI, indicando maiores deformações plásticas em decorrência do ataque. Porém, a pesquisadora salienta que o ensaio não se mostrou sensível o suficiente para detectar o avanço da DEF ao longo do tempo, apresentando resultados com pouca variação até completar o nono mês. Para o concreto com CP IV os valores de SDI e PDI ficaram bem abaixo dos obtidos para o CP V-ARI, e com pouca variação no tempo.



Figura 12 – Resultados de SDI para concretos produzidos com CP V-ARI e CP IV

2.3.3 Métodos de laboratório para provocar DEF

Para que se estude DEF em laboratório, é necessário abordar fatores contribuintes e condições propícias para a sua ocorrência. O planejamento experimental é extremamente importante, e envolve materiais adequados, condições de cura e exposição coerentes.

É importante enfatizar que não há normatização para a avaliação de DEF em concretos produzidos em laboratório; no entanto, muitas pesquisas vêm sendo realizadas para o estudo dessa patologia e dos fatores intervenientes. Schovanz (2019) fez um levantamento da literatura no que diz respeito às metodologias empregadas por diversos pesquisadores no âmbito de argamassas e concretos. Esse levantamento mostra que existem diferenças nos métodos de aquecimento, tempo de permanência dos corpos de prova no ambiente de acondicionamento, taxas de aquecimento e resfriamento, bem como ambiente de exposição adotados.

Os estudos relacionados à DEF em laboratório, encontrados na literatura, empregaram, em geral, temperatura inicial de cura superior a 70° C (LCPC, 2007; AUBERT *et al.*, 2009; SCHOVANZ, 2019), sendo a máxima utilizada 95°C (FU, 1996; BARBARULO *et al.*, 2005; ADAMOPOULOU *et al.*, 2011; DAYARATHNE *et al.*, 2013; AL SHAMAA *et al.*, 2016; ASAMOTO *et al.*, 2017; RASHIDI *et al.*, 2017).

Vários trabalhos encontrados na literatura foram realizados por meio de corpos de prova de argamassa. Alguns detalhes dos diversos programas experimentais são descritos a seguir:

- No estudo de Adamopoulou *et al.* (2011) avaliou-se DEF em corpos de prova de argamassa; os corpos de prova foram acondicionados em três soluções diferentes, sendo elas acondicionamento em solução de Ca(OH)₂, a 20±2 °C, por 90 dias, acondicionamento em solução de Ca(OH)₂, a 50±2 °C, por 90 dias e acondicionamento em solução de Na₂SO₄, a 50±2°C, por 90 dias. Os autores concluíram que, na temperatura de 50°C, a DEF ocorreu em concentrações mais altas de Na₂SO₄. Foi possível observar expansões e fissuras visualmente.

- Águas *et al.* (2016) também avaliaram DEF em corpos de prova de argamassa. No estudo os corpos de prova foram mantidos à temperatura de 40±2 °C, imersos em solução de hidróxido de sódio pelo período de 425 dias. As argamassas foram produzidas com teor de substituição de 8 e 12% de cinza de bagaço de canade-açúcar, e 8% de substituição de sílica ativa, além do traço referência, sem substituição. Foi possível verificar que a argamassa com 8% de substituição de sílica ativa não apresentou expansão. A argamassa de referência (0%) e a com teor de substituição de 8 e 12% de cinza de casca de arroz, apresentaram expansões da ordem de 0,20%, 0,35% e 0,19% aos 360 dias de idade.

- Na pesquisa de Al Shamaa *et al.* (2016) (argamassa), os corpos de prova foram imersos inicialmente em água. Foram testadas substituições de 30, 40 e 50% de fíler. A temperatura máxima de aquecimento foi de 80 °C, a qual foi mantida por 3 dias. As expansões máximas observadas foram da ordem de 0,7%, na idade de 1200 dias, para as argamassas com 50% de substituição.

Nos estudos em argamassa, que são o foco da presente pesquisa, a dimensão dos corpos de prova varia, porém a maior parte dos pesquisadores avaliou prismas de dimensão (25 x 25 x 285) mm (FU, 1996; DAYARATHNE *et al.*, 2013; RASHIDI *et al.*, 2017). A duração dos ensaios de laboratório também se mostrou muito distinta entre os estudos.

Os ciclos de secagem e molhagem no estudo da DEF são citados pelo LCPC (2007), o qual não prevê um ciclo inicial, mas cita ciclos de 7 dias, sendo o primeiro em câmara climatizada, à temperatura de 20±2 °C e umidade relativa inferior à 30%, e o segundo refere-se a acondicionamento em água, à temperatura de 20±2 °C. Os referidos ciclos são repetidos duas vezes.

Em relação aos materiais empregados, alguns trabalhos chamam atenção para os agregados, especialmente quando a ideia é avaliar o efeito isolado da DEF, pois para garantir que isso ocorra o agregado empregado para a produção das misturas deve ser inócuo para RAS (MELO, 2010; SCHOVANZ, 2019).

Segundo Ramlochan *et al.* (2004), para que haja a ocorrência de DEF é importante o emprego de cimentos com elevada relação SO₃/Al₂O₃, devendo esta estar próxima a 0,8%. Por sua vez, Zhang *et al.* (2002) relatam que essa relação SO₃/Al₂O₃ precisa ser superior à 0,5%.

De acordo com Day (1992) apud Bauer *et al.* (2006) um parâmetro muito importante para a DEF é a composição do cimento, pois determina se as expansões ocorrerão. A principal influência deriva da relação SO₃/Al₂O₃, sendo que a proporção de sulfato possui um peso maior na determinação do comportamento.

De acordo com Tosun (2006) e Taylor *et al.* (2001), o alto teor de SO₃ e C₃A no cimento e o aumento da relação SO₃/Al₂O₃ são fatores considerados importantes para o ocasionamento da DEF.

De acordo com Tosun (2006) a finura do cimento afeta significativamente a taxa de expansão das argamassas. Nas idades iniciais a finura do cimento propaga a expansão devido a rápida formação de etringita na superfície de partículas de cimento não hidratadas com alta permeabilidade. Em idades posteriores a taxa de formação de DEF tende a desacelerar devido às dificuldades de penetração de água nas regiões mais profundas do cimento não-hidratado.

Se houver o aumento da taxa de Al₂O₃ haverá maior precipitação de monossulfato e, com isso, redução na concentração de sulfato na solução de poro. Na pesquisa realizada por Al Shamaa *et al.* (2016), argamassas foram produzidas com diferentes percentuais e granulometrias de clínquer, e estas diferenças não interferiram na ocorrência de DEF, uma vez que todas apresentaram o problema ao final de 280 dias.

Para a identificação da DEF, os estudos normalmente empregam análise da variação dimensional, resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade, bem como avaliações microestruturais (BRUNETAUD *et al.*, 2008; MELO, 2010; ADAMOPOULOU *et al.*, 2011; BATISTA, 2013; TORRES; ANDRADE, 2016; AL SHAMAA *et al.*, 2016; BEHFARNIA; ROSTAMI, 2017; AMINE *et al.*, 2017; SCHOVANZ, 2019; ALLAHYARI *et al.*, 2020).

Na presente pesquisa foi utilizado a adaptação o método utilizado por Schovanz (2019), para argamassa, denominado método brasileiro, que foi elaborado a partir de outras metodologias (FU, 1996; SANCHEZ *et al.*, 2015; KCHAKECH *et al.*, 2016; GODART, 2017; MARTIN *et al.*, 2017; RASHIDI *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2017; GIANNINI *et al.*, 2018). No estudo foi mantido o período de pré-cura, taxa de elevação de temperatura e permanência em tanques de água (38 °C) até as idades de ensaio; porém, o ensaio foi realizado em argamassa. Também foi adotado o método francês, publicado pelo LCPC (2007), e que contempla dois ciclos de secagem e molhagem, após a cura térmica inicial (essa a ser seguida conforme o método brasileiro), e permanência em tanques de água (21 °C) até as idades de ensaio pré-estabelecidas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa consistiu na avaliação da DEF por meio da análise de argamassas produzidas com quatro tipos diferentes de cimento Portland (CP II-Z, CP II-F, CP IV e CP V-ARI), procedentes de um único fabricante e, portanto, contendo mesmo clínquer. Também foram avaliadas 2 metodologias para estudo do potencial de ocorrência da DEF em laboratório.

A ideia de avaliar DEF através de argamassas não é nova, embora seja uma patologia das estruturas de concreto, conforme abordado no item 2.3.3 deste documento. Considerando-se que a DEF é uma reação que essencialmente ocorre a partir das reações entre compostos hidratados do cimento, é possível estudar o fenômeno por meio de argamassas.

O fluxograma que resume o programa experimental pode ser visualizado na Figura 13.



Figura 13 – Fluxograma do programa experimental

Método brasileiro – Baseado em Schovanz (2019) e Hasparyk *et al.* (2020) Método francês – Baseado em LCPC (2007).

Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

As argamassas produzidas nesta pesquisa foram submetidas a dois diferentes procedimentos de cura e exposição no intuito de induzir a ocorrência da DEF em laboratório e avaliar seu comportamento ao longo do tempo. O primeiro procedimento adotado é brasileiro, desenvolvido para concreto, empregado por Schovanz (2019) e detalhado em Hasparyk *et al.* (2020). No presente estudo este procedimento foi adaptado para avaliar argamassas, ao invés de concretos, as quais foram produzidas com os 4 tipos de cimentos Portland. O segundo método é francês, também foi desenvolvido para concreto, pelo LCPC (2007). Nesta pesquisa o método francês foi empregado para avaliar argamassas produzidas com dois cimentos, CP V-ARI e CP IV.

A ocorrência da DEF nas argamassas foi avaliada durante doze meses pelo método brasileiro, e nove meses pelo método francês.

3.1 Materiais

As argamassas produzidas para o presente estudo empregaram os seguintes materiais:

- Aglomerantes: CP V-ARI, CP IV, CP II-F e CP II-Z, do mesmo fabricante;

- Agregado miúdo: areia de britagem, potencialmente inócua para a RAS;

 Água: proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Passo Fundo/RS;

A escolha dos materiais utilizados na pesquisa baseou-se na revisão de literatura, buscando-se adotar parâmetros que viessem a propiciar condições favoráveis para a ocorrência da DEF.

3.1.1 Aglomerantes

Com o intuito de avaliar se o desenvolvimento da DEF sofre interferência das adições presentes nos cimentos, o estudo contemplou quatro diferentes tipos de cimento: CP V-ARI, CP IV 32, CP II-Z 32 e CP II-F 32.

Considerando-se que o desenvolvimento da DEF em estruturas de concreto é dependente das características do clínquer constituinte do cimento Portland, conforme discutido no item 2.1, os cimentos selecionados no presente estudo foram produzidos

pelo mesmo fabricante, portanto, com clínquer de mesma origem, sendo possível dessa forma avaliar apenas a influência das adições presentes nos cimentos, tomando-se como referência o CP V-ARI, que não possui adições. As tabelas 5, 6 e 7 apresentam as características dos cimentos empregados.

	Tipos de cimento Portland							
Características	CP V-A	١RI	CP II-	CP II-F CP		P II-Z CP IV		V
avaliadas (%)	Resultado	NBR	Resultado	NBR	Resultado	NBR	Resultado	NBR
	obtido	16697	obtido	16697	obtido	16697	obtido	16697
Al ₂ O ₃	5,26		4,55		5,82		8,60	
SiO ₂	19,56		20,41		22,69		30,73	
Fe ₂ O ₃	2,87		2,12		3,07		3,83	
CaO	62,14		59,12		57,33		47,49	
MgO	1,03	≤6,5	1,35	-	1,10	-	1,57	-
SO ₃	2,93	≤4,5	2,52	≤4,5	1,85	≤4,5	0,05	≤4,5
Perda ao fogo	4,28	≤6,5	8,71	≤12,5	6,08	≤8,5	5,13	≤6,5
CaO Livre	0,93		0,74		1,02		0,85	
Resíduo Insolúvel	0,55	≤3,5	5,74	≤7,5	8,72	≤18,5	24,48	-
TiO ₂	0,25		0,26		0,30		0,45	
SrO	0,28		0,28		0,27		0,28	
MnSO₃	0,18		0,04		0,05		0,06	
P ₂ O ₅	0,15		0,13		0,13		0,11	
ZnO	0,01		0,01		0,01		-	
Cr ₂ O ₃	-		-		-		0,01	
CaSO ₄	4,98		4,28		3,15		0,09	
Na ₂ O _{eq}	0,36	-	4,93	-	4,23	-	6,73	-

Tabela 4 – Características químicas dos cimentos utilizados

Fonte: Furnas (2019); NBR 16697 (ABNT, 2018)

	Tipos de cimento Portland							
Características	CP V-ARI		CP II-	٠F	F CP II-Z		CP IV	
avaliadas	Resultado	NBR	Resultado	NBR	Resultado	NBR	Resultado	NBR
	obtido	16697	obtido	16697	obtido	16697	obtido	16697
Expansibilidade em autoclave (%)	-	≤5	0,0	≤5	0,0	≤5	0,0	≤5
Tempo de pega- início (min)	240	≥60	-	≥60	270	≥60	280	≥60
Tempo de pega- fim (min)	280	≤600	-	≤600	340	≤600	380	≤720
Área específica - Blaine (cm ³ /g)	4,250	-	4,050	-	5,110	-	4,450	-
Massa específica/Área específica – Método Blaine(g/cm³)	3,13	-	3,03	-	3,08	-	2,83	-
Água de consistência – Pasta (%)	29,2	-	-	-	29,4	-	30,8	-
Calor de hidratação (J/g)) (40 h)	308,5	≤270	241,5	≤270	245,85	≤270	233,8	≤270

Tabela 5 – Características físicas dos cimentos utilizados

Fonte: Furnas (2019); NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tabela 6 – Caraterísticas mecânicas dos cimentos utilizados – resistência à compressão

		Tipos de cimento Portland							
Características avaliadas		CP V-ARI		CP II	-F	CP II	CP II-Z CP IV		V
		Resultado	NBR	Resultado	NBR	Resultado	NBR	Resultado	NBR
		obtido	16697	obtido	16697	obtido	16697	obtido	16697
Resistência	1 dia		≥14,0		-		-		-
а	3 dias	30,4	≥24,0	-	≥10,0	20,0	≥10,0	19,3	≥10,0
compressão	7 dias	36,6	≥34,0	-	≥20,0	27,7	≥20,0	27,0	≥20,0
(MPa)	28 dias	47,4	-	-	≥32,0	35,2	≥32,0	35,2	≥32,0

Fonte: Furnas (2019); NBR 16697 (ABNT, 2018)

A partir da Tabela 5, observa-se que o teor de SO₃ é maior para o cimento CP V-ARI, bem como a relação SO₃/Al₂O₃, características importantes para observação do fenômeno da DEF (BATIC *et al.*, 2000; BELLEW, 2000; TAYLOR *et al.*, 2001; BAUER *et al.*, 2006; ESCADEILLAS *et al.*, 2007; RAMLOCHAN *et al.*, 2013; LEKLOU *et al.*, 2016; AMINE *et al.*, 2017; ASAMOTO *et al.*, 2017). De acordo com a literatura, a DEF ocorre mais facilmente em teores de SO₃ próximos a 3%, caso do cimento CP V-ARI e CP II-F, sendo um dos fatores que mais contribui para a expansão. De acordo com Asamoto *et al.* (2017), com percentuais maiores de SO₃ os íons carbonato podem formar o monocarbonato, para estabilizar a etringita e acelerar a DEF. Outra característica importante e que afeta a DEF é a finura do cimento, porque interfere na porosidade, microestrutura da pasta e no calor de hidratação, destaque também para o cimento CP V-ARI.

Quanto aos teores de SO₃ e a relação SO₃/Al₂O₃, os menores valores foram observados para o cimento CP IV.

3.1.2 Agregado

No presente estudo foi empregada uma areia de britagem, escolhida para que fosse possível avaliar isoladamente o efeito da DEF, sem riscos de ocorrência da RAS. O estudo de Bronholo *et al.* (2019) evidenciou a dificuldade de encontrar uma areia *in natura* inócua em relação à RAS, a partir dos critérios da NBR 15577-1 (ABNT, 2018), para o ensaio acelerado das barras de argamassa (NBR 15577-4 (ABNT, 2018)). Por esse motivo foi escolhida uma areia de britagem de origem granítica, proveniente da cidade de Aparecida de Goiânia/GO. Essa areia foi previamente avaliada pelo ensaio acelerado das barras de argamassa NBR 15577-4 (ABNT, 2018), tendo sido classificada como potencialmente inócua (APÊNDICE A).

Os ensaios de caracterização do agregado foram realizados nos laboratórios de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia/GO. A Tabela 7 apresenta seus índices físicos. A distribuição granulométrica pode ser observada na Figura 14, que foi obtida conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009). Na presente pesquisa não foi feito nenhum ajuste na distribuição granulométrica para a confecção das argamassas, o agregado foi apenas lavado.

	isicos do agregado miuc	10
Ensaio	Norma	Resultado
Massa específica condição seca	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	2,65 g/cm ³
Massa específica condição SSS	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	2,66 g/cm ³
Massa específica	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	2,66 g/cm ³
Material pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	16,98 %
Absorção	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	0,1 %
· · ·		

Tabela 7 – Índices físicos do agregado miúdo

Fonte: dados obtidos de Furnas (2019)



Figura 14 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Fonte: dados obtidos de Furnas (2019)

3.2 Produção das argamassas

A definição ocorreu a partir de pesquisa bibliográfica, em que se optou por adotar o traço 1:2,75, e relação a/c de 0,485, seguindo-se a ASTM C 1012 (2018).

As misturas foram feitas nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção da IMED, em Passo Fundo/RS. Foi empregado misturador mecânico, seguindo-se as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019) e, em seguida, foram moldados os corpos de prova.

Para a avaliação das propriedades mecânicas, foram empregados corpos de prova cilíndricos, de dimensão (5 x 10) cm, sendo moldados em 4 camadas, com 30 golpes por camada, conforme NBR 7215 (ABNT, 2019). As avaliações físicas foram feitas por meio de corpos de prova prismáticos, de dimensão (2,5 x 2,5 x 28,5) cm, cuja moldagem foi feita em 2 camadas, com 20 golpes por camada, de acordo com a NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

Para avaliação das propriedades mecânicas foram moldados 4 CPs por idade de ensaio, sendo avaliadas 10 idades: 1, 7, 28, 56, 84, 112, 140, 168, 270 e 365 dias. Considerando-se o emprego de dois métodos de cura no programa experimental, o primeiro para todos os 4 tipos de cimento e o outro para 2 tipos, a quantidade total de CPs cilíndricos moldados foi de 250.

As propriedades físicas foram avaliadas semanalmente para o método brasileiro, até as argamassas completarem 202 dias (CP V-ARI), 161 dias (CP II-F), 175 dias (CP II-Z) e 189 dias (CP IV) e, posteriormente a avaliação foi quinzenal, até 365 dias, sendo empregados 3 CPS prismáticos para cada tipo de cimento, totalizando 12 CPS. Para o método francês as propriedades físicas foram avaliadas semanalmente, até as argamassas completarem 112 dias (CP V-ARI), e 91 dias (CP IV) e, posteriormente a avaliação foi quinzenal, até 270 dias, sendo empregados 3 CPS prismáticos para cada tipo de compregados 4 CPS.

As análises realizadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas na idade de 365 dias para o método brasileiro e 168 dias para o método francês, e análises de termogravimetria (TGA) foram feitas na idade de 365 dias para o método brasileiro, empregando-se fragmentos das argamassas, que foram coletados após os ensaios mecânicos.

3.3 Procedimentos de cura

A elevação de temperatura nas primeiras horas após a mistura do cimento com a água é um dos principais fatores para a ocorrência de DEF. No presente estudo foram empregados dois procedimentos de cura, a saber:

- O método utilizado por Schovanz (2019) e detalhado por Hasparyk *et al.* (2020), nesta pesquisa chamado de método brasileiro, que foi desenvolvido para propiciar a ocorrência da DEF em laboratório, e foi desenvolvido a partir de outras metodologias (FU, 1996; SANCHEZ *et al.*, 2015; KCHAKECH *et al.*, 2016; GODART, 2017; MARTIN *et al.*, 2017; RASHIDI *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2017; GIANNINI *et al.*, 2018);

- O método apresentado pelo LCPC (LCPC, 2007), nesta pesquisa chamado de método francês, foi desenvolvido para avaliar a DEF em concretos de pavimentos.

A Figura 15 mostra, esquematicamente, o ciclo térmico do método brasileiro que consiste em, após a moldagem, os CPs permanecerem em temperatura ambiente durante 6 horas e, em seguida, serem imersos em um tanque com água à 25 °C, que deve ser gradativamente aquecida até alcançar a temperatura de 85 °C, num período de 6 horas. Os CPs devem permanecer na temperatura de 85 °C por 12 horas. Após essa cura térmica, procede-se o resfriamento da água, com taxa de resfriamento





Fonte: adaptado de SCHOVANZ (2019); HASPARYK et al. (2020)

O método proposto pelo LCPC (LCPC, 2007) não determina um ciclo inicial específico que propicie a elevação da temperatura do concreto nas primeiras horas após a mistura, mas sugere que sejam usados dados de simulação de aumento da temperatura de campo. Sendo assim, no presente estudo foi adotado o mesmo ciclo térmico proposto por Schovanz (2019) para as primeiras 24 horas das misturas. Após, quando os CPs já estavam na condição de 38 °C, iniciou-se a ciclagem proposta pelo Método Francês (Figura 16), envolvendo secagem e molhagem, cada qual de 7 dias de duração, conforme segue:

Etapa secagem 01: 7 dias em câmara climatizada à temperatura de 38 ± 2°C,
com umidade relativa <30%;

- Etapa molhagem 01: 7 dias imersos em água à temperatura de 20 ± 2°C;

 Etapa secagem 02: 7 dias em câmara climatizada à temperatura de 38 ± 2°C, com umidade relativa <30%;

- Etapa molhagem 02: 7 dias imersos em água à temperatura de 20 ± 2 °C.

Conforme previsto pelo Método Francês, após os ciclos de secagem e molhagem, os CPS foram mantidos imersos em água à temperatura de 20 ± 2 °C até as idades de ensaio.



Figura 16 - Cura e ambiente de exposição proposto pelo Método Francês

Os resultados das propriedades mecânicas (resistência à tração por compressão diametral) passaram por tratamento estatístico, no qual descartaram-se os resultados espúrios a partir do DRM (desvio relativo máximo), conforme proposto pela NBR 16697 (2018), porém, considerando-se o DRM de 10%. Os resultados obtidos para expansibilidade e variação de massa não passaram por tratamento de espúrios.

Após o tratamento inicial, os resultados foram avaliados através da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, visando identificar se houve, ou não, diferenças significativas entre os resultados obtidos para os diferentes cimentos e métodos empregados no estudo.

Após a moldagem e exposição à temperatura de cura de 85 °C por 12 horas, os corpos de prova permaneceram aquecidos na temperatura de 38 °C até as idades de ensaio.

Durante a permanência dos corpos de prova nesta condição de exposição, devido a um problema de energia no laboratório, houve um desligamento do banho térmico, permanecendo os CPS sem aquecimento pelo período de 21 dias, tendo ocorrido apenas para o método brasileiro, nas seguintes idades: 97 dias – CP V-ARI, 84 dias – CP IV; 70 dias – CP II-Z e 56 dias – para o CP II-F (método brasileiro). Diante disso, alguns ajustes nos resultados foram necessários, os quais serão detalhados quando os mesmos forem apresentados.

3.4 Metodologias para avaliação das propriedades das argamassas sujeitas às condições para desenvolvimento da DEF

3.4.1 Avaliação das propriedades físicas

As propriedades físicas avaliadas no decorrer da pesquisa contemplam CPs prismáticos, com dimensões de (2,5 x 2,5 x 28,5) cm, sendo moldados 3 CPS para cada tipo de aglomerante. Todos os ensaios para avaliação dessas propriedades foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Escola Politécnica da IMED, semanalmente nas primeiras idades e quinzenalmente em idades mais avançadas.

Para avaliar a variação dimensional dos prismas de argamassa foram seguidas as diretrizes da NBR 15577-4 (ABNT, 2018). A avaliação da variação de massa foi feita por meio de aferição da massa dos CPS prismáticos, em balança com capacidade de 4100 g e precisão de 0,01 g. Também foi medido o pH da água de imersão dos CPs, semanalmente. Para as medições fez-se uso de um pH-metro da marca QUIMIS, modelo Q400A.

3.4.2 Avaliação da resistência à tração

Para avaliar a resistência à tração foi empregado o ensaio proposto por Lobo Carneiro (1991), por meio da compressão diametral dos CPs cilíndricos, de acordo com a metodologia da NBR 7222 (ABNT, 2011), porém, adaptando-se o tamanho do CP, uma vez que no método proposto pela referida norma os CPs possuem dimensão (10 x 20) cm. Para esta avaliação também foram empregados 4 CPs por idade de ensaio, com dimensão (5 x 10) cm. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da IMED. O equipamento utilizado para os ensaios de avaliação das propriedades mecânicas foi uma prensa PC 200C, da marca Emic, com precisão de 1% da carga aplicada, e carga máxima de 2000 kN.

3.4.3 Inspeção visual dos corpos de prova

A inspeção visual foi realizada a partir de registro fotográfico semanal da superfície dos CPs prismáticos, sempre do mesmo CP e na mesma posição. Também foi feito o registro do aspecto interno das argamassas nas idades dos ensaios mecânicos após a ruptura, sendo anotados os sintomas observados para futuras correlações com as demais investigações do programa experimental.

3.4.4 Avaliação microestrutural das argamassas

A avaliação das feições microestruturais das argamassas foi realizada em fragmentos coletados dos CPS cilíndricos, oriundos do ensaio de resistência à tração, aos 365 dias para o método brasileiro e 270 dias para o francês.

Os fragmentos foram analisados por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV), com auxílio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), em amostras com superfície de fratura. Esta análise foi realizada nos laboratórios de Furnas Centrais Elétricas S.A., localizados em Aparecida de Goiânia (GO).

A microscopia eletrônica de varredura permitiu observar a matriz das argamassas, buscando verificar a presença, ou não, de etringita neoformada, proveniente da DEF. As imagens foram obtidas por detector de elétrons secundários. Foi empregado microscópio da marca Tescan, modelo VEGA3, em alto vácuo.

Além das análises por MEV, foram feitas análises por termogravimetria (TGA) para as argamassas submetidas ao método brasileiro. As amostras também foram avaliadas na idade de 365 dias, no Laboratório da Universidade de Caxias do Sul, em Caxias do Sul (RS). O objetivo da análise termogravimétrica na presente pesquisa foi identificar as perdas de massa a partir da decomposição dos compostos e produtos presentes nos compósitos. Para esta avaliação, foi empregado o modelo TGA-50, marca Shimadzu.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo do trabalho apresenta os resultados obtidos a partir do programa experimental proposto para atingir o principal objetivo da pesquisa, que foi avaliar a ocorrência de DEF em argamassas produzidas com 4 tipos de cimento e dois métodos, com e sem a presença de adições.

4.1 Avaliação da expansão e da variação de massa

Os resultados de expansão e variação de massa obtidos para as argamassas confeccionadas com o método brasileiro estão demonstrados na Figura 17 e na Figura 18.





Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021



Figura 18 - Resultados de expansão e variação de massa para as argamassas método brasileiro – CPIV e CP II-Z

Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

A partir da variação dimensional dos corpos de prova, verificou-se que as argamassas moldadas com cimento CP V-ARI foram as que mais expandiram, atingindo 1,79%, aos 365 dias, seguidas de 0,45% para o cimento CP II-F, 0,07% para o cimento CP IV e 0,01% para o cimento CP II-Z.

Observando-se o comportamento do CP V-ARI, nota-se que as expansões se mantêm em um patamar de relativa estabilidade entre 28 e 154 dias, aproximadamente, quando passam a crescer substancialmente. Um comportamento semelhante foi observado para a variação de massa com esse cimento, entretanto, o patamar de estabilidade ficou entre 56 e 154 dias. Esse comportamento pode ser indicativo da presença de DEF, onde, a etringita, em um primeiro momento preenche os poros da matriz e, após, passa a causar tensões internas e promover as expansões, o que pode ser comprovado pelo ganho de massa com o passar do tempo.

O cimento CP II-F, assim como o CP V-ARI, não possui adições pozolânicas, mas apresentou expansões inferiores a 0,10% até a idade de 270 dias, quando passou a expandir de modo bastante acentuado. O ganho de massa também cresceu a partir dessa idade, porém não na mesma ordem de grandeza, em relação ao cimento CP V-ARI. Tal comportamento pode indicar que a redução da quantidade de clínquer no cimento, devida à presença de fíler calcário, apenas retardou a ocorrência da DEF, que passou a promover manifestações expansivas nas argamassas produzidas com CP II-F.

Os cimentos compostos por adições pozolânicas, CP IV e CP II-Z apresentaram comportamento distinto dos demais. Para ambos as expansões se apresentaram constantes do início ao final do ensaio, sendo o patamar das expansões do CP IV da ordem de 0,07% e do CP II-Z de 0,02%. No estudo de Bronholo (2020), as combinações feitas com o CP IV permaneceram estáveis em relação às expansões das argamassas até os 365 dias (quando avaliada isoladamente a DEF), corroborando com os resultados encontrados nessa pesquisa.

Em relação à variação de massa, o comportamento foi semelhante ao das expansões para os cimentos com adição pozolânica, no entanto, para o cimento CP IV, a partir dos 296 dias observou um importante crescimento, o que pode ser indício da formação de etringita na matriz. Entre 296 e 365 dias, o ganho médio total de massa foi de 1,44%. Os resultados de variação de massa correspondem aos produtos de reação para formação da DEF, que dependem da água para sua cristalização. Diversos autores citam que o ganho de massa está relacionado às neoformações geradas na matriz cimentícia (ZHANG *et al.,* 2017; SANCHEZ *et al.,* 2018; SCHOVANZ, 2019; BRONHOLO, 2020).

Na pesquisa de Leklou *et al.* (2016), os autores destacaram a influência da cinza volante nas expansões, onde teores acima de 10% mitigaram os efeitos da DEF.

Com o objetivo de avaliar estatisticamente as diferenças observadas nas expansões e variações de massa ao longo do tempo, foi realizada uma análise de variância, na qual foi possível observar a influência dos tipos de cimento nas propriedades avaliadas, para o método brasileiro (Tabela 8 e Tabela 10). A Tabela 9 apresenta a análise de variância da idade e da idade x tipo de cimento nas expansões. Através da análise verificou-se que a idade e a idade combinada ao tipo de cimento apresentaram influência na propriedade avaliada.

Cimento	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Signif.
	Expansão	24,2740	39	0,6224		
CP V-ARI	Erro	0,2668	80	0,0033	186,63	S
	Total	24,5408	119	-		
	Expansão	1,3282	37	0,0358		
CP II-F	Erro	0,0626	76	0,0008	43,58	S
	Total	1,3908	113	0,0366		
	Expansão	0,0373	37	0,0010		
CP II-Z	Erro	0,5262	76	0,0069	0,14	NS
	Total	0,5635	113	-		
	Expansão	0,0369	38	0,0009		
	Erro	0,3641	78	0,0046	0,20	NS
CP IV	Total	0,4010	116	-		

Tabela 8 – Análise de variância das expansões (%)

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade, MQ: Média dos quadrados, F: FisherSnedecor, S: significante; NS: não significante. Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

Tabela 9 – Análise da idade e do tipo de cimento nas expansões (%)

Fator avaliado	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Signif.
	Expansão	36,0950	79	0,4569		
Idade	Erro	4,0441	351	0,0115	39,66	S
	Total	40,1391	430	0,4684		
Idade x tipo	Expansão	2,3746	72	0,0330		
de cimento	Erro	1,0422	276	0,0038	8,73	S
	Total	3.4168	348	0.0368		

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade, MQ: Média dos quadrados, F: FisherSnedecor, S: significante; NS: não significante. Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

Cimento	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Signif.
CP V-ARI	Variação	123,8342	39	3,1760		
	Erro	8,4533	80	0,1057	30,057	S
	Total	132,2875	119	-		
CP II-F	Variação	14,3763	37	0,3885		S
	Erro	1,3641	76	0,0179	21,64	
	Total	15,7404	113	-		
CP II-Z	Variação	12,1657	37	0,3288		
	Erro	0,4466	76	0,0059	55,95	S
	Total	12,6123	113	-		
	Variação	11,0675	38	0,2913		
CP IV	Erro	1,2930	78	0,0166	17,57	S
	Total	12,3605	116	-		

Tabela 10 - Análise de variância da variação de massa (%)

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade, MQ: Média dos quadrados, F: FisherSnedecor, S: significante; NS: não significante. Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

A Tabela 11 apresenta a análise de variância da idade e da idade x tipo de cimento na variação de massa. Através da análise verificou-se que o fator idade, e combinado com o tipo de cimento apresentou influência na propriedade avaliada.

	Tabela 11 - Análise da	idade e do tipo de cimento	o na variacão de massa (%	5)
--	------------------------	----------------------------	---------------------------	----

Fator avaliado	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Signif.
	Var.	36,0950	79	0,4569		
Idade	massa				39,66	S
	Erro	4,0441	351	0,0115		
	Total	40,1391	430	0,4684		
Idade x tipo	Var.	25,6217	72	0,3559		
de cimento	massa				8,73	S
	Erro	11,2437	276	0,0407		
	Total	36,8654	348	0,3966		

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade, MQ: Média dos quadrados, F: FisherSnedecor, S: significante; NS: não significante. Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

A ANOVA mostrou que houve influência significativa do fator tipo de cimento para as expansões, assim como para o ganho de massa.

Os resultados de expansão e variação de massa obtidos para as argamassas submetidas ao método francês estão demonstrados na Figura 18. Neste método as propriedades foram avaliadas em 26 idades e, do mesmo modo que foi feito para o método brasileiro, inicialmente as leituras foram realizadas semanalmente, após 91 dias as leituras foram feitas quinzenalmente até 270 dias de ensaio.





Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

Ao analisar a Figura 18 é possível observar que as argamassas produzidas com o cimento CP V-ARI apresentaram expansões finais da ordem de 0,10% aos 270 dias. Por sua vez, as argamassas com o cimento CP IV apresentaram expansões da ordem de 0,04%, na mesma idade. O comportamento observado para o cimento CP IV pode ser justificado pela presença de adições pozolânicas.

Observando-se o comportamento com o CP V-ARI no método francês nota-se que as expansões se mantiveram constantes ao longo do tempo e até 161 dias, quando começou a crescer gradativamente e lentamente, do mesmo modo que para o CP IV, com essa tendência lenta de crescimento após 196 dias.

Em relação à variação de massa, percebeu-se um leve aumento para ambos os cimentos a partir dos 182 dias, sendo mais pronunciada para o CP IV.

Para o CP V-ARI o aumento de expansões entre 182 dias até o final do ensaio (270 dias) foi de 32,3%. De todo modo, comparativamente ao método brasileiro, as expansões pelo método francês foram muito inferiores. Na idade de 195 dias, por

exemplo, tem-se para o método brasileiro 0,53% de expansibilidade, enquanto no método francês foi dez vezes menor, igual a 0,05%. O comportamento verificado pode ser explicado pelo ambiente de exposição adotado, após ciclo térmico, no qual os CPs permaneceram em ambiente úmido porém com temperaturas mais baixas (20°C), o que pode ter retardado o aparecimento das manifestações perceptíveis de DEF.

Em relação aos ganhos de massa, também foram observados ganhos maiores no método brasileiro em relação ao francês, o que é mais um indicativo que o ganho de massa após os 28 dias corresponde à cristalização de etringita na matriz cimentícia.

Com o objetivo de avaliar se as diferenças observadas para as expansões e variações de massa são estatisticamente significativas, foi realizada uma análise de variância, conforme Tabela 12 e Tabela 13.

Cimento	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Signif.
	Expansão	0,0739	25	0,0029		
CPV-ARI	Erro	0,0075	52	0,0001	20,40	S
	Total	0,0814	77	-		
CPIV	Expansão	0,0881	27	0,0033		
	Erro	0,0064	56	0,0001	28,55	S
	Total	0,0945	83	-		

Tabela 12 - Análise de variância das expansões (%)

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade, MQ: Média dos quadrados, F: FisherSnedecor, S: significante; NS: não significante. Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

Tabela 13 - Análise d	e variância d	da variação de	massa (%)
-----------------------	---------------	----------------	-----------

Cimento	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Signif.
	Variação	3,9374	25	0,1575		
CPV-ARI CPIV	Erro	0,2290	52	0,0044	35,76	S
	Total	4,1664	77	-		
	Variação	3,5186	27	0,1303		
	Erro	0,0872	56	0,0016	83,69	S
	Total	3,6058	83	-		

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade, MQ: Média dos quadrados, F: FisherSnedecor, S: significante; NS: não significante. Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021 De acordo com a análise, o cimento CP V-ARI e o cimento CP IV, influenciaram significativamente na propriedade expansão, bem como a propriedade variação de massa quando empregado o método do LCPC.

Analisando-se a composição química dos cimentos (Tabela 4) verificou-se que o cimento CP V-ARI possui uma relação SO₃/Al₂O₃ de 0,56. Para o cimento CP II-F o valor da relação é próximo, de 0,55, enquanto para o cimento CP II-Z e CP IV é de 0,32 e 0,0058, respectivamente. Segundo Zhang *et al.* (2002), Bauer *et al.* (2006) e Tosun (2006), quanto mais próximo de 1 for a relação SO₃/Al₂O₃, maior a propensão de desenvolvimento da DEF. As maiores relações observadas para o CP V e o CP II-F corroboram as maiores expansões nos ensaios.

Os maiores percentuais de expansão e variação de massa, no método brasileiro, foram obtidos para o cimento CP V-ARI e CP II-F, o que vai ao encontro da abordagem da literatura (BATIC *et al.,* 2000; BELLEW, 2000; TAYLOR *et al.,* 2001; BAUER *et al.,* 2006; ESCADEILLAS *et al.,* 2007; RAMLOCHAN *et al.,* 2013; LEKLOU *et al.,* 2016; AMINE *et al.,* 2017; ASAMOTO *et al.,* 2017).

Para o método francês, não foram expressivas as diferenças entre as propriedades avaliadas, podendo estar relacionadas ao ambiente de exposição, possivelmente se manifestando em idades mais avançadas. O próprio método prevê que o ensaio seja estendido pelo período de um ano.

O ciclo térmico e o ambiente de exposição dos corpos-de-prova também foram determinantes para os resultados obtidos, tendo em vista que são fundamentais para a ocorrência da DEF (TAYLOR, 1998 apud QUARCIONI, 2008; COLLEPARDI, 2003; ODLER, 2007; BRYANT, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

4.2 Resistência à tração

A resistência à tração é, em geral, uma propriedade mais sensível aos danos ocasionados por reações expansivas, como a DEF, quando comparada à resistência à compressão (SANCHEZ *et al.,* 2018; THIEBAUT *et al.,* 2018). Essa propriedade foi avaliada em 10 idades no método brasileiro (até 365 dias) e 9 idades no método francês (até 270 dias).

A Figura 21 apresenta os resultados de resistência à tração para as argamassas produzidas com os 4 tipos de cimento, e ensaiadas pelo método brasileiro.



Figura <u>1921</u> – Resultados de resistência à tração para as argamassas – método

Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

Conforme pode ser observado nos resultados obtidos para as argamassas submetidas ao método brasileiro, a resistência à tração sofreu quedas ao longo do tempo. É possível observar oscilações até a idade de 84 dias, porém, a partir dessa idade e para a maioria dos cimentos testados, as resistências caem até a idade final de avaliação (365 dias). Ao final do ensaio verificou-se que a resistência à tração sofreu redução de 64% para a argamassa contendo o CP V em relação aos 84 dias, coerente com o observado para a variação dimensional e de massa com essa mistura, que acusou elevadas expansões (1,8%).

Em relação aos resultados de resistência à tração para as argamassas com cimento CP II-F, após o aumento de resistências observado na idade de 56 dias, foi registrado estabilidade até os 270 dias. Na idade de 365 dias ocorreu uma redução substancial de resistência, no mesmo patamar (~60%) que o cimento CP V, para o mesmo período. O comportamento semelhante era de se esperar, visto que em ambos os casos não há a presença de adições pozolânicas. Entretanto, a menor quantidade de clínquer, pela presença do fíler calcário no CP II-F, interferiu no comportamento expansivo, visto que as expansões foram menores aos 365 dias (0,45%), porém ainda elevadas.

Na presença do cimento CP IV, houve uma tendência de estabilidade até a idade de 168 dias, a partir da qual houve um ganho de resistência, seguido por queda, até a idade de 365 dias, da ordem de 12%, em relação aos 168 dias.

O cimento CP II-Z apresentou um comportamento semelhante ao CP II-F, onde, após o aumento de resistência até a idade de 56 dias, houve uma tendência de estabilização, com redução dos valores nas últimas idades avaliadas, porém chegando a menores quedas, de 24% na idade final em relação aos 84 dias.

A Figura 22 apresenta os resultados de resistência à tração para as argamassas com cimento CP V-ARI e CP IV pelo método francês. O comportamento observado para o cimento CP V-ARI denota reduções de resistência bem menos expressivas (de 11% a partir dos 84 dias até o final do ensaio, aos 270 dias) do que o observado para o método brasileiro com o mesmo cimento. Quanto ao cimento CP IV, o comportamento foi semelhante ao obtido para o método brasileiro.



Figura <u>20</u>22 - Resultados de resistência à tração para as argamassas – método francês



De modo geral, os comportamentos foram semelhantes para a propriedade avaliada, havendo apenas algumas particularidades de acordo com o cimento empregado/adições presentes.

Como destacado anteriormente, a presença de adições interfere na microestrutura dos compósitos de cimento, melhorando as características da zona de transição pasta-agregado. A análise estatística apresentada na Tabela 16 destaca esse comportamento, pois evidencia influência significativa do tipo de cimento no comportamento à tração das argamassas.

Cimento	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Signif.
CPV-ARI	Resist. tração	14,6553	8	1,8319	78,33	S
	Erro	0,3040	13	0,0234		
	Total	14,9593	21	-		
CP II-F	Resist. tração	9,1800	9	1,0200	3,31	S
	Erro	9,2411	30	0,3080		
	Total	18,4211	39	-		
CP II-Z	Resist. tração	5,4780	8	0,6847	18,31	S
	Erro	0,5236	14	0,0374		
	Total	6,0016	22	-		
CP IV	Resist. tração	13,2104	8	1,6513	38,58	S
	Erro	0,5136	12	0,0428		
	Total			-		
Método Francês						
CPV-ARI	Resist. tração	1,1873	8	0,1484	12,62	S
	Erro	0,0705	6	0,0118		
	Total	1,2578	14	-		
CPIV	Resist. tração	4,0285	6	0,6714	14,92	NS
	Erro	0,4499	10	0,0450		
	Total	4,4784	16	-		

Tabela <u>1416</u> - Análise de variância do cimento na resistência à tração

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade, MQ: Média dos quadrados, F: FisherSnedecor, S: significante; NS: não significante. Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

A Tabela 17 apresenta a análise de variância da idade e da idade x tipo de cimento na resistência à tração. Através da análise verificou-se que o fator idade isolado, e combinado com o tipo de cimento apresentou influência na propriedade avaliada, para o método francês, e o fator combinado apresentou influência, para o método brasileiro. O fator idade não apresentou influência da propriedade avaliada para o método brasileiro, pela variabilidade observada nas primeiras idades.
liação								
Fator avaliado	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Signif.		
Método brasileiro								
Idade	Resist. tração	6,117	9	0,680				
	Erro	70,389	73	0,964	0,705	NS		
	Total	76,506	82	-				
	Resist. tração	28,251	24	1,1771				
ldade x	Erro	1,619	46	0,0352	33,45	S		
tipo de	Total	29,870	70	-				
cimento								
Método Francês								
	Resist. tração	6,635	8	0,829				
Idade	Erro	7,003	23	0,304	2,724	S		
	Total	tal 13,638 31 -			s s s			
	Resist. tração	1,274	6	0,212				
Idade x	Erro	0,520	16	0,032	6,527	S		
tipo de cimento	Total	1,794	24	-				

Tabela <u>15</u>17 – Análise de variância da idade e do tipo de cimento na resistência à

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade, MQ: Média dos quadrados, F: FisherSnedecor, S: significante; NS: não significante. Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

4.3 Inspeção visual

As inspeções visuais foram realizadas nos corpos de prova prismáticos, de forma a avaliar alterações superficiais. Para registrar essas alterações, foram feitos registros fotográficos, sempre na mesma face dos corpos de prova, conforme imagens apresentadas nos apêndices H (método brasileiro) e I (método francês). Também foram registradas imagens internas nas datas de ruptura, como mostrado na Figura 23, que apresenta imagens do interior dos corpos de prova, na idade de 365 dias.



Figura 2123 - Imagem do interior dos corpos de prova aos 365 dias



 a) Argamassa com CP II-Z; b) Argamassa com CP IV; c) Argamassa com CP V-ARI; d) Argamassa com CP II-F.

Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021.

A Figura 23 mostra a presença de pontos esbranquiçados em a), b) e c), e aspecto pulverulento nas argamassas em c) e d), demonstrando a sua fragilidade, sendo um indício do processo da DEF.

A Figura 24 apresenta as imagens obtidas durante a inspeção visual do aspecto interno da argamassa com cimento CP V-ARI, onde foi possível observar pontos esbranquiçados, que possivelmente representam a presença de DEF, na idade de 56 dias.

Em comparação aos resultados das propriedades já apresentadas, na idade de 56 dias o cimento CP V-ARI já apresentava redução na resistência à tração de 10%, em relação à idade de 28 dias. O percentual de expansão nessa idade foi de 0,14% e o percentual de variação de massa de 1,25%. Ambas as propriedades físicas avaliadas sofreram aumento substancial a partir dos 56 dias. Nas idades finais foi possível identificar a fragilidade das argamassas, e constatou-se a matriz desagregando.

Na pesquisa de Schovanz (2019) foi possível observar bordas esbranquiçadas nos concretos produzidos com cimento CP V-ARI na idade de 56 dias, acentuando-se

aos 84 dias, e apresentando fragilidade na interface pasta/agregado na última idade avaliada, que foi 252 dias.



365 dias Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

Através da inspeção visual ao longo do tempo na argamassa produzida com cimento CP II-F, conforme Figura 25, verificou-se a presença de poros contendo material esbranquiçado. Essa feição foi observada na idade de 28 dias e aos 140 dias.

Na última idade de inspeção, 365 dias, a argamassa apresentava-se pulverulenta, o que pode ser um indício da ocorrência de DEF.

Comparativamente aos resultados das propriedades já apresentadas, os maiores percentuais de expansão foram registrados na idade de 270 dias, quando as argamassas passaram a apresentar pulverulência. A variação de massa apresentou valores sequenciais de crescimento a partir da idade de 91 dias.

Figura <u>23</u>25 - Inspeção visual do aspecto interno da argamassa com cimento Portland CP II-F



1 dia



56 dias



140 dias



7 dias



84 dias



168 dias



365 dias Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

As imagens da Figura 26 foram obtidas durante a inspeção visual da argamassa com cimento CP II-Z. Assim como observado na mistura com CP V-ARI,



28 dias

112 dias



270 dias

com o cimento CP II-Z também foram identificados poros contendo produtos esbranquiçados, porém, apenas na idade de 56 dias. Também se observou aspecto pulverulento aos 365 dias. Importante ressaltar a diferença de aspecto interno das argamassas com cimento CP II-Z, menos pulverulento e com aspecto mais íntegro em relação às argamassas com CP V-ARI e CP II-F.

Para essas argamassas a expansão registrada foi de 0,01% na idade de 365 dias, enquanto a variação de massa foi de 0,48%. A resistência à tração apresentou uma redução de valores menos acentuada, sendo da ordem de 23,65% na idade de 365 dias, em relação à idade de 90 dias.



365 dias Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

A Figura 27 apresenta as imagens obtidas durante a inspeção visual do aspecto interno da argamassa produzida com cimento CP IV. Observa-se que para o CP IV, a exemplo do cimento CP II-Z, a argamassa tem aspecto menos poroso, comparativamente ao CP V-ARI e CP II-F; não foram identificados pontos esbranquiçados ou qualquer outra alteração visual na argamassa produzida com CP

IV. A mistura com CP IV apresentou aspecto interno semelhante às argamassas com CP II-Z.

Schovanz (2019) não identificou evidências de neoformações visualmente identificáveis em concretos produzidos com CP IV. A autora observou alguns pontos esbranquiçados a partir da idade de 140 dias, os quais podem ter sido um indicativo de ocorrência da hidrólise da portlandita (Ca(OH)₂) presente na mistura, ou mesmo a solubilização dos álcalis por água de imersão dos CPs.



365 dias Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

As argamassas submetidas pelo método francês também passaram pela inspeção visual ao longo do tempo. A Figura 28 apresenta a inspeção feita na argamassa com cimento CP V-ARI. Apenas aos 140 dias foram identificadas alterações no aspecto da mistura com esse cimento, através da presença de material esbranquiçado cristalizado nos poros. Comparativamente às propriedades já avaliadas, a redução da resistência à tração aos 270 dias foi de 10,82% para esse

método, em relação à idade de 84 dias, enquanto para o método brasileiro a redução entre 365 dias e 84 dias foi bem mais expressiva, e de 64%.

Figura <u>26</u>28 - Inspeção visual do aspecto interno da argamassa com cimento Portland CP V-ARI – Método francês



Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

Através da Figura 29 é possível observar que visualmente não houve alterações na argamassa produzida com CP IV submetida à cura pelo método francês.



Figura 2729 - Inspeção visual do aspecto interno da argamassa com cimento Portland CP IV - Método francês

Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

4.4 Análise microestrutural

4.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para o método brasileiro

A fim de identificar a presença de cristais de etringita na matriz das argamassas, foi realizada a análise de sua microestrutura por meio de MEV, com auxílio de EDS, na idade de 365 dias. A Figura 30 apresenta imagens de MEV para argamassas produzidas com cimento CP V-ARI, as Figuras 31, 32 e 33, representam os aspectos observados para o CP II-F, CP II-Z; CP IV, respectivamente.



Fonte: Hasparyk, Furnas (2021)

Corroborando com o que foi observado nas avaliações feitas nessa pesquisa, foi identificada DEF na mistura com CP V-ARI. Na Figura 30 a) é possível constatar microfissuras intensas e vazios preenchidos por etringita neoformada. Na imagem da Figura 30 b) observa-se a etringita e, também fragilidade da pasta. Na Figura 30 c) identificou-se a presença etringita maciça na pasta de cimento.

Figura 2830 – MEV aos 365 dias na argamassa com CP V-ARI



Figura 2931 - MEV aos 365 dias na argamassa com CP II-F

Fonte: HASPARYK; FURNAS, 2021

Observando-se a Figura 31, nota-se que na microestrutura da argamassa com CP II-F há DEF maciça, preenchendo um vazio (a). Na Figura 31 b) foram identificados cristais de etringita comprimidos na pasta de cimento. Também foi possível constatar perda de aderência entre a pasta de cimento e o agregado e neoformações na superfície do agregado (c).



Figura 3032 - MEV aos 365 dias na argamassa com CP II-Z

Fonte: HASPARYK; FURNAS, 2021

Nas imagens de MEV da Figura 32, obtidas em argamassa produzida com o cimento CP II-Z foi possível identificar aglomeração de etringita em um vazio (a) e formações maciças na pasta de cimento (b). Também foi observado, na Figura 37 c), desprendimento entre a pasta e o agregado.

Apesar de não ter sido observado elevado percentual de expansão para esse cimento (0,02% na idade de 365 dias), foi registrado 0,48% de ganho de massa e 23,65% de redução na resistência à tração na idade de 365 dias, em relação à idade de 90 dias, foi possível observar DEF na microestrutura das argamassas com cimento CP II-Z. A constatação da presença de DEF aponta para um possível comportamento

mais lento no desenvolvimento da DEF quando se empregam cimentos que contém adição pozolânica, pois a sua incorporação proporciona fases com maior estabilidade, que preenchem os poros das misturas cimentícias, o que pode retardar ou até evitar as manifestações da DEF.

A análise microscópica da mistura produzida com CP IV submetida ao método brasileiro não identificou DEF. Através da Figura 33 a) foi possível observar cristais de hidróxido de cálcio dentro de um vazio, bem como algumas formações de etringita. Na imagem da Figura 33 c) identificou-se alguns grãos de agregados separados da argamassa.



Figura 3133 - MEV aos 365 dias na argamassa com CP IV



a)

b)



Fonte: HASPARYK; FURNAS, 2021

4.4.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para o método francês

A análise através de MEV, com auxílio de EDS, nas misturas submetidas ao método francês foi feita na idade de 168 dias.

A Figura 34 apresenta imagens de MEV para argamassas produzidas com cimento CP V-ARI, onde foi possível identificar fragilidade entre pasta e agregado (a), formação massiva de etringita (b) e formações massivas na zona de transição entre o agregado e a pasta (c).



Figura 3234 - MEV aos 168 dias na argamassa com CP V-ARI



a)





Fonte: HASPARYK; FURNAS, 2021

A Figura 35 apresenta as imagens obtidas para argamassas com o CP IV, submetidas ao método francês. A imagem posicionada em (a) mostra a presença dos cristais de etringita no poro.

É importante destacar a diferença de morfologia entre as argamassas com esses dois tipos de cimento. Enquanto com o cimento CP V-ARI a argamassa apresenta uma estrutura porosa, com aspecto de pulverulência, a microestrutura da argamassa com o CP IV não apresenta essas características.

Figura 3335 - MEV aos 168 dias na argamassa com CP IV







c) Fonte: HASPARYK; FURNAS, 2021

4.4.3 Análise termogravimétrica (TGA), para o método brasileiro

O primeiro pico das curvas DTG, verificado nas figuras 36, 37, 38 e 39, em temperaturas entre 100°C e 200°C, contemplam perdas de água não combinada, ou seja, onde é evaporada a água presente nos poros maiores que 0,05 µm (BAERT *et al.*, 2008; ADAMOPOULOU *et al.*, 2011; KATSIOTI *et al.*, 2011; LU *et al.*, 2016; LEKLOU *et al.*, 2017; BI *et al.*, 2019)).

De acordo com Taylor *et al.* (2001); Tosun *et al.* (2010), Colombo *et al.* (2018) e Leklou *et al.* (2017) a primeira perda de massa corresponde à decomposição dos sulfoaluminatos de cálcio (etringita e monossulfato), gipsita, e dos silicatos de cálcio (C-S-H); a segunda, corresponde à decomposição do CH (KATSIOTI *et al.,* 2011; SALUM, 2016). Quando o carbonato é aquecido, produz-se dióxido de carbono; o terceiro e o quarto picos devem-se à descarbonatação associada à decomposição da calcita (ADAMOPOULOU *et al.,* 2011; KATSIOTI *et al.,* 2011).

A Figura 36 apresenta o gráfico de TGA da argamassa com cimento CP V-ARI, na idade de 365 dias.





Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

Na amostra com o CP V-ARI foi possível identificar duas perdas de massa mais pronunciadas. A primeira denota parte das perdas de água relacionadas à etringita e a segunda região se deve à perda do CH.

A Figura 37 apresenta o gráfico de TGA da argamassa com cimento CP II-F, na idade de 365 dias, onde foi possível identificar perda na temperatura de 432 °C e 702 °C. A primeira corresponde à hidratação do grupo de CH (portlandita) (ADAMOPOULOU *et al.*, 2011; LEKLOU *et al.*, 2017). A segunda está associada à decomposição de carbonatos de cálcio, como a calcita (KATSIOTI *et al.*, 2011).



Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

A Figura 38 apresenta o gráfico de TGA da argamassa com cimento CP II-Z, também na idade de 365 dias, onde observa-se um pico de perda de massa na temperatura de 435 °C e outro na temperatura de 776,6 °C.



Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

A Figura 39 apresenta o gráfico de TGA da argamassa com cimento CP IV, na idade de 365 dias. Nessa amostra foi possível identificar duas perdas mais expressivas, na temperatura de 306,42 °C e 450 °C. De acordo com Colombo *et al.* (2018), a primeira perda de massa corresponde à decomposição de etringita e do C-S-H. Já a perda na temperatura de 450 °C corresponde à hidratação do CH (ADAMOPOULOU *et al.*, 2011; LEKLOU *et al.*, 2017).



Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

Na Tabela 18 apresentam-se as perdas de massa obtidas a partir das análises térmicas dos produtos presentes nas argamassas na idade de 365 dias, com os diferentes cimentos testados, na base de voláteis. Na Tabela 19 são apresentados os dados, recalculados, para a base de não voláteis. Relacionado a cada perda de massa, se encontram os principais produtos hidratados identificados nas amostras de argamassas que foram submetidas à indução da DEF pelo método brasileiro, aos 365 dias.

Tabela <u>1648</u> – Perda de massa dos produtos presentes nas argamassas, na base de voláteis – método brasileiro

Argamassa			Perda de massa (%)					Fator de
Amostra	Tipo de aglomerante	ldade (dias)	C-S-H AFt Gipsita	СН	CaCO₃	Total	Massa residual (%)	correção para base de não voláteis
	CPV-ARI		6,06	2,23	3,39	11,68	88,32	1,132
Argamassa	CPII-F	365	5,10	1,80	2,06	8,96	91,04	1,098
	CPIV		2,66	1,95	1,64	6,25	93,75	1,067
	CPII-Z		5,77	1,75	3,42	10,94	89,06	1,122

C-S-H = silicato de cálcio hidratado; CH = hidróxido de cálcio; CaCO₃ = carbonato de cálcio; AFt = trissulfoaluminato de cálcio hidratado.

Argamassa	Perda de massa (%)						
Tipo de aglomerante	C-S-H Af(t;m) Gipsita	СН	CaCO ₃	Total			
CPV-ARI	6,86	2,52	3,84	13,22			
CPII-F	5,60	1,98	2,26	9,84			
CPII-Z	6,48	1,96	3,84	12,28			
CPIV	2,84	2,08	1,75	6,67			

Tabela <u>17</u>19 – Perda de massa dos produtos presentes nas argamassas, na base

de não voláteis - método brasileiro

Em análise da Tabela 18 é possível observar que, independentemente do tipo de cimento, houve perdas de massa ao longo do tempo, sendo as maiores perdas totais registradas para o cimento CP V-ARI, e o menor percentual de perda para o cimento pozolânico, CP IV. O mesmo comportamento ocorreu para o grupo de produtos que contém as fases AF(t;m), destacando a etringita nesse grupo, sendo as maiores perdas na presença do CP V. É possível confirmar ainda que a concentração de hidróxido de cálcio é menor nas argamassas que possuem adições minerais em sua composição.

4.5 pH da água de imersão

Na Figura 40 e na Figura 41 são apresentados os níveis de pH da água na qual os CPs ficaram imersos durante o estudo, segundo o método brasileiro e o método francês, respectivamente.



Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021



Fonte: PRÓPRIA AUTORIA, 2021

A partir dos resultados obtidos foi possível inferir que não houve uma tendência clara de comportamento (aumento ou diminuição do pH). O pH da água da torneira utilizada no dia da moldagem estava em torno de 9,5.

O ambiente de exposição dos CPS (imersão em água) é propício à ocorrência da lixiviação (liberação do hidróxido de cálcio e hidróxidos alcalinos), favorecendo a precipitação de carbonatos. A água proveniente do fornecimento público, utilizada para a confecção dos corpos de prova, possuía valores de pH em torno de 8,70.

No estudo de Souza (2006) observaram-se variações relativamente pequenas, que ocorreram pela dissolução da pasta hidratada ou formação de compostos deletérios. Para o autor, o pH influencia a formação de compostos deletérios na estrutura cimentícia, formando-se preferencialmente em faixas entre 10,5 e 13,0.

Para Bronholo (2020) a estabilização ou elevação dos valores de pH pode estar relacionada à hipótese de haver no estudo com argamassas a influência do tamanho dos corpos de prova, o que pode favorecer os processos de lixiviação, retardando ou amenizando alguns processos expansivos.

A expansão por DEF pode ser retardada quando o pH na solução dos poros é alto. Por isso, uma solução seria substituir a água, semanalmente, para aceleração da DEF (ASAMOTO *et al.* (2017)).

De acordo com Bauer *et al.* (2006), para a RAA, quanto maior o pH, ou a alcalinidade, maior o potencial de RAA. Em concentrações mais elevadas de hidróxidos alcalinos, algumas formas de sílica são suscetíveis ao ataque. Contudo, no caso da etringita, de acordo com Ekolu *et al.* (2006), a alta alcalinidade nos poros retarda a formação da etringita.

A presença de álcalis aumenta o pH da solução dos poros, que favorece a presença de monossulfato, em vez de etringita, com teores relativamente altos de sulfato no C-S-H e na solução de poros (ESCADEILLAS *et al.* (2007)).

Chindaprasirt *et al.* (2007) relataram que o pH do concreto interfere na formação da DEF, ou seja, quando se apresenta elevado na solução dos poros, favorece a presença de monosulfato, ao invés de etringita, por essa se tornar instável. A alteração da alcalinidade no interior do concreto pode propiciar deteriorações variadas e em momentos distintos no tempo, trazendo ataques combinados em idades mais avançadas.

Diante desse contexto, considerando-se que não houve variação expressiva de pH na água de imersão empregada no presente estudo (para ambos os métodos

avaliados), considera-se que não houve influência desse fator para a ocorrência ou não da DEF no presente estudo.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos na pesquisa verificou-se que a presença de adições, a temperatura de cura e condição de exposição dos CPs foram fatores que influenciaram no desencadeamento da DEF. A Tabela 19 resume os resultados obtidos na idade final para as análises feitas.

Método de indução da DEF	Tipo de cimento	V.D. (%)	V.M. (%)	R.T. (%)	Insp. visual*	MEV**	P.M. (%)
Método brasileiro	CP V-ARI	1,79	4,09	64	x	х	13
	CP II-F	0,45	1,41	59	x	х	10
	CP II-Z	0,01	0,48	24	x	x	12
	CP IV	0,07	1,35	16	-	x ¹	7
Método francês	CP V-ARI	0,10	0,90	11	-	х	nd
	CP IV	0,04	0,89	24	-	-	nd

Tabela <u>18</u>49 – Resumo dos resultados obtidos na idade final para cada análise realizada

V. D.: variação dimensional; V. M.: variação de massa; R.T.: resistência à tração. Para R.T. medição em percentual de perda da propriedade entre a idade de 84 dias e o final do ensaio (365 dias para o método brasileiro e 270 dias para o francês); * registro da pulverulência dos corpos de prova ** registro da presença de etringita neoformada; ¹registro de poucas aglomerações, sem etringita comprimida; P.M.: perda de massa obtida por análises térmicas na idade final; nd: Ensaio não determinado.

A partir dos resultados obtidos, e resumidos na Tabela 19, é possível concluir que existem diferenças de comportamento das argamassas entre os cimentos testados, bem como entre as metodologias avaliadas.

Para o método brasileiro verificou-se que o cimento do tipo CP V-ARI foi mais suscetível à DEF (expansões da ordem de 1,8%) devido à sua maior finura, ausência de adições e maior relação SO₃/Al₂O₃ (3,72%). Também foram registradas as maiores reduções de resistência à tração (64% entre a idade de 84 dias e 365 dias) e o maior

ganho de massa. Na inspeção visual foi constatada maior incidência de pulverulência e de produtos esbranquiçados disseminados na superfície dos compósitos. Nas análises por MEV foi constatada a presença de etringita neoformada de forma disseminada e na avaliação por TGA foram identificadas as maiores perdas de massa para o CP V-ARI.

O cimento CP II-F apresentou manifestações menos intensas da DEF em relação ao CP V-ARI, no entanto, também se mostrou suscetível à manifestação avaliada em vários dos ensaios realizados, o que pôde ser comprovado através da observação por MEV, da queda da resistência à tração (59% entre a idade de 84 dias e 365 dias), e elevada perda de massa associada às elevadas expansões (0,45%).

Já os compósitos contendo os cimentos CP II-Z e CP IV geraram menores expansões e variações de massa, porém pelo MEV, no método brasileiro, foi identificada aglomeração de etringita em poro e formações massivas na pasta de cimento para o cimento CP II-Z; algumas formações de etringita também foram observadas na presença do cimento CP IV, porém pontualmente.

Nas análises efetuadas com o método francês, foram visualizados cristais de etringita em poro, para o cimento CP V. Porém, devido à condição de exposição empregada no método Francês (20°C), o tempo de ensaio pode não ter sido suficiente para gerar expansões elevadas nas argamassas, sendo oportuno prolongar o tempo de avaliação nesse método, para os cimentos testados.

Ambos os métodos testados indicaram serem capazes de ativar e provocar a DEF. Porém, o método brasileiro empregado foi considerado com resposta mais rápida para a indução da DEF em argamassas, em âmbito laboratorial, uma vez que foi possível indicar diferentes níveis de expansão, dependendo do cimento, e gerar a a etringita neoformada de forma expressiva nas misturas com o cimento CP V-ARI, em especial, além de aglomerações de etringita e formação de cristais nos poros para os demais cimentos, associados às expansões e reflexos nas propriedades. O método francês mostrou-se menos agressivo no tempo avaliado, para argamassas com expansões abaixo de 0,10% em 270 dias, sendo observadas menores reduções de resistências e menores visualizações da DEF na inspeção visual e na microestrutura, com formações menos expressivas, pelo MEV (cristais nos poros). Portanto, apesar de existir coerência dos resultados entre os métodos testados, por análises comparativas para cada cimento (CP V e CP IV), os métodos não apresentaram níveis

equivalentes de expansão nem de danos, indicando diferentes estágios de ocorrência da DEF pelas diferenças executivas metodológicas.

Os procedimentos empregados para a indução da DEF influenciaram o comportamento das argamassas ao longo do tempo considerando as avaliações laboratoriais realizadas com as argamassas. O desenvolvimento das expansões foi mais acentuado na presença do cimento CP V-ARI, seguido pelo CP II-F, ao longo do tempo, comparativamente aos cimentos CP II-Z e CP IV. Ainda, no tempo, notou-se uma maior susceptibilidade de DEF pelo método brasileiro, no qual os CPs permaneceram aquecidos (38°C) até as idades de ensaio, em relação ao método francês, no qual os CPs permaneceram em temperatura ambiente (20°C).

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como contribuições para pesquisas futuras, na mesma linha de estudo, apresentam-se as seguintes sugestões:

- Avaliar outras temperaturas de cura (ex.: 65 °C e 75 °C) e de permanência dos CPS, a fim de estabelecer um comparativo com os resultados obtidos neste estudo para o método brasileiro;
- Realizar a pesquisa em argamassa, com o método francês, em idades mais avançadas, a fim de analisar a formação da DEF ao longo do tempo;
- Estudar a influência de diferentes tipos de adições minerais;
- Aprofundar o estudo da DEF em concretos e argamassas com a utilização de diferentes metodologias e dosagens.

REFERÊNCIAS

ADAMOPOULOU, E.; PIPILIKAKI, P.; KATSIOTIS, M. S.; CHANIOTAKIS, M.; KATSIOTI, M. How sulfates and increased temperature affect delayed ettringite formation (DEF) in white cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3583-3590, 2011.

AGUAS, M. F. F.; FAIRBAIRN, E. M. R.; FILHO, R. D. T.; HASPARYK, N. P.; CORDEIRO, G. G. Influence of sugarcane bagasse ash in the expansions of mortars affected by alkali-silica reaction. In: Proceeding of 15° International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – 15th ICAAR, Ed. Bernardes, H.; Hasparyk, N. P., São Paulo, 2016.

AL SHAMAA, M.; LAVAUD, S.; DIVET, L.; COLLIAT, J. B.; NAHAS, G.; TORRENTI, J. M. Influence of limestone filler and of the size of the aggregates on DEF. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 175-180, 2016.

ALLAHYARI, H.; HEIDARPOUR, A.; SHAYAN, A.; NGUYEN, V. P. A robust timedependent model of alkali-silica reaction at different temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 106, 2020.

ALARCON-RUIZ, L., PLATRERT, G., MASSIEU, E.; EHRLACHER, A. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 35(3), p. 609-613, 2005.

ALLARD, A.; BILODEAU, S.; PISSOT, F.; FOURNIER, B.; BASTIEN, J.; BISSONNETTE, B. Performance evaluation of thick concrete slabs affected by alkalisilica reaction (ASR): Parte 1: Material aspects. In: Proceeding of 15° International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – 15th ICAAR, São Paulo, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-150M:** Standard specification for Portland cement. West Conshohocken, 2009.

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

ANJOS, M. A. S.; CAMÕES, A.; JESUS, C.; DUARTE, F. Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais. **Revista Engenharia Civil**, nº 44, p. 41-58, 2012.

ANJOS, M. A.; MARTINELLI, A. E.; MELO, D. Effect of sugarcane biomass waste in cement slurries submitted to high temperature and pressure. **Materials Science and Engineering**: A, v. 529, p. 49-54, 2011.

_____. **ASTM C-1012:** Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution, 2019.

ARMANGE, L. C. **Utilização de areia e fundição residual para uso em argamassa.** Dissertação de Mestrado – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2005.

ASAMOTO, S. MURANO, K. KURASHIGE, I. NANAYAKKARA, A. Effect of carbonate ions on delayed ettringite formation. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 221-226, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Guia básico de utilização do cimento Portland, 7 ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15577-4:** Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2013.

_____. 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 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739:** Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118:** Projetos de Estrutura 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. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 12006:** Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM-30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM-45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM-46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM-53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

AUBERT, J. E.; ESCADEILLAS, G.; LEKLOU, N. Expansion of five-year-old mortars attributable to DEF: Relevance of the laboratory studies on DEF? **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 3583-3585, 2009.

BARBARULO, R.; PEYCELON, H.; PRENÉ, S.; MARCHAND, J. Delayed ettringite formation symptoms on mortars induced by high temperature due to cement heat of hydration or late thermal cycle. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 125-131, 2005.

BATIC, O. R.; MILANESI, C. A.; MAIZA, P. J.; MARFIL, S. A. Secondary ettringite formation in concrete subjected to different curing conditions. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1407-1412, 2000.

BAUER, S.; CORNELL, B.; FIGURSKI, D.; LEY, T.; MIRALLES, J.; FOLLIARD, K. Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation in Concrete: A Literature Review. CTR Technical Report, **Report n. FHWA/TX-06/0-4085-1**. Center for Transportation Research, Texas, 2006.

BEHFARNIA, K.; ROSTAMI, M. An assessment on parameters affecting the carbonation of alkali-activated slag concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 157, p. 1-9, 2017.

BI, R.; CHENG, W.; CHEN, X. Effect of calcium sulfate variety and content on hydration mechanism of grout sealants for coal-bed methane drainage boreholes. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 443-455, 2019.

BINGOL, A, F.; TOHUMCU, I. Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. **Materials & Design**, v. 51, p. 12-18, 2013.

BLACK, L.; GARBEV, K.; STEMMERMANN, P.; HALLAM, K. R.; ALLEN, G. C. Characterization of crystalline CSH phases by X-ray photoelectron spectroscopy. **Cement and concrete research**, n^o 33 (6), p. 899-911, 2003.

BOUZABATA, H.; MULTON, S.; SELLIER, A.; HOUARI, H. Effects of restraint on expansion due to delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, n^o 42, p. 1024-1031, 2012.

BRITO, M. H. G. **Influência da cura térmica a vapor sob pressão atmosférica em características e propriedades de blocos de concreto**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

BRONHOLO, J. L. 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 de Mestrado – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Cutitiba, 2020.

BRONHOLO, J. L.; MIRANDA, D. C.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; PORTELLA, K. F.; FIGUEIRA, I.; MEDEIROS, B. L.; HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. Avaliação do potencial de reatividade álcali-agregado de areias naturais do estado do Paraná. **Revista Técnico-Científica**, setembro, 2019.

BROWN, P. B. Thaumasite formation and other forms of sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**, nº 24, p. 301-303, 2002.

BRUNETAUD, X.; DIVET, L.; DAMIDOT, D. Impact of unrestrained Delayed Ettringite Formation-induced expansion on concrete mechanical properties. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 1343-1348, 2008.

BRYANT, L. B. Expansion of cementitious mortars due to delayed ettringite formation. **Tennessee Technological University**, 2011.

CAMACHO, A. L. D.; CAMACHO, D. L. D.; MANCIO, M. Avaliação do aumento da reatividade da cinza volante através do método sonoquímico. **Revista Matéria**, v.23, n. 03, 2018.

CASANOVA, I.; AGULLÓ, L.; AGUADO, A. "Aggregate expansivity due to sulfide oxidation - I. Reaction system and rate model", **Cement and Concrete Research**, v.26, n. 7, p. 993-998, 1996.

CEZAR, D. S. Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2011.

CHINDAPRASIRT, P.; KANCHANDA, P.; SATHONSAOWAPHAK, A.; CAO, H. T. Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 6, p. 1356-1361, 2007.

COLLEPARDI, M. Concrete Institute, v. 21, n. 1, p. 69-74, 1999.

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

COLLEPARDI, M.; OLAGOT, J. J. O.; SALVIONI, D.; SORRENTINO, D. DEF – Related Expansion of concrete as a function of Sulfate Content in the clinker phase or cement and curing temperature. **ACI Materials Journal**, 2004.

COLOMBO, A.; GEIKER, M.; JUSTNES, H.; LAUTEN, R. A.; WEERDT, K. D. The effect of calcium lignosulfonate on ettringite formation in cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 107, p. 188-205, 2018.

COSTA, M. R. M. M.; CINCOTTO, M. A. **Metodologia de caracterização de argamassas colantes**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. 23p. São Paulo/ SP, 2007.

COUTINHO, J. S. Materiais de Construção 2 – Ligantes e Caldas. FEUP. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto – Portugal, 2006.

CRAMMOND, N. J. The thaumasite form of sulfate attack in the UK. **Cement and Concrete Composites**, nº 25, p. 809-818, 2003.

DAYARATHNE, W. H. R. S.; GALAPPATHTHI, G. S. PERERA, K. E. S.; NANAYAKKARA, S. M A. **Evaluation of the potential for delayed ettringite formation in concrete**. National Engineering Conference, University of Moratuwa, Sri Lanka, 2013.

DESCHNER, F.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; NEUBAUER, J. Effect of temperature on the hydration of Portland cement blended with siliceous fly ash. **Cement and concrete research**, v. 52, p. 169-181, 2013.

DIAMOND, S. Delayed ettringite formation — Processes and problems. **Cement and Concrete Composites**. v. 18, n. 3, p. 205-215, 1996.

EKOLU, S. O.; THOMAS, M. D. A.; HOOTON, R. D. Pessimum effect of externally apllied chlorides on expansion due to delayed ettringite formation: Proposed mechanism. **Science Direct**. v. 36, p. 688-696, 2006.

FERRARIS, C. F.; CLIFTON, J. F.; STUTZMAN, P. E.; GARBOCZI, E. J.; Mechanisms of degradation of Portland cement-based systems by sulfate attack. In: L. L. SCRIVENER, J. F. YOUNG. **Mechanisms of Chemical Degradation of Cement based Systems**, London: E & FN Spon, p. 185-192, 1997.

FERREIRA, E. G. A. **Avaliação da alteração nas propriedades da pasta de cimento em ambiente de repositório**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

HOPPE FILHO, J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; PORTELLA, K. F. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**. v. 61, p. 168-177, 2015.

FU, Y.; BEADOIN, J. J. **Microcracking as a precursor to delayed ettringite formation in cement systems**. Cement and concrete research, v. 26, p. 1493-1498, 1996.

GAMBALE, P. G.; GAMBALE, E. A.; HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. Análises térmicas em blocos de concretos e avaliação da presença de DEF. **61º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo, IBRACON, 2019.

GIANNINI, E. R.; SANCHEZ, L. F. M.; TUINUKUAFE, A.; FOLLIARD, K. J. 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.; OMIKRINE-METALSSI, O.; KCHAKECH, B.; LAVAUD, S. The effects of Delayed Ettringite Formation on the expansion of a massive bridge pier and a precast prestressed concrete beam of a bridge. In: Proceeding of 15° International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – 15th ICAAR, São Paulo, 2016.

GODART, B. Pathology, Assessment and Treatment of Structures Affected by Delayed Ettringite Formation. **Structural Engineering International**, v. 27, n. 3, p. 362-369, 2017.

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

GRAF, L. Effect of relative humidity on expansion and microstructure of heat-cured mortars. **Portland Cement Association.** 2007.

GU, Y.; MARTIN, R. P.; METALSSI, O. O.; FEN-CHONG, T.; DANGLA, P. Pore size analyses of cement paste exposed to external sulfate attack and delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 23, 2019.

HABUCHI, T.; KAWABATA, Y.; KAWAMURA, N.; TANAKA, R.; KUTSUNA, J.; YAMAJI, T.; KIYOMIYA, O. Study on ASR expansion and its suppressing measures of self-compacting concrete using sea water. In: Proceeding of 15° International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – 15th ICAAR, São Paulo, 2016.

HAYES, N. W.; GIORLA, A. B.; TRENT, W.; CONG, D.; LE PAPE, Y.; MA, Z. J. Effect of alkali-silica reaction on the fracture properties of confined concrete. **Construction and Building Materials**, 2020.

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. **Reação álcali-agregado no concreto**. In: Concreto, Ciência e Tecnologia. Ed. Geraldo C. Isaía, IBRACON, 1^a Ed., v. 2, pp.933-1001. São Paulo-SP, 2011.

HASPARYK, N. P. Investigação de concretos afetados pela reação álcaliagregado e caracterização avançada do gel exsudado. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

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

HASPARYK. N. P.; KUPERMAN, S. Reações expansivas deletérias no concreto. **Revista Concreto & Construções**, ed. 102, p. 66, abr-jun, 2021.

HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C.; TORRES, J. R. Estudo de caso envolvendo

ataque combinado da RAS e DEF em concreto de fundação de edificação. 54° Congresso Brasileiro do Concreto, Maceió-AL, 2012.

HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C.; TORRES, J. R. Combined attack from ARS and DEF in the foundation. In: Proceeding of 15° International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – 15th ICAAR, Ed. Bernardes, H.; Hasparyk, N.P. São Paulo, 2016.

HASPARYK, N. P.; SCHOVANZ, D.; KUPERMAN, S. Método de Ensaio para a Avaliação do Potencial de Ocorrência da Etringita Tardia (DEF) em Concreto – Instrução Técnica ITGSTE004. Ed. Furnas. Goiânia, 2020.

HEINZ, D.; KALDE, M.; LUDWIG, 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. 1-13, 1999.

ISAIA, G.; C. Concreto: ciência e tecnologia. IBRACON, São Paulo, 2011.

JEONG, J.; RAMÉZANI, H.; LEKLOU, N. Porous-micro-dilatation theory for random crystallization: Monte Carlo simulation for delayed ettringite formation. **Acta Mechanica**, v. 228, n. 9, p. 3223-3249, 2017.

KADRI, E. H.; DUVAL, R. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 3, p. 138-142, 2002.

KARTHIK, M. M.; MANDER, J. B.; HURLEBAUS, S. Experimental Behavior of Large Reinforced Concrete Specimen with Heavy ASR and DEF Deterioration. **Journal of Structural Engineering.** v. 144, issue 8, 2018.

KATSIOTI, M.; PATSIKAS, N.; PIPILIKAKI, P.; KATSIOTIS, N.; MIKEDI, K.; CHANIOTAKIS, M. Delayed ettringite formation (DEF) in mortars of white cement. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 900-905, 2011.

KCHAKECH, B.; MARTIN, R. P.; OMIKRINE-METALSSI, 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. In: Proceeding of 15^o International Conference on Alkaki Aggregate Reaction in Concrete - 15th ICAAR, São Paulo, 2016.

KIRCHHEIM, A. P.; SOUZA, R. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. Álcalis incorporados ao aluminato tricálcico: efeitos na hidratação. **Revista Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, p. 177-189. Porto Alegre, 2010.

KIRCHHEIM, A. P.; RODRÍGUEZ, E. D.; MYERS, R. J.; GOBBO, L. A.; MONTEIRO, P. J. M.; DAL MOLIN, D. C. C.; SOUZA, R. B.; CINCOTTO, M. A. Effect of Gypsum on the Early Hydration of Cubic and Na-Doped Orthorhombic Tricalcium Aluminate. **Materials**, v. 11, 2018.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES. Guide technique -

Recommendations for preventing disorders due to Delayed Ettringite Formation. Paris, 2009.

LEKLOU, N.; NGUYEN, V. H.; MOUNANGA, P. The effect of the Partial Cement Substitution with fly ash on delayed ettringite formation in heat-cured mortars. **Journal of Civil Engineering**, v. 21, p. 1359-1366, 2017.

LIMA, A. L. C. Influência da presença de sulfetos na implantação da UHE Irapé – Vale do Jequitinhonha – Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2009.

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: Proceeding of 15° International Conference on Alkaki Aggregate Reaction in Concrete - 15th ICAAR, São Paulo, 2016.

MA, K.; LONG, GUANGCHENG.; XIE, YOUJUN. A real case of steam-cured concrete track slab premature deterioration due to ASR to DEF. **Case Studies in Construction Materials**, p. 63-71, 2017.

MAIA, J. L. **Uso de resíduos em sistemas cimentícios – Aplicação do método físico-químico para otimização de formulações**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

MALBOIS, M.; NEDJAR, B.; LAVAUD, S.; ROSPARS, C.; DIVET, L. TORRENTI, J. M. On DEF expansion modelling in concrete structures under variable hydric conditions. **Construction and Building Materials.** (207), p. 396 – 402, 2019.

MARTIN, R. P.; BAZIN, C.; TOUTLEMONDE, F. Alkali Aggregate Reaction and Delayed Ettringite Formation: common features and differences. In: Proceeding of 14º International Conference on Alkaki Aggregate Reaction in Concrete - 14th ICAAR, Texas, 2012.

MARTIN, R. P.; SANCHEZ, L.; FOURNIER, B.; TOUTLEMONDE, F. Diagnosis of ARR and DEF: comparison of residual expansion, stiffness damage test and damage rating index. In: Proceeding of 15^o International Conference on Alkaki Aggregate Reaction in Concrete - 15th ICAAR, São Paulo, 2016.

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

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

MELO, S. K.; HASPARYK, N. P.; CARASEK, H. Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em concreto de cimento Portland pozolânico por calor de hidratação. In: 52° Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON. **Anais...** 52CBC, 2010.

MOFFATT, E. G.; THOMAS, M. D. A.; FOURNIER, S. H. B.; IDEKER, J.; FLETCHER, J. Remediation strategies intended for the reconstruction of the ASR-induced Mactaquac dam. In: Proceeding of 15^o International Conference on Alkaki Aggregate Reaction in Concrete - 15th ICAAR, São Paulo, 2016.

MONTEIRO, P. J. M.; KURTIS, K. E. **Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack.** Cement and Concrete Research. (33), p. 987 – 993, 2003.

MOSTAFA, N. Y.; BROWN, P. W. Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: Isothermal conduction calorimetry. **Thermochimica Acta**, v. 435, p. 162-167, 2005.

MYURAN, K.; WANIGARATNE, N. S. A.; JAYASINGHE, M. T. R. Strategies for Prevention of Delayed Ettringite Formation in large **Concrete Sections. Engineers**. **Journal of the Institution of Engineers**, Sri Lanka, v. 48, n. 2, 2015.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2ª ed. São Paulo: PINI, 1997.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto-5ª Edição. Bookman Editora, 2015.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013

NÓBREGA, A. K. C. Formulação de pastas cimentícias com adição de suspensões de quisotana para cimentação de poços de petróleo. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2009.

NOEL, M.; SANCHEZ, L.; MARTIN, R. P.; FOURNIER, B.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D. Structural implications of internal swelling reactions in concrete: a review. **Magazine** of Concrete Research, v. 70, p. 1052 - 1063, 2016.

ODLER, I. Hydration, setting and hardening of Portland cement. In: HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4 ed. China: Elsevier: Butterworth Heinemann, p.241-298, 2007.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-acúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2006.

PAULA, L. G. Análise termoeconômica do processo de produção de cimento Portland com Co-processamento de misturas de resíduos. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais, 2009.

PAULETTI, C. Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

QUARCIONI, V. A. Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento portland: estudo em pasta. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
RAISDORFER, J. W. Influência da adição ou da substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Paraná, 2015.

RAMLOCHAN, T. ZACARIAS, P. THOMAS, M. D. A. HOOTON, R. D. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part I: Expansive behavior. **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.

ROMANO, R. C. O.; FUJII, A. L.; SOUZA, R. B.; TAKEASHI, M. S.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**, v. 62, p. 215-223, 2016.

SALUM, P. L. Efeito da elevação de temperature sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

SANCHEZ, L. F. M. Contribution to the assessment of damage in aging concrete infrastructures affected by alkali-aggregate reaction, PhD thesis, Université Laval, QC, 2014.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J. Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkalisilica reaction (ASR): Input parameters and variability of the test responses. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 20-32, 2015.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; DUCHESNE, J. Reliable quantification of AAR damage through assessment of the damage rating index (DRI). **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 74-92, 2015.

ROMANO, R. C. O; FUGGI, A. L.; SOUZA, R. B.; TAKEASKI, M. S.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**, v. 62, p. 215-223, 2016.

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**, v. 107, p. 284-303, 2018.

SALUM, P. L. Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

SCHMALZ, R. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos:** efeito da adição da nanosílica. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 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 – IMED. Passo Fundo, 2019.

SCHOVANZ, D.; TIECHER, F.; HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. Influência da formação da etringita tardia (DEF) na microestrutura e propriedades mecânicas do concreto. **61º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2019**, Fortaleza, 2019.

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

SILVA, D. L. et al. Considerações sobre a formação de etringita tardia (DEF). **Construindo**, v. 9, n. 2, p. 36-46, 2018.

SILVA, I. J. Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: Propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo – São Carlos, 2000.

SOLLERO, M. B. S.; BAIMA, L. Q. G.; BOLORINO, H. Investigation and assessment of alkali aggregate reaction (AAR) in the Pirapora Dam. In: Proceeding of 15° International Conference on Alkaki Aggregate Reaction in Concrete - 15th ICAAR, São Paulo, 2016.

SOUZA, R. B. Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TANKASALA, A.; SCHINDLER, A. K. Effect of lightweight aggregate on early-age cracking of mass concrete. Tese de Doutorado – Auburn University – São Auburn Alabama, 2017.

TAYLOR, H. F. W. Cement chemistry. London: Thomas Telford, 2 nd edition, 1998.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. Delayed Ettringite Formation. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 683-693, 2001.

TIECHER, F. Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

THIEBAUT, Y.; MULTON, S.; SELLIER, A.; LACARRIERE, L.; BOUTILLON, L.; BELILI, D.; LINGER, L.; CUSSIGH, F.; HADJI, S. Effects of stress on concrete expansion due to delayed ettringite formation. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 626-641, 2018.

THOMAS, M.; FOLLIARD, K.; DRIMALAS, T.; RAMLOCHAN, T. Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p.

841-847, 2008.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T. Análise de risco da formação de etringita tardia em blocos de fundação na região metropolitana de Recife – PE - Brasil. **Revista Ibracon de Estruturas e Materia**is; v. 9, n. 3, p. 357 – 394, 2016.

TOSUN, H. Effect of SO3 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.

TOSUN, K.; BARADAN, B. Effect of ettringite morphology on DEF-related expansion. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 4, p. 271–280, 2010.

TRENTIN, P. O. **Comportamento do cimento supersulfatado (CSS) exposto ao ataque por sulfatos de origem externa.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. UTFPR, Pato Branco, 2020.

WIGUM, B. J.; PEDERSEN, L. T.; GRELK, B.; LINDGARD, J. State-of-the-art report: key parameters influencing the alkali aggregate reaction. PARTNER project (report 2.1), SINTEF, 2006.

ZHANG, J. P.; LIU, L. M.; LI, Q. H.; PENG, W.; ZHANG, F. T.; CAO, J. Z.; WANG, H. Development of cement-based self-stress composite grouting material for reinforcing rock mass and engineering application. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 314-327, 2019.

ZHANG, Z.; OLE, J.; DIAMOND. S. Studies on delayed ettringite formation in earlyage, 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.

ZHUANG, S.; SUN, J. The feasibility of properly raising temperature for preparing highvolume fly ash or slag steam-cured concrete: An evaluation on DEF, 4-year strength and durability. **Construction and Building Materials**, v. 242, 2020.

APÊNDICE A

A Tabela 20 apresenta os resultados de expansão obtidos a partir do ensaio de reatividade potencial do agregado para a RAS (segundo a ABNR NBR 15577, Parte 4), e a Figura 42 a reatividade potencial do agregado.

ldade (dias	Expansão (%)
0	0
2	0,00
5	0,00
8	0,02
10	0,02
12	0,03
15	0,04
17	0,05
19	0,06
22	0,07
26	0,08
30	0,09

Tabela <u>1920</u> – Reatividade potencial do agregado



Figura <u>4042</u> – Reatividade potencial do agregado

APÊNDICE B

A variação dimensional dos prismas foi verificada semanalmente, na Tabela B1 é possível verificar as medidas individuais e médias das argamassas com o CP V-ARI. Na Tabela B2 estão apresentados os resultados para as argamassas com o cimento CP IV, e nas tabelas B3 e B4 para os cimentos CPII Z e CPII F, respectivamente.

Idado (dias)	Expansões (%)							
luaue (ulas)	Exp1	Exp2	Exp3	Exp-M	Desvio	CV (%)		
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
7	0,12	0,12	0,00	0,08	0,072	8,70		
14	0,12	0,13	0,01	0,09	0,068	7,90		
21	0,16	0,14	0,01	0,10	0,081	8,00		
28	0,17	0,18	0,04	0,13	0,076	5,80		
35	0,17	0,18	0,04	0,13	0,076	5,80		
42	0,17	0,18	0,04	0,13	0,076	5,80		
49	0,18	0,18	0,04	0,13	0,079	5,80		
56	0,18	0,18	0,06	0,14	0,072	5,20		
63	0,20	0,19	0,06	0,15	0,079	5,40		
70	0,20	0,19	0,06	0,15	0,079	5,40		
77	0,20	0,19	0,06	0,15	0,079	5,20		
84	0,20	0,19	0,07	0,15	0,072	4,80		
91	0,20	0,19	0,07	0,15	0,072	4,80		
97	0,20	0,19	0,07	0,15	0,072	4,80		
118	0,20	0,22	0,08	0,16	0,077	4,70		
125	0,22	0,22	0,10	0,18	0,070	4,00		
132	0,22	0,22	0,12	0,18	0,059	3,20		
139	0,22	0,23	0,12	0,19	0,059	3,10		
146	0,23	0,23	0,15	0,20	0,047	2,30		
153	0,17	0,27	0,18	0,21	0,056	2,70		
160	0,28	0,33	0,21	0,27	0,063	2,30		
167	0,30	0,35	0,24	0,30	0,054	1,80		
174	0,36	0,36	0,33	0,35	0,020	0,60		
181	0,44	0,47	0,44	0,45	0,016	0,40		
188	0,50	0,49	0,48	0,49	0,010	0,20		
195	0,53	0,52	0,54	0,53	0,011	0,20		
202	0,63	0,66	0,67	0,66	0,021	0,30		
216	0,71	0,72	0,72	0,72	0,008	0,10		
230	0,70	0,74	0,76	0,73	0,032	0,40		
244	0,71	0,74	0,76	0,73	0,026	0,40		
258	0,70	0,74	0,76	0,73	0,032	0,40		
272	0,78	0,79	0,85	0,81	0,041	0,50		
286	0,86	0,88	0,88	0,87	0,010	0,10		
301	0,92	0,94	0,94	0,93	0,016	0,20		
315	0,98	0,96	1,03	0,99	0,036	0,40		
322	1,04	1,07	1,14	1,08	0,051	0,50		
336	1,52	1,49	1,62	1,54	0,067	0,40		
350	1,61	1,59	1,70	1,63	0,060	0,40		
365	1,74	1,75	1,89	1,79	0,084	0,50		

Tabela B1 – Resultados das expansões das argamassas com cimento CPV-ARI

Idado (dias)	Expansões (%)								
luaue (ulas)	Exp1	Exp2	Exp3	Exp-M	Desvio	CV (%)			
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
7	0,10	0,03	0,00	0,04	0,049	11,50			
14	0,14	0,08	0,00	0,07	0,070	9,70			
21	0,14	0,08	0,00	0,07	0,070	9,70			
28	0,14	0,08	0,00	0,07	0,070	9,70			
35	0,14	0,08	0,00	0,07	0,070	9,70			
42	0,14	0,08	0,00	0,07	0,070	9,70			
49	0,15	0,08	0,00	0,07	0,074	9,90			
56	0,15	0,08	0,00	0,07	0,074	9,90			
63	0,15	0,08	0,00	0,07	0,074	9,90			
70	0,15	0,08	0,00	0,07	0,074	9,90			
77	0,15	0,08	0,00	0,07	0,074	9,90			
84	0,15	0,08	0,00	0,07	0,074	9,90			
105	0,09	0,04	0,00	0,04	0,069	16,20			
112	0,12	0,05	0,00	0,06	0,074	12,90			
119	0,13	0,07	0,00	0,07	0,073	10,90			
126	0,13	0,07	0,00	0,07	0,073	10,90			
133	0,13	0,08	0,00	0,07	0,075	10,60			
140	0,09	0,09	0,00	0,06	0,054	9,10			
147	0,12	0,06	0,00	0,06	0,070	11,70			
154	0,12	0,06	0,00	0,06	0,066	11,00			
161	0,13	0,02	0,00	0,05	0,074	14,70			
168	0,14	0,08	0,01	0,08	0,068	9,00			
175	0,14	0,06	0,00	0,07	0,070	10,30			
182	0,13	0,06	0,00	0,06	0,068	11,10			
189	0,14	0,06	0,00	0,07	0,086	12,90			
203	0,15	0,07	0,00	0,07	0,090	12,50			
217	0,14	0,03	0,00	0,06	0,087	14,90			
231	0,14	0,03	0,00	0,06	0,087	14,90			
245	0,14	0,03	0,00	0,06	0,087	14,90			
259	0,14	0,03	0,00	0,06	0,087	14,90			
273	0,17	0,00	0,00	0,06	0,119	20,70			
280	0,12	0,05	0,00	0,06	0,102	17,70			
295	0,09	0,03	0,00	0,04	0,064	16,60			
310	0,10	0,05	0,00	0,05	0,096	19,50			
317	0,08	0,00	0,00	0,02	0,084	35,00			
331	0,17	0,09	0,00	0,09	0,096	11,30			
345	0,15	0,06	0,00	0,07	0,075	10,80			
359	0,16	0,07	0,00	0,08	0,088	11,40			
365	0,14	0,05	0,00	0,07	0,082	12,60			

Tabela B2 - Resultados das expansões das argamassas com cimento CPIV

Idada (diac)	Expansões (%)								
	Exp1	Exp2	Exp3	Exp-M	Desvio	CV (%)			
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
7	0,14	0,00	0,00	0,05	0,083	17,34			
14	0,15	0,00	0,00	0,05	0,086	17,34			
21	0,16	0,00	0,02	0,06	0,085	14,56			
28	0,16	0,00	0,02	0,06	0,085	14,56			
35	0,18	0,00	0,04	0,07	0,093	13,16			
42	0,18	0,00	0,04	0,07	0,093	13,16			
49	0,18	0,00	0,04	0,07	0,093	13,16			
56	0,18	0,00	0,04	0,07	0,093	13,16			
63	0,18	0,00	0,04	0,07	0,093	13,16			
70	0,18	0,00	0,04	0,07	0,093	13,16			
91	0,15	0,00	0,00	0,04	0,098	24,43			
98	0,15	0,00	0,02	0,05	0,089	17,18			
105	0,16	0,00	0,02	0,05	0,094	17,17			
112	0,16	0,00	0,02	0,06	0,092	16,48			
119	0,16	0,00	0,02	0,06	0,092	16,48			
126	0,16	0,00	0,00	0,04	0,104	26,78			
133	0,00	0,00	0,02	0,00	0,038	0,00			
140	0,14	0,00	0,02	0,05	0,080	16,24			
147	0,18	0,00	0,00	0,04	0,115	26,17			
154	0,16	0,00	0,01	0,04	0,111	26,84			
161	0,15	0,00	0,00	0,04	0,096	22,51			
168	0,15	0,00	0,01	0,05	0,101	19,85			
175	0,19	0,00	0,03	0,07	0,107	15,19			
189	0,16	0,00	0,02	0,05	0,101	19,85			
203	0,17	0,00	0,04	0,06	0,098	16,37			
217	0,17	0,00	0,04	0,06	0,098	16,37			
231	0,17	0,00	0,04	0,06	0,098	16,37			
245	0,17	0,00	0,04	0,06	0,098	16,37			
259	0,12	0,00	0,00	0,02	0,088	43,86			
266	0,11	0,00	0,00	0,01	0,086	58,32			
281	0,10	0,00	0,00	0,02	0,072	31,68			
296	0,08	0,00	0,00	0,00	0,064	23,92			
303	0,12	0,00	0,00	0,02	0,093	49,81			
317	0,16	0,02	0,02	0,06	0,080	12,45			
331	0,16	0,01	0,04	0,07	0,079	11,13			
345	0,17	0,00	0,04	0,07	0,088	11,97			
359	0,18	0,02	0,02	0,08	0,094	12,31			
365	0.14	0.00	0.03	0.05	0.080	15.87			

Tabela B3 - Resultados das expansões das argamassas com cimento CPII Z

Idada (dias)			Exp	ansões (%	b)	
luaue (ulas)	Exp1	Exp2	Exp3	Exp-M	Desvio	CV (%)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,02	0,03	0,02	0,03	0,006	2,41
14	0,02	0,03	0,04	0,03	0,010	3,02
21	0,02	0,04	0,06	0,04	0,016	3,91
28	0,02	0,04	0,06	0,04	0,016	3,91
35	0,02	0,04	0,06	0,04	0,016	3,91
42	0,02	0,04	0,06	0,04	0,018	4,23
49	0,02	0,04	0,06	0,04	0,018	4,23
56	0,02	0,04	0,06	0,04	0,018	4,23
77	0,02	0,03	0,00	0,01	0,035	43,59
84	0,02	0,03	0,00	0,02	0,017	8,92
91	0,02	0,04	0,00	0,02	0,020	9,44
98	0,02	0,04	0,01	0,03	0,014	5,55
105	0,02	0,04	0,01	0,03	0,014	5,55
112	0,04	0,00	0,00	0,00	0,055	0,00
119	0,06	0,02	0,02	0,03	0,027	7,99
126	0,04	0,04	0,00	0,03	0,025	8,66
133	0,02	0,01	0,00	0,01	0,010	7,55
140	0,04	0,03	0,09	0,05	0,029	5,39
147	0,05	0,04	0,03	0,04	0,011	2,65
154	0,03	0,04	0,04	0,04	0,004	1,11
161	0,07	0,06	0,04	0,06	0,016	2,82
175	0,10	0,06	0,05	0,07	0,026	3,64
189	0,03	0,02	0,02	0,03	0,005	1,73
210	0,03	0,02	0,02	0,03	0,005	1,73
224	0,03	0,02	0,02	0,03	0,005	1,73
238	0,03	0,02	0,02	0,03	0,005	1,73
252	0,04	0,01	0,03	0,03	0,016	5,51
259	0,10	0,04	0,00	0,01	0,106	9,38
274	0,04	0,06	0,04	0,05	0,007	14,40
289	0,08	0,00	0,06	0,05	0,042	8,92
296	0,07	0,04	0,09	0,06	0,026	4,10
310	0,23	0,17	0,25	0,22	0,041	1,89
324	0,28	0,19	0,28	0,25	0,052	2,06
338	0,32	0,25	0,32	0,30	0,042	1,40
352	0,49	0,36	0,49	0,44	0,076	1,72
365	0,48	0,36	0,51	0,45	0,078	1,72

Tabela B4 - Resultados das expansões das argamassas com cimento CPII F

APÊNDICE C

A Tabela C1 apresenta os resultados de variação de massa semanalmente, assim como a média e desvio padrão, para as argamassas com cimento Portland CP V-ARI. A Tabela C2 apresenta os resultados de variação de massa para as argamassas produzidas com cimento CPIV, e as tabelas C3 e C4 para as argamassas com cimento CPII Z e CPII F, respectivamente.

ldade (dias)	1/4	1/2	varia	$\frac{vaiiayau ut iiidssa (\%)}{\sqrt{2}}$				
	V1		V3	V IVI (%)				
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
	0,64	0,18	0,02	0,28	0,321	11,57		
14	0,70	0,31	0,09	0,37	0,309	8,45		
21	0,70	0,31	0,09	0,37	0,312	8,50		
28	0,94	0,31	0,27	0,51	0,374	7,40		
35	1,02	0,47	0,30	0,59	0,375	6,32		
42	1,02	0,47	0,30	0,59	0,375	6,32		
49	1,03	0,47	0,30	0,60	0,383	6,41		
56	1,62	1,12	1,00	1,25	0,329	2,63		
63	1,62	1,12	1,00	1,25	0,329	2,63		
70	1,76	1,12	1,00	1,30	0,406	2,14		
77	1,76	1,29	1,24	1,43	0,288	2,01		
84	1,76	1,29	1,24	1,43	0,288	2,01		
91	1,76	1,29	1,24	1,43	0,288	2,01		
97	1,76	1,29	1,24	1,43	0,287	2,01		
118	1,64	1,06	0,92	1,21	0,385	3,19		
125	1,77	1,19	1,04	1,34	0,384	2,88		
132	1,79	1,19	1,04	1,34	0,396	2,95		
139	1,79	1,24	1,19	1,41	0,334	2,37		
146	1,81	1,31	1,17	1,43	0,332	2,32		
153	1,86	1,36	1,28	1,50	0,311	2,07		
160	1,95	1,43	1,40	1,60	0,311	1,95		
167	2,27	1,71	1,64	1,87	0,347	1,85		
174	2,21	1,71	1,53	1,82	0,349	1,92		
181	2,34	1,81	1,77	1,97	0,314	1,59		
188	2,35	1,89	1,88	2,04	0,268	1,31		
195	2,60	2,14	2,11	2,28	0,278	1,22		
202	2,44	1,98	1,93	2,12	0,278	1,32		
209	2,59	2,08	2,07	2,25	0,300	1,33		
223	2,64	2,20	2,06	2,30	0,304	1,32		
237	2,63	2,16	2,09	2,29	0,292	1,27		
244	2,65	2,20	2,17	2,34	0,272	1,16		
258	2,70	2,16	2,27	2,38	0,290	1,22		
272	2,92	2,39	2,36	2.56	0.315	1.23		
286	3,11	2,60	2,56	2.76	0.305	1.11		
301	3,27	2,74	2,67	2.89	0.329	1.14		
315	3.48	2.97	2.83	3.10	0.343	1.11		
322	3.94	3.31	3.31	3.52	0.363	1.03		
336	4 25	3.65	3.66	3.85	0.340	0.88		
350	4.33	3.81	3.80	3.98	0,301	0.76		
365	4.41	3.84	4.00	4.09	0.294	0.72		

Tabela C1 – Resultados de variação de massa ao longo do tempo para as argamassas com cimento CPV-ARI

	Variação de massa (%)						
ldade (días)	V1	V2	V3	VM (%)	Desvio padrão	CV (%)	
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
7	0,39	0,83	0,65	0,62	0,218	3,50	
14	0,40	0,83	0,65	0,63	0,214	3,43	
21	0,41	0,83	0,72	0,65	0,216	3,32	
28	0,41	0,83	0,72	0,65	0,216	3,32	
35	0,41	0,83	0,72	0,65	0,216	3,32	
42	0,94	1,04	1,07	1,02	0,067	0,66	
49	0,97	1,04	1,07	1,03	0,050	0,49	
56	1,26	1,32	1,07	1,22	0,131	1,08	
63	1,44	1,32	1,25	1,34	0,094	0,70	
70	1,44	1,32	1,25	1,34	0,094	0,70	
77	1,44	1,32	1,25	1,34	0,094	0,70	
84	1,44	1,33	1,26	1,35	0,091	0,68	
105	0,98	0,99	0,84	0,93	0,083	0,89	
112	1,09	1,11	0,91	1,03	0,112	1,08	
119	1,13	1,12	0,97	1,07	0,088	0,82	
126	1,14	1,19	0,99	1,11	0,101	0,92	
133	1,16	1,19	1,00	1,11	0,103	0,93	
140	1,21	1,22	1,06	1,17	0,088	0,75	
147	1,20	1,20	1,02	1,14	0,104	0,91	
154	1,41	1,30	1,23	1,31	0,093	0,70	
161	1,33	1,33	1,13	1,26	0,115	0,91	
168	1,36	1,32	1,16	1,28	0,108	0,84	
175	1,37	1,30	1,13	1,27	0,120	0,95	
182	1,42	1,41	1,14	1,32	0,160	1,21	
189	1,28	1,30	1,11	1,23	0,106	0,86	
196	1,36	1,30	1,16	1,28	0,100	0,79	
210	1,35	1,14	1,04	1,18	0,160	1,36	
224	1,34	1,23	1,08	1,22	0,133	1,09	
231	1,35	1,30	1,08	1,24	0,145	1,17	
245	1,37	1,32	1,08	1,26	0,157	1,25	
259	1,40	1,34	1,08	1,27	0,170	1,33	
273	1,42	1,35	1,20	1,32	0,113	0,85	
280	1,46	1,39	1,23	1,36	0,116	0,85	
295	1,42	1,39	1,24	1,35	0,096	0,71	
309	1,45	1,41	1,27	1,38	0,098	0,71	
316	1,50	1,51	1,39	1,47	0,067	0,46	
330	1,59	1,59	1,41	1,53	0,102	0,67	
344	1,46	1,51	1,26	1,41	0,129	0,92	
358	1,61	1,68	1,49	1,59	0,104	0,66	
365	1,41	1,40	1,24	1,35	0.096	0.72	

Tabela C2 - Resultados de variação de massa ao longo do tempo para as argamassas com cimento CPIV

Idade (dias)			vanaça		Desvio			
()	V1	V2	V3	VM (%)	padrão	CV (%)		
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
7	0,04	0,21	0,06	0,10	0,096	9,35		
14	0,07	0,21	0,10	0,13	0,078	6,16		
21	0,21	0,35	0,23	0,26	0,076	2,91		
28	0,84	1,01	0,95	0,93	0,086	0,93		
35	0,84	1,01	0,95	0,93	0,086	0,93		
42	1,03	1,10	1,00	1,04	0,055	0,52		
49	1,03	1,25	1,09	1,12	0,114	1,02		
56	1,03	1,25	1,09	1,12	0,114	1,02		
63	1,03	1,25	1,09	1,12	0,114	1,02		
70	1,03	1,25	1,09	1,12	0,114	1,02		
91	0,87	0,96	0,84	0,89	0,063	0,71		
98	1,01	1,08	0,99	1,03	0,051	0,50		
105	1,03	1,13	1,17	1,11	0,072	0,65		
112	1,03	1,05	0,91	1,00	0,076	0,76		
119	1,03	1,05	0,97	1,02	0,042	0,41		
126	1,01	1,08	1,02	1,04	0,040	0,39		
133	1,03	1,08	0,99	1,03	0,048	0,47		
140	1,41	1,25	1,19	1,28	0,116	0,91		
147	1,16	1,27	1,24	1,22	0,054	0,44		
154	1,17	1,27	1,17	1,20	0,061	0,51		
161	1,12	1,25	1,14	1,17	0,073	0,62		
168	1,29	1,36	1,24	1,30	0,061	0,47		
175	1,14	1,19	0,97	1,30	0,115	1,05		
182	1,15	1,23	1,17	1,18	0,044	0,37		
196	1,09	1,17	1,15	1,13	0,039	0,35		
210	1,03	1,15	1,06	1,08	0,058	0,53		
217	1,09	1,20	1,19	1,16	0,059	0,51		
231	1,12	1,17	1,19	1,16	0,036	0,31		
245	1,14	1,18	1,19	1,17	0,022	0,19		
259	1,16	1,18	1,19	1,18	0,016	0,14		
266	1,19	1,32	1,22	1,24	0,069	0,55		
281	1,22	1,32	1,27	1,27	0,049	0,39		
295	1,05	1,27	1,13	1,15	0,109	0,95		
302	1,11	1,35	1,24	1,23	0,117	0,95		
316	1,18	1,35	1,19	1,24	0,093	0,75		
330	1,17	1,27	1,19	1,21	0,055	0,45		
344	1,21	1,36	1,20	1,26	0,090	0,72		
358	1,27	1,31	1,17	1,25	0,069	0,55		
365	0,48	0,53	0,44	0,48	0,041	0,86		

Tabela C3 - Resultados de variação de massa ao longo do tempo para as argamassas com cimento CPII Z

Idade (dias)			variaça	lo ue mass	Desvio		
(,	V1	V2	V3	VM (%)	padrão	CV (%)	
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
7	0,00	0,03	0,05	0,02	0,024	9,44	
14	0,54	0,58	0,70	0,61	0,081	1,35	
21	0,54	0,58	0,70	0,61	0,081	1,35	
28	0,57	0,80	0,93	0,77	0,186	2,43	
35	0,75	1,04	1,05	0,95	0,170	1,79	
42	0,75	1,04	1,05	0,95	0,170	1,79	
49	0,75	1,04	1,05	0,95	0,170	1,79	
56	0,48	0,60	0,59	0,56	0,066	1,18	
77	0,70	0,82	0,91	0,81	0,105	1,30	
84	0,85	0,98	1,02	0,95	0,087	0,92	
91	0,87	1,04	1,05	0,98	0,101	1,03	
98	0,95	1,05	1,05	1,02	0,054	0,53	
105	0,91	1,05	1,03	1,00	0,074	0,74	
112	0,97	1,09	1,09	1,05	0,067	0,64	
119	0,95	1,09	1,07	1,04	0,075	0,72	
126	0,97	1,33	1,35	1,22	0,212	1,74	
133	1,15	1,25	1,20	1,20	0,048	0,40	
140	1,18	1,27	1,22	1,22	0,046	0,38	
147	1,14	1,25	1,17	1,18	0,058	0,49	
154	1,22	1,43	1,34	1,33	0,103	0,78	
161	1,07	1,24	1,17	1,16	0,083	0,72	
168	1,12	1,29	1,24	1,22	0,083	0,68	
182	1,11	1,22	1,24	1,19	0,072	0,61	
196	1,06	1,06	1,12	1,08	0,031	0,29	
203	1,13	1,23	1,24	1,20	0,064	0,53	
217	1,14	1,25	1,25	1,21	0,065	0,54	
231	1,16	1,26	1,25	1,22	0,058	0,48	
245	1,17	1,27	1,26	1,23	0,056	0,45	
259	1,24	1,32	1,35	1,30	0,055	0,42	
274	1,24	1,38	1,36	1,33	0,073	0,55	
288	1,10	1,15	1,28	1,18	0,091	0,77	
302	1,27	1,26	1,43	1,32	0,097	0,73	
316	1,38	1,42	1,64	1,48	0,140	0,95	
330	1,43	1,44	1,70	1,52	0,154	1,01	
344	1,48	1,45	1,72	1,55	0,144	0,93	
358	1,35	1,36	1,53	1,41	0,101	0,72	
365	1,00	0,10	0,03	0,38	0,538	1,43	

Tabela C4 - Resultados de variação de massa ao longo do tempo para as argamassas com cimento CPII F

APÊNDICE D

A variação dimensional dos prismas foi verificada semanalmente; na Tabela D1 é possível verificar as medidas individuais e médias das argamassas com o CP V-ARI. Na Tabela D2 estão apresentados os resultados para as argamassas com o cimento CP IV.

Idada (diaa)	Expansões (%)								
	Exp1	Exp2	Exp3	Exp-M	Desvio	CV (%)			
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
7	0,01	0,00	0,00	0,01	0,006	11,46			
14	0,01	0,00	0,00	0,01	0,006	11,46			
21	0,00	0,01	0,00	0,00	0,022	0,00			
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,044	0,00			
35	0,00	0,01	0,00	0,00	0,013	0,00			
42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,016	0,00			
49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,036	0,00			
56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,010	0,00			
63	0,01	0,01	0,01	0,01	0,002	2,47			
70	0,02	0,02	0,00	0,01	0,012	9,17			
77	0,02	0,04	0,04	0,03	0,010	2,90			
84	0,04	0,04	0,02	0,03	0,012	3,94			
91	0,06	0,06	0,05	0,06	0,08	1,43			
97	0,07	0,09	0,07	0,07	0,012	1,55			
104	0,09	0,11	0,10	0,10	0,008	0,84			
111	0,04	0,04	0,05	0,05	0,005	0,99			
147	0,00	0,02	0,02	0,01	0,012	9,17			
161	0,05	0,04	0,04	0,04	0,007	1,73			
168	0,03	0,03	0,02	0,03	0,002	0,087			
182	0,04	0,05	0,04	0,04	0,006	0,148			
196	0,04	0,05	0,05	005	0,004	0,083			
210	0,05	0,05	0,06	0,05	0,004	0,077			
224	0,08		0,02	0,04	0,035	0,793			
238	0,08	0,04	0,03	0,05	0,029	0,555			
252	0,08	0,06	0,04	0,06	0,022	0,371			
266	0,09	0,08	0,06	0,08	0,014	0,190			
280	0,10	0,11	0,08	0,10	0,016	0,167			

Tabela D1 – Resultados das expansões das argamassas com cimento CPV-ARI – Método francês

Idada (diaa)			Exp	ansões (%	6)	
Idade (dias)	Exp1	Exp2	Exp3	Exp-M	Desvio	CV (%)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,024	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,026	0,00
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,022	0,00
35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,015	0,00
42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,004	0,00
49	0,00	0,01	0,02	0,01	0,013	19,29
56	0,00	0,02	0,03	0,01	0,019	14,18
63	0,01	0,02	0,02	0,02	0,009	4,95
70	0,03	0,04	0,04	0,04	0,006	1,58
77	0,05	0,06	0,06	0,06	0,007	1,24
84	0,07	0,08	0,08	0,08	0,008	1,08
91	0,01	0,04	0,02	0,03	0,016	6,06
126	0,00	0,02	0,00	0,00	0,018	0,00
140	0,02	0,03	0,02	0,02	0,008	3,33
155	0,00	0,02	0,01	0,01	0,010	10,79
169	0,00	0,01	0,01	0,01	0,009	13,86
183	0,00	0,01	0,02	0,01	0,010	0,755
197	0,00	0,03	0,02	0,02	0,014	0,721
211	0,00	0,04	0,00	0,00	0,055	0,000
225	0,01	0,04	0,02	0,03	0,018	0,712
239	0,02	0,04	0,02	0,03	0,014	0,515
253	0,02	0,04	0,03	0,03	0,010	0,377
267	0,02	0,05	0,03	0,03	0,017	0,500
281	0,03	0,05	0,04	0,04	0,012	0,316

Tabela D2 – Resultados das expansões das argamassas com cimento CPIV – Método francês

APÊNDICE E

A Tabela E1 apresenta os resultados de variação de massa semanalmente, assim como a média e desvio padrão, para as argamassas com cimento Portland CP V-ARI. A Tabela E2 apresenta os resultados de variação de massa para as argamassas produzidas com cimento CPIV.

variação de massa (%)						
ldade (dias)					Desvio	
	V1	V2	V3	VM (%)	padrão	CV (%)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,10	0,12	0,16	0,12	0,033	2,62
14	0,10	0,12	0,16	0,12	0,033	2,62
21	0,32	0,39	0,36	0,36	0,035	0,98
28	0,25	0,26	0,29	0,27	0,021	0,78
35	0,34	0,45	0,40	0,39	0,058	1,46
42	0,12	0,24	0,43	0,26	0,157	5,97
49	0,31	0,36	0,42	0,37	0,058	1,58
56	0,30	0,36	0,37	0,34	0,037	1,08
63	0,46	0,50	0,50	0,49	0,026	0,53
70	0,47	0,53	0,54	0,51	0,039	0,76
77	0,49	0,54	0,55	0,53	0,033	0,62
84	0,54	0,55	0,58	0,56	0,019	0,35
91	0,33	0,56	0,58	0,49	0,141	2,89
97	0,39	0,58	0,58	0,52	0,113	2,19
104	0,39	0,59	0,58	0,52	0,118	2,26
111	0,51	0,61	0,58	0,57	0,049	0,86
147	0,56	0,70	0,67	0,64	0,076	1,18
161	0,48	0,61	0,54	0,54	0,061	1,13
168	0,68	0,79	0,75	0,74	0,059	0,080
182	0,56	0,71	0,71	0,66	0,083	0,126
196	0,65	0,73	0,72	0,70	0,041	0,059
210	0,68	0,74	0,72	0,71	0,029	0,040
224	0,71	0,76	0,72	0,73	0,026	0,035
238	0,74	0,80	0,73	0,75	0,036	0,047
252	0,79	0,84	0,73	0,75	0,051	0,065
266	0,83	0,88	0,74	0,82	0,072	0,088
280	0,84	0,89	0,98	0,90	0,074	0,082

Tabela E1 – Resultados de variação de massa ao longo do tempo para as argamassas com cimento CPV-ARI – Método francês

	Variação de massa (%)								
ldade (dias)					Desvio				
	V1	V2	V3	VM (%)	padrão	CV (%)			
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
7	0,27	0,24	0,15	0,22	0,062	0,288			
14	0,36	0,30	0,22	0,29	0,071	0,244			
21	0,32	0,29	0,21	0,27	0,059	0,215			
28	0,48	0,43	0,40	0,44	0,039	0,089			
35	0,40	0,34	0,31	0,35	0,042	0,119			
42	0,52	0,59	0,54	0,55	0,040	0,072			
49	0,60	0,59	0,58	0,59	0,011	0,018			
56	0,61	0,59	0,58	0,59	0,014	0,024			
63	0,64	0,57	0,56	0,59	0,045	0,077			
70	0,64	0,60	0,58	0,61	0,031	0,050			
77	0,64	0,60	0,58	0,61	0,030	0,050			
84	0,48	0,47	0,45	0,47	0,019	0,040			
91	0,65	0,62	0,59	0,62	0,028	0,045			
126	0,71	0,65	0,58	0,65	0,062	0,096			
140	0,56	0,51	0,61	0,56	0,051	0,091			
155	0,76	0,68	0,77	0,74	0,048	0,064			
169	0,71	0,69	0,66	0,69	0,027	0,040			
183	0,72	0,67	0,71	0,70	0,024	0,034			
197	0,76	0,68	0,72	0,72	0,036	0,050			
211	0,77	0,70	0,73	0,73	0,034	0,046			
225	0,78	0,72	0,75	0,75	0,033	0,045			
239	0,80	0,76	0,77	0,78	0,025	0,032			
253	0,85	0,79	0,82	0,82	0,028	0,034			
267	0,86	0,83	0,87	0,86	0,020	0,024			
281	0,91	0,87	0,89	0,89	0,019	0,022			

Tabela E2 – Resultados de variação de massa ao longo do tempo para as argamassas com cimento CPIV – Método francês

APÊNDICE F

A Tabela F1 apresenta os resultados de resistência à tração, assim como a média, desvio padrão e coeficiente de variação, para as argamassas com cimento Portland CP V-ARI. A Tabela F2 apresenta os resultados de resistência à tração para as argamassas produzidas com cimento CPIV, e as tabelas F3 e F4 para as argamassas com cimento CPII Z e CPII F, respectivamente.

Tabela F1 - Resultados de resistência à tração para as argamassas com cimento CPV-ARI

	Resistência à tração (MPa)									
ldade (dias)	CP1	CP2	СРЗ	CP4	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)			
1	4,46	4,21	4,23	3,69	4,15	0,33	7,88			
7	3,31	3,88	2,92	3,72	3,46	0,43	12,51			
28	3,69	3,31	3,56	4,18	3,69	0,37	9,91			
56	2,78	3,04	4,33	3,17	3,33	0,69	20,61			
84	2,90	3,45	3,92	2,99	3,32	0,47	14,21			
112	3,35	3,88	2,93	3,40	3,39	0,39	11,49			
140	3,79	3,40	3,24	3,29	3,43	0,25	7,35			
168	3,37	3,83	3,36	2,82	3,34	0,42	12,44			
270	2,31	2,31	2,57	2,41	2,40	0,12	5,11			
365	1,21	1,20	0,99	1,37	1,19	0,16	13,07			

Tabela F2 - Resultados de resistência à tração para as argamassas com cimento CPIV

	Resistência à tração (MPa)									
ldade (dias)	CP1	CP2	CP3	CP4	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)			
1	3,51	4,06	3,62	3,73	3,73	0,24	6,34			
7	3,91	5,10	5,18	4,17	4,59	0,64	14,01			
28	4,78	4,08	5,57	4,34	4,69	0,65	13,89			
56	3,83	4,56	5,04	4,37	4,45	0,50	11,25			
84	5,00	5,10	4,41	5,68	5,05	0,52	10,34			
112	5,47	3,20	3,75	4,84	4,31	1,03	23,89			
140	3,89	5,04	5,73	5,11	4,94	0,76	15,46			
168	4,29	4,64	4,20	6,15	4,82	0,91	18,81			
270	5,03	6,32	6,04	6,56	5,99	0,67	11,24			
365	4,14	4,27	4,50	4,14	4,26	0,17	3,98			

				•··· —						
	Resistência à tração (MPa)									
ldade (dias)	CP1	CP2	CP3	CP4	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)			
1	3,38	3,09	3,29	2,75	3,13	0,28	8,93			
7	2,89	3,29	3,86	3,12	3,29	0,41	12,59			
28	3,61	2,97	3,04	2,84	3,11	0,34	11,00			
56	3,96	4,56	4,11	5,26	4,47	0,58	13,03			
84	4,88	4,14	4,22	4,50	4,44	0,33	7,55			
112	4,27	4,35	4,37	4,94	4,48	0,31	6,89			
140	4,30	3,76	3,95	3,74	3,94	0,26	6,50			
168	3,75	4,17	4,21	4,59	4,18	0,34	8,23			
270	4,43	3,64	3,23	3,86	3,79	0,50	13,12			
365	3,52	4,34	3,30	2,40	3,39	0,80	23,52			

Tabela F3 - Resultados de resistência à tração para as argamassas com cimento CPII Z

Tabela F4 - Resultados de resistência à tração para as argamassas com cimento CPII F

	Resistência à tração (MPa)									
ldade (dias)	CP1	CP2	CP3	CP4	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)			
1	2,72	1,55	2,72	2,59	2,39	0,57	23,67			
7	3,54	1,95	3,29	3,09	2,97	0,70	23,67			
28	2,45	2,68	2,80	3,31	2,81	0,37	13,05			
56	4,35	4,18	4,15	2,88	3,89	0,68	17,50			
84	2,77	3,16	2,63	3,31	2,97	0,32	10,90			
112	3,48	2,89	3,50	2,57	3,11	0,46	14,77			
140	2,93	3,52	3,34	3,21	3,25	0,25	7,63			
168	2,78	2,28	1,84	3,38	2,57	0,66	28,85			
270	3,07	3,71	3,23	2,66	3,17	0,43	13,63			
365	1,17	1,01	1,34	1,35	1,22	0,16	13,23			

APÊNDICE G

A Tabela G1 apresenta os resultados de resistência à tração, assim como a média, desvio padrão e coeficiente de variação, para as argamassas com cimento Portland CP V-ARI. A Tabela G2 apresenta os resultados de resistência à tração para as argamassas produzidas com cimento CPIV.

	Resistência à tração (MPa)									
ldade (dias)	CP1	CP2	CP3	CP4	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)			
1	3,01	3,30	4,41	3,08	3,45	0,65	18,89			
7	3,00	3,16	3,09	3,57	3,20	0,25	7,86			
28	1,63	3,04	3,18	4,05	2,98	1,00	33,67			
56	3,38	3,78	4,05	4,56	3,94	0,50	12,56			
84	4,33	4,20	3,74	2,88	3,79	0,66	17,32			
112	3,40	3,93	2,91	2,74	3,25	0,54	16,50			
140	3,63	4,77	3,64	3,56	3,90	0,58	14,90			
168	3,29	3,81	4,89	3,62	3,90	0,69	17,75			
270	2,87	3,65	2,84	4,17	3,38	0,65	19,07			

Tabela G1 - Resultados de resistência à tração para as argamassas com cimento CPV-ARI

Tabela G2 - Resultados de resistência à tração para as argamassas com o	cimento
CPIV	

	Resistência à tração (MPa)									
ldade (dias)	CP1	CP2	CP3	CP4	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)			
1	4,77	4,98	4,47	4,68	4,73	0,21	4,47			
7	3,19	3,44	4,42	4,76	3,95	0,76	19,13			
28	4,25	5,02	3,86	3,35	4,12	0,70	17,09			
56	4,46	3,35	4,46	4,70	4,24	0,61	14,28			
84	4,66	6,52	4,67	4,48	5,08	0,96	18,93			
112	3,78	3,38	3,86	4,32	3,80	0,39	10,05			
140	2,90	5,68	3,35	3,00	3,73	1,31	35,17			
168	5,46	5,19	5,18	6,27	5,53	0,51	9,29			
270	3,63	3,34	4,29	4,24	3,88	0,47	12,03			

APÊNDICE H

A Figura H1 apresenta as inspeções visuais das argamassas com cimento Portland CP V-ARI realizadas semanalmente. A Figura H2 apresenta as inspeções visuais para as argamassas produzidas com cimento CPIV, e as figuras H3 e H4 das argamassas com cimento CPII Z e CPII F, respectivamente.





129



Figura H2 - Inspeção visual nas argamassas com cimento Portland CPIV

130







Figura H3 - Inspeção visual nas argamassas com cimento Portland CPII Z

330 dias

365 dias



Figura H4 - Inspeção visual nas argamassas com cimento Portland CPII F

330 dias

365 dias

APÊNDICE I

A Figura I1 apresenta as inspeções visuais das argamassas com cimento Portland CP V-ARI realizadas semanalmente. A Figura I2 apresenta as inspeções visuais para as argamassas produzidas com cimento CPIV.



Figura I1 – Inspeção visual nas argamassas com cimento Portland CPV-ARI – Método francês

280 dias

134

Figura I2 – Inspeção visual nas argamassas com cimento Portland CPIV – Método Francês



280 dias