https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.013

COMPORTAMENTO DELETÉRIO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO INDUZIDOS À DEF EM ENSAIOS DE LONGA DURAÇÃO POR MÉTODO BRASILEIRO

Dioice Schovanz[1]; Marinês Langoski[1]; Francieli Tiecher[2]*

Nicole P. Hasparyk[3]; Selmo C. Kuperman[4]

*francieli.bonsembiante@imed.edu.br

[1] Mestra em Engenharia Civil, IMED, Passo Fundo, Brasil
[2] Pós-Doutora em Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – IMED, Passo Fundo, Brasil
[3] Pesquisadora, Doutora em Engenharia Civil, ELETROBRAS Furnas, Goiânia, Brasil
[4] Doutor em Engenharia Civil, DESEK, São Paulo, Brasil

RESUMO

O processo de hidratação do cimento Portland implica na ocorrência de reações químicas exotérmicas, sendo maior a elevação da temperatura em estruturas de concreto massa e em concretos com altos consumos de cimento. Os concretos podem ficar sujeitos a um ataque químico interno por efeitos deletérios de origem térmica, especialmente pelos íons sulfatos, podendo ocorrer a formação da etringita tardia (DEF). A DEF, ao longo do tempo, pode promover expansão, acometendo o concreto, uma vez que os produtos expansivos formados afetam a microestrutura, impactando as suas propriedades mecânicas e o seu desempenho. Este estudo avaliou o comportamento de concretos e argamassas frente à DEF, confeccionados com um cimento Portland pozolânico (CP IV), que foram submetidos a elevação de temperatura até 85ºC, conforme método desenvolvido no Brasil. Os estudos perduraram por 365 dias, sendo as amostras mantidas por todo o período em ambiente de imersão em água a 38ºC. Os resultados retratam que o processo de cura e o ambiente de exposição dos concretos aceleraram o processo de formação da DEF, apresentando elevadas expansões, evidências a nível macro e microestrutural, ao longo do tempo. Os compósitos avaliados se apresentaram susceptíveis à ocorrência da DEF nas condições de ensaio, indicando comportamentos diferenciados entre argamassas e concretos. O desenvolvimento da DEF nos concretos foi mais rápido e agressivo, atingindo maiores expansões e danos à resistência, sendo recomendando no estudo do potencial de desenvolvimento da DEF avaliações em concreto. Por fim, o cimento Portland CP IV-32 avaliado não foi capaz de mitigar o fenômeno da DEF nos compósitos avaliados..

Palavra-Chave: Concreto. Expansão. Formação da etringita tardia (DEF). Método brasileiro. Cimento pozolânico.

ABSTRACT

Concretes cast with high cement contents and mass concrete may be subjected to high temperature rise during cement hydration due to the exothermic reactions that can induce the occurrence of deleterious process of delayed ettringite formation (DEF). The resulting expansion from DEF impacts the mechanical properties and performance of concrete over time. This paper presents results of laboratory tests following the protocols from a Brazilian method for inducing DEF with a thermal curing at 85ºC. Samples of mortar and concrete were submerged in water and exposed to 38ºC up to 365 days. The results indicated high expansions, macro and microstructural alterations over time. The composites presented prone to DEF based on the tested conditions, but with distinct behaviors between mortar and concrete. DEF progress was more intense and accelerated in concrete compared to mortar due to the higher expansions and injuries to the strength over time. Thus, in order to evaluate the potential for DEF, concrete specimens are recommended. Furthermore, the tested pozzolanic cement did not mitigate DEF according to the cement composites that were evaluated.

Keywords: Concrete. Expansion. Delayed Ettringite Formation (DEF). Brazilian method. Pozzolanic cement.

1. INTRODUÇÃO

A deterioração precoce do concreto causada pela formação da etringita tardia (DEF) pode comprometer a longevidade estrutural de elementos de concreto armado, como fundações de pontes e edifícios residenciais (HASPARYK *et al.*, 2012; KARTHIK *et al.*, 2020; PICHELIN, *et al.*, 2020; OUVRIER-BUFFET *et al.*, 2021). A DEF é uma patologia que causa expansão no concreto e consequente fissuração, podendo ocorrer quando a temperatura de cura permanecer por tempo suficiente acima de 60-65ºC em idades precoces (ZHANG, H. *et al.*, 2019). Quando isso ocorre, os íons sulfato ficam dissolvidos na solução dos poros do concreto, e disponíveis para reagir tardiamente, uma vez que em altas temperaturas a etringita primária não é estável. Assim, a cristalização subsequente de etringita (etringita secundária ou tardia) em concreto endurecido, após o resfriamento, pode produzir pressões internas que levam à expansão ao longo do tempo, responsáveis pela geração de fissuras e pelos danos ao desempenho mecânico do concreto, além de prejudicar a durabilidade e vida útil. A probabilidade de a DEF causar expansões deletérias em uma estrutura de concreto depende, entre outros fatores, do histórico do cimento, relacionado à temperatura de cura, composição química e também das condições de exposição do elemento de concreto, em especial, à umidade (HASPARYK; KUPERMAN, 2019).

A DEF foi observada em estruturas maciças de concreto, em que as temperaturas no núcleo podem ser bastante elevadas (blocos acima de 1 m³) (HASPARYK *et al.*, 2016) e em elementos de concreto pré-moldado curados a vapor. O estudo sobre a suscetibilidade do concreto ou argamassa desenvolver DEF é, portanto, importante para prevenir o fenômeno deletério e garantir a durabilidade das estruturas (Figura 1).

Figura 1 – Estruturas com fissuras devido à DEF.



(a) Parede do dique de uma barragem.
Fonte: Blanco *et al.*, 2019.



(b) Base de um pilar.
Fonte: Godart, 2017.

Estudos mais recentes mostram o nível de dano que a DEF pode trazer (GIANINNI *et al.*, 2018; SANCHEZ *et al.*, 2018; HASPARYK *et al.*, 2022). Impactos tão importantes, dependendo do nível de expansão atingido no concreto pela DEF (da ordem de 1,2%), chegam a reduzir o módulo, por exemplo, em 60% e apresentar índice de dano de rigidez e deformação plástica em 0,56 e 0,24, respectivamente, indicando um concreto seriamente deteriorado. Esses comportamentos podem ser corroborados a partir das análises microestruturais realizadas ao longo do tempo, uma vez que indicam a presença intensa de etringita comprimida além de e microfissuras associadas à DEF (HASPARYK *et al.*, 2022).

Com base no exposto, no presente estudo, a susceptibilidade de concretos e argamassas, comumente usados nas obras, frente à DEF, foi avaliada em laboratório. Este estudo objetivou a compreensão do comportamento físico e mecânico por meio do estudo de compósitos confeccionados com cimento Portland pozolânico, tipo CP IV-32, para verificar o seu potencial de mitigação das expansões e redução dos danos causados pela DEF.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Materiais

Foi empregado nos traços de argamassa e concreto um cimento Portland pozolânico, tipo CP IV-32. O cimento atendeu aos requisitos normativos da ABNT NBR 16697 (2018), possui massa específica igual a 2,82 g/cm³, finura de 4.180 cm²/g (Blaine) e resistência média à compressão axial de 40 MPa aos 28 dias. Como principais parâmetros químicos, possui, em média, os seguintes óxidos: CaO= 46,3%; SiO_2=30,1%; Al_2O_3=9,4%; Fe_2O_3=4,0%, $Na_2O_{eq.}$=1,1%, além de resíduo insolúvel de 25,3% .

Como agregados graúdos, foram selecionados materiais a partir de rocha de origem granítica britada, com dimensão máxima característica de 19 mm e módulo de finura médio de 6,72. Para a confecção do concreto, foi usado um agregado miúdo natural, de cava, com dimensão máxima característica de 4,75 mm. De forma a isolar apenas o efeito da DEF, a rocha e a areia foram avaliadas previamente quanto à reação álcali-sílica (RAS), pela ABNT NBR 15577-4: 2018, sendo caracterizadas como potencialmente inócuas. No estudo das argamassas, o agregado miúdo utilizado foi de mesma origem granítica, pela dificuldade de obtenção de uma areia natural inócua à RAS (o estudo com argamassa foi desenvolvido em torno de 1 ano após o de concreto), conforme Bronholo *et al.* (2019). O agregado possuía dimensão máxima característica de 4,75 mm.

2.2. Produção dos compósitos

O traço para a produção das argamassas foi de 1:2,75, com relação a/c de 0,485, conforme disposto na ASTM C 1012 (2018), sendo empregado um misturador mecânico, seguindo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019). O traço dos concretos foi de 1:1,6:1,9:0,46, e seguiu o disposto em Schovanz (2019) e Bronholo (2020), com o objetivo de atingir características próximas das de um concreto bombeado empregado em estrutura de obra hidráulica, a qual sofreu uma importante elevação de temperatura e riscos da DEF.

2.3. Cura e ambiente de exposição

As condições de cura e ambiente de exposição para os estudos em argamassa e concreto foram as mesmas, sendo levada em consideração a elevação de temperatura nas primeiras horas após a mistura do cimento com a água, por ser um dos principais fatores para a ocorrência de DEF. O método empregado foi o disposto em Schovanz (2019) e Hasparyk *et al.* (2020), tendo sido elaborado a partir de Fu (1997), Kchakech *et al.* (2016) e Rashidi *et al.* (2017) Sanchez *et al.* (2015), Godart (2017), Zhang Z. *et al*. (2017), Martin *et al.* (2017) e Giannini *et al*. (2018).

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em temperatura ambiente durante 6 horas, sendo, em seguida, submetidos à cura térmica, com imersão em água. A cura foi realizada em um tanque com água, cuja temperatura inicial foi de 25ºC. Após a imersão dos compósitos, a água foi

gradativamente aquecida até atingir 85ºC (taxa de aquecimento de 10ºC/h). As amostras permaneceram nessa condição durante 12 horas, quando se procedeu ao resfriamento da água, com a mesma taxa até a temperatura de 38ºC (±2ºC). Esse é o ambiente de exposição no qual todos os CPs ficam imersos, ao longo do tempo, até 1 ano.

2.4. Ensaios e análises

As avaliações das expansões foram realizadas periodicamente, por meio de medições de comprimento em prismas de concreto (7,5 x 7,5 x 28,5) cm e de argamassa (2,5 x 2,5 x 28,5) cm. As avaliações de expansão nos prismas de concreto seguiram os procedimentos descritos na ABNT NBR 15577-6:2018 e NBR 15577-4 (ABNT, 2018), para os concretos e argamassas, respectivamente. Foram moldados 3 prismas para cada tipo de compósito. Foi realizado também o monitoramento da massa dos primas no tempo.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7222:2011. Para esta avaliação foram empregados 3 corpos de prova por idade de ensaio.

As características microestruturais dos concretos e das argamassas foram determinadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS) com o objetivo de avaliar a ocorrência da DEF, em amostras de fratura, usando o detector de elétrons secundários (SE) na idade de um ano.

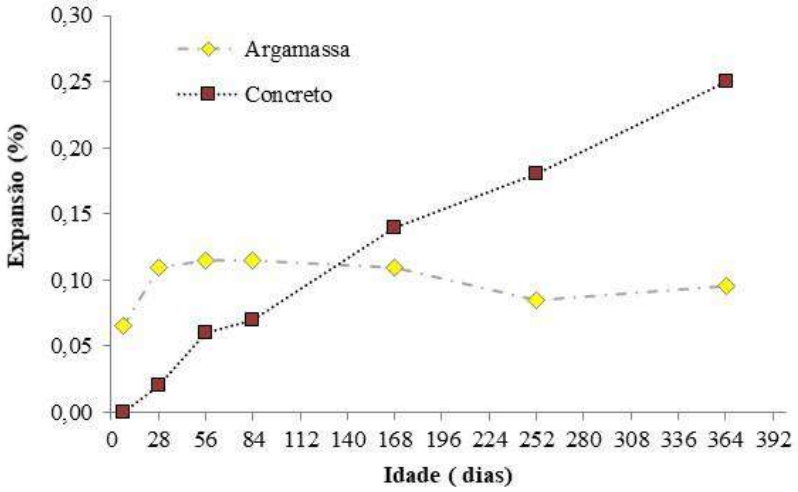
3. RESULTADOS

3.1. Avaliação da expansão e variação de massa

De acordo com a variação dimensional dos prismas (Figura 2) foi possível verificar que o concreto moldado com cimento CP IV-32 possui uma taxa de crescimento elevada ao longo de todo o tempo avaliado, enquanto que a argamassa, embora tenha indicado maiores valores nas primeiras idades, tende a estabilizar após 3 meses. O concreto e a argamassa atingiram aos 365 dias, em média, 0,25% e 0,10% de expansão. O gráfico da Figura 3 mostra que as expansões dos concretos se intensificam após 3 meses, sem cessar; já para as argamassas, a estabilização foi observada até a idade final do estudo. O percentual final encontrado para o concreto suplanta inclusive o limite de 0,04% preconizado pelo método brasileiro para concretos, conforme disposto em Hasparyk *et al.* (2020), indicando uma combinação suscetível à DEF, mesmo na presença do cimento Portland pozolânico.

No presente estudo o concreto apresentou um menor nível de expansão, embora bastante elevado, ao ser comparado com aqueles apresentados por Amine *et al.* (2017), Martin *et al.* (2017) e Giannini *et al.* (2018), os quais indicaram elevadas expansões, próximas a 1%, com avaliações próximas aos 6 meses. Entretanto, nesses estudos, o cimento avaliado possuía características químicas distintas das do CP IV-32 brasileiro, sendo cimentos equivalentes ao cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) nacional, com temperatura de cura em torno de 80ºC, sendo importante salientar que os corpos de prova também foram mantidos imersos em água, como no presente estudo.

Figura 2 – Comportamento expansivo dos compósitos ao longo do tempo.



Fonte: própria autoria, 2022.

Figura 3 – Distribuição das expansões dos dois compósitos no tempo.



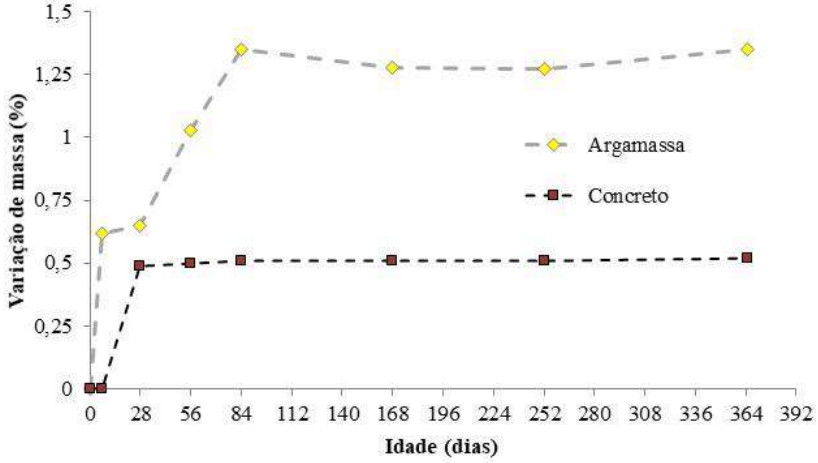
Fonte: própria autoria, 2022.

Outro ponto importante a ser destacado é o ganho de massa que pode ocorrer à medida em que a etringita se forma, fato justificado por causa do crescimento dos cristais expansivos e de seu preenchimento nos espaços intersticiais. O que se conhece, para cimentos sem adições, é que o processo expansivo e deletério da DEF segue em geral um comportamento sigmoidal (Portella *et al.*, 2021). Porém, no caso de cimentos pozolânicos isso ainda não está bem esclarecido. Ainda, expansões excessivas podem ocorrer sem ganhos expressivos de massa, pois isso vai depender da microestrutura, porosidade interna, microfissuração existente e, consequentemente, das tensões internas geradas. Por outro lado, nem sempre haverá expansão importante quando a etringita se forma, ao menos nos estágios iniciais, período denominado “latente”. Essa situação pode ser notada no comportamento dos dois compósitos apresentado na Figura 4 até a idade final avaliada.

Para as argamassas, se nota uma intensificação de massa entre 1 e 3 meses, seguindo por estabilização, provável período latente. Ainda, nos primeiros estágios, para ambos os compósitos, os ganhos referem-se à absorção de água pelos compósitos, em parte, não sendo possível separar os dois efeitos haja vista que o fenômeno da DEF ocorre de forma precoce e acelerada. Como a evolução da DEF foi mais expressiva e rápida nos concretos, o seu comportamento expansivo pode

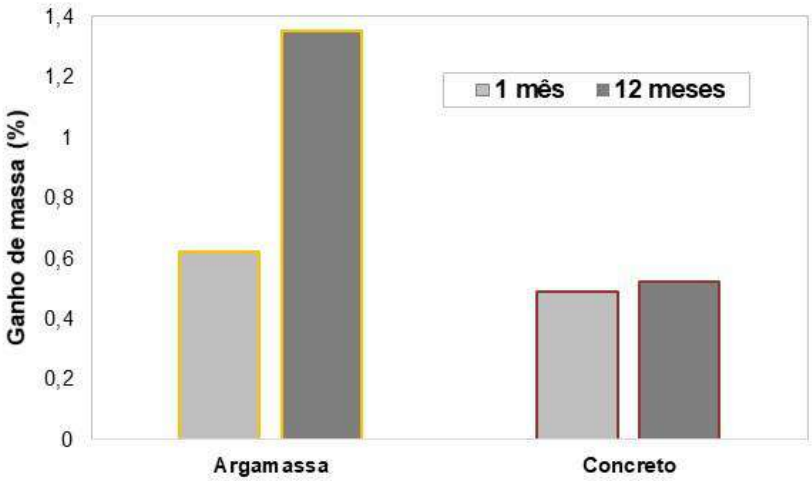
ter promovido fissuração interna justificando os menores ganhos de massa entre 6 e 12 meses (0,51% aos 12 meses) em relação à argamassa (1,35% aos 12 meses), conforme Figura 5, fato explicado na microestrutura. Nos estudos de Bronholo (2020), os ganhos de massa na presença de um cimento pozolânico foram de 0,86 e 0,42%, respectivamente, para argamassas e concretos expostos à DEF, corroborando o presente estudo e os maiores ganhos de massa para as argamassas.

Figura 4 – Ganho de massa dos compósitos ao longo do tempo.



Fonte: própria autoria, 2022.

Figura 5 – Evolução da variação de massa e das expansões.



Fonte: própria autoria, 2022.

3.2. Comportamento mecânico

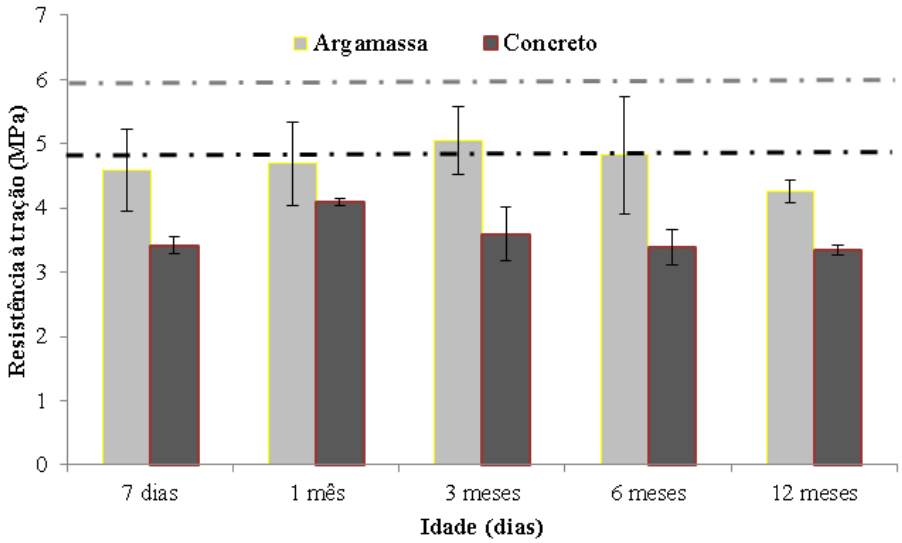
A resistência à tração é uma propriedade bastante sensível e que pode ser afetada por reações expansivas, como a DEF. Ainda, os ganhos da resistência à tração são diferenciados quando se compara um compósito do tipo argamassa com um concreto, após indução da DEF, conforme Figura 6. Enquanto o concreto atingiu a resistência máxima com 1 mês, a da argamassa continuou crescendo até a idade de 3 meses. Em corpos de prova de argamassa, Yu et al. (2021) observaram acréscimo de valores de resistência à tração no período avaliado, sendo este de 28 dias, comportamento semelhante ao obtido nesse estudo. Diante dos comportamentos diferenciados, o que se justifica pelo tipo de compósito e microestrutura interna, decidiu-se analisar os reflexos da DEF nesta propriedade com base nas máximas resistências atingidas.

A partir de uma avaliação realizada na idade de 6 meses dos compósitos, a argamassa sofreu queda de aproximadamente 5% enquanto o concreto atingiu perdas expressivas, da ordem de 17%. Esse comportamento indica que ao avaliar compósitos distintos frente à DEF, diferentes interpretações poderão ser tiradas, com riscos de avaliações equivocadas. Ainda, a idade de avaliação é crucial para se chegar à uma conclusão quanto à mitigação ou não do fenômeno da DEF.

Quando a avaliação da resistência à tração foi feita aos 12 meses, as perdas observadas para a argamassa se intensificaram, mesmo sem crescimento das expansões (0,10%), chegando a 16% e indicando que as tensões internas ocorreram com um nível de microfissuração incapazes de transmitir mais expansão. Nesta mesma idade, o concreto atingiu maior nível de queda para a tração (18% com expansão de 0,25%).

Estas análises indicam que o desenvolvimento dos danos da DEF em concreto ocorre de forma bem mais rápida quando comparado às argamassas. Ainda, para expansões com taxas bem menores atingidas pelas argamassas (0,10%), porém, na idade final da avaliação de 12 meses, os reflexos nas resistências chegaram a patamares próximos de 20%. Nos estudos de Bronholo (2020), as perdas na resistência à tração em concretos também confeccionados com um cimento Portland pozolânico chegaram a 13% aos 9 meses do estudo. Em Sanchez *et al.* (2018) e Melo *et al.* (2021), os reflexos foram mais significativos, chegando a quedas da ordem de 50%.

Figura 6 – Resistência à tração no tempo.



Fonte: própria autoria, 2022.

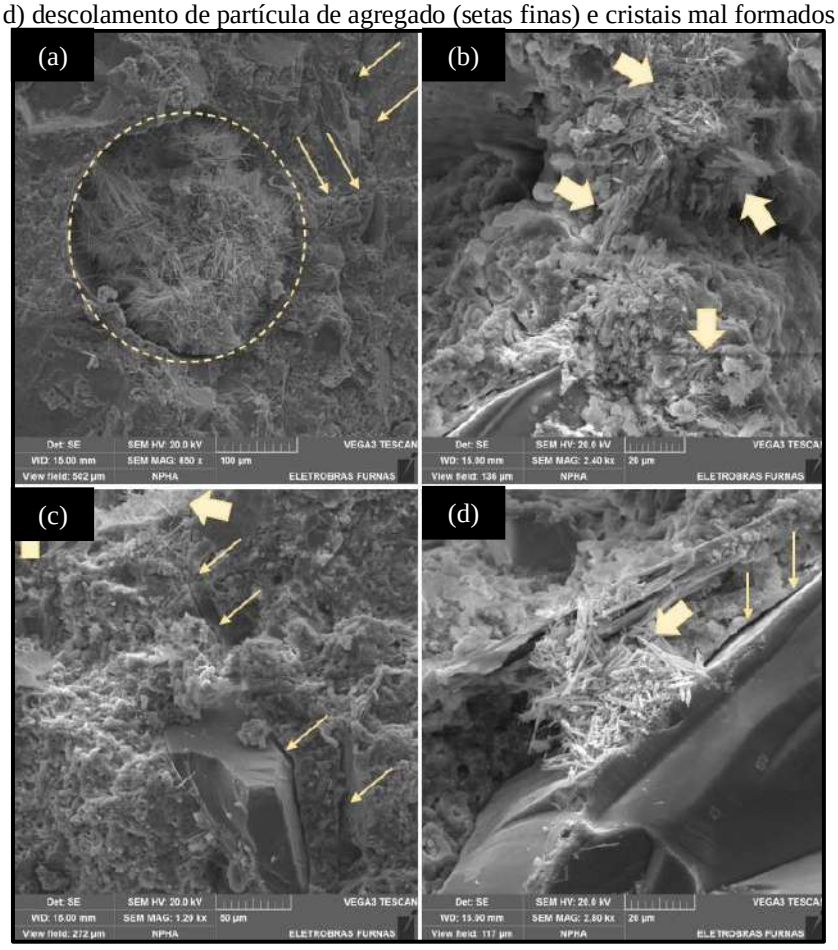
3.3 Microestrutura

A microestrutura dos compósitos avaliada na idade de um ano por MEV indica que ambos os compósitos, argamassas e concretos, confeccionados com o cimento Portland pozolânico (CP IV), possuem sintomas originados a partir da ocorrência da DEF. São eles: cristais de etringita em todas as regiões dos compósitos, seja na matriz cimentícia, depositados nos poros ou na zona de transição interfacial (ZT). Muitas vezes micro fissurações são observadas em associação às neoformações da etringita secundária. Alguns cristais mal formados foram observados, estando, provavelmente, relacionados a fases intermediárias durante o processo de formação da etringita tardia.

Especialmente nas amostras de argamassa, cristais aciculares nos poros foram observados, indicando ainda espaços para que esses sejam agrupados e comprimidos ao longo do tempo, considerando a continuidade da reação. Nos poros com maior quantidade de cristais agrupados, também foram observadas fissuras radiais, indicando as tensões geradas pelo seu crescimento. Ainda, a partir das análises realizadas notou-se que as amostras de concreto se encontravam com uma intensificação de formações massivas de etringita na zona de transição (ZT), e em regiões da matriz, no entorno dos agregados.

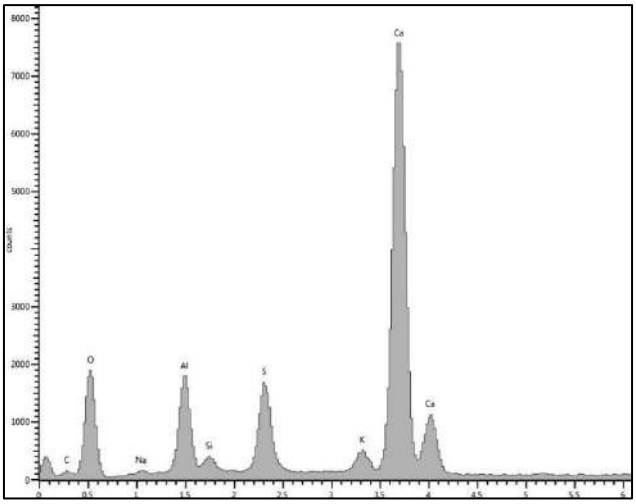
As Figuras a seguir mostram as características observadas.

Figura 7 – Micrografias das argamassas aos 365 dias: a) cristais aciculares formados dentro de um poro; b) formações massivas na matriz cimentícia (setas largas); c) descolamento de partícula de agregado e fissura desencadeada ao longo da pasta de cimento (setas finas), além de cristais de etringita no entorno e em poro próximo (setas largas); d) descolamento de partícula de agregado (setas finas) e cristais mal formados (setas largas).



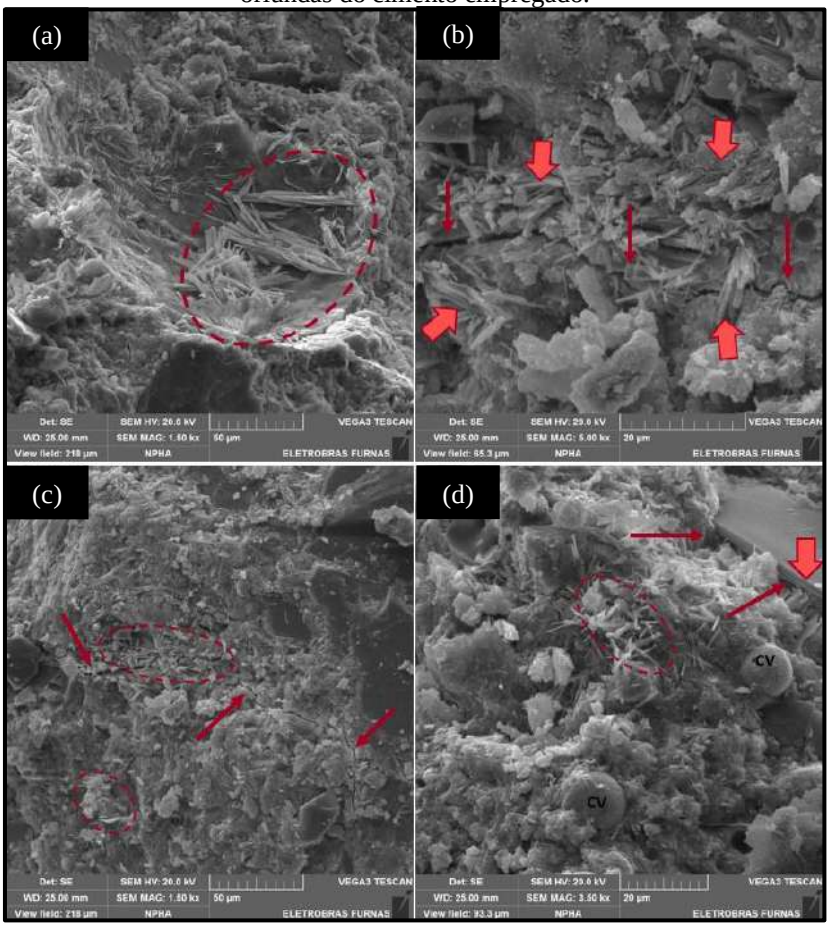
Fonte: FURNAS.

Figura 8 – Espectro obtido por EDS dos cristais ao centro da Figura 7d.



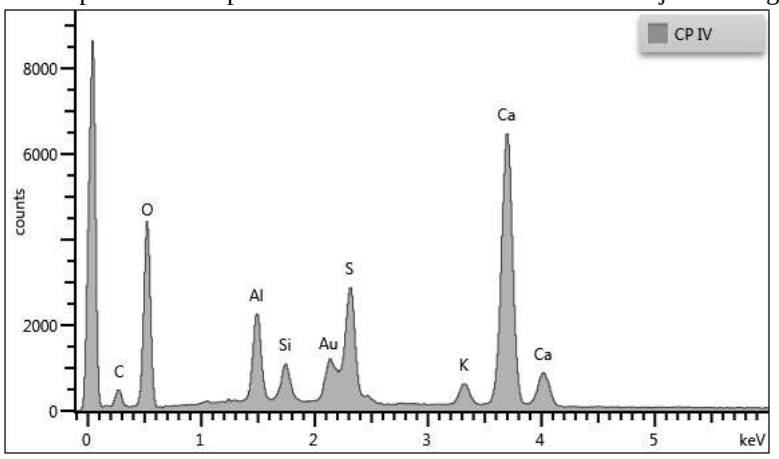
Fonte: FURNAS.

Figura 9 – Micrografias dos concretos aos 365 dias: a) deposição de cristais mal formados em poro; b) fissura na pasta (setas finas) acompanhada e formações de etringita no entorno (setas maiores); c) fissura observada no concreto (setas finas), no entorno com o agregado, e presença constante de cristais de etringita na matriz cimentícia (círculos tracejados); d) etringita formada nas proximidades do agregado, além de partículas de cinza volante oriundas do cimento empregado.



Fonte: FURNAS.

Figura 10 – Espectro obtido por EDS dos cristais circulados em tracejado na Figura 9d.



Fonte: FURNAS

Embora se saiba que a etringita pode apresentar variações morfológicas em decorrência dos teores de sulfato e alumínio presentes na composição do cimento, as condições locais de sua formação também se revelam causadores (TOSUN, 2006). Regiões com níveis de porosidades distintas bem como tamanho de poros, além de micro fissurações, afetam o seu desenvolvimento e morfologia. De qualquer modo, as feições apresentadas na microestrutura avaliada dos compósitos indicam que a DEF já afetou a sua integridade, fragilizando os compósitos como um todo aos 365 dias e, independentemente do nível de expansão atingido, levando em consideração as perdas de quase 20% da capacidade resistente na tração, os danos poderão ser ainda maiores. Portanto, na presença do cimento pozolânico testado, não houve mitigação do fenômeno da DEF nos compósitos avaliados.

4. CONCLUSÃO

A partir das análises do comportamento dos concretos e argamassas com o cimento CP IV-32 frente à DEF, perante resultados experimentais, foram constatadas as seguintes conclusões:

- Os fatores estudados e apresentados neste estudo como tempo e ambiente de exposição, tipo de cimento e cura a 85ºC, influenciaram diretamente a ocorrência da DEF e de sua magnitude.
- O concreto indicou que o desenvolvimento dos danos da DEF ocorre de forma mais rápida se comparado à argamassa testada.
- A argamassa apresentou menores impactos de DEF até um ano de estudo, conforme comportamentos avaliados a partir das propriedades determinadas associados às menores expansões atingidas em relação ao concreto, 0,10% e 0,25%, respectivamente.
- Para as condições empregadas na presente pesquisa é possível afirmar que o estudo do potencial de desenvolvimento da DEF em concreto se apresenta mais adequado e confiável, levando-se em conta a segurança e a durabilidade das estruturas de concreto.
- Por fim, o cimento Portland CP IV-32 avaliado não foi capaz de mitigar o fenômeno da DEF nos compósitos avaliados.

5. AGRADECIMENTOS

À Faculdade Meridional (IMED) campus de Passo Fundo/RS pelo apoio prestado para a realização desta pesquisa. À Furnas Centrais Elétricas S.A., pelo apoio logístico, financeiro e técnico, além da realização das análises microestruturais por 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*".

REFERÊNCIAS

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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-1012:** Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution, 2019.

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, 2018.

_____. **NBR 15577-6**: Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto. Rio de Janeiro, 2018.

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

_____. NBR 7215: Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2015.

BLANCO, A. *et al*. **Lessons learned about the diagnosis of pathologies in concrete dams: 30 years of research and practice**. Construction and Building Materials, v. 197, p. 356-368, 2019.

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.

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, Curitiba, 2020.

FU, Y. **Delayed Ettringite Formation in Portland cement products.** Degree of Doctor – University of Ottawa,1997.

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

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

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

HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C.; TORRES, J. R. Estudo de caso envolvendo ataque combinado da RAA e DEF em concreto de fundação de edificação. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC – IBRACON.** Alagoas, 2012.

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".** Goiânia: Ed. Furnas, 2020.

KARTHIK, M. M.; MANDER, J. B.; HURLEBAUS, S. **Simulating behaviour of large reinforced concrete beam-column joints subject to ASR/DEF deterioration and influence of corrosion.** Engineering Structures, v. 222, p. 111064, 2020.

KCHAKECH, B. *et al*. Experimental study of the influence of late heat treatment on the risk of expansion associated with delayed ettringite formation. **In: Proceeding of 15º International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – 15th ICAAR,** Ed. Bernardes, H.; Hasparyk, N.P. São Paulo, 2016.

MARTIN, R-P.*;* SANCHEZ, L.; FOURNIER; B.; TOUTLEMONDE, F. Evaluation of different techniques for the diagnosis & prognosis of Internal Swelling Reaction (ISR) mechanisms in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 956-964, 2017.

MELO, R. H. R. Q.; SCHOVANZ, D.; TIECHER, F.; HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C. **Método Francês *versus* método Brasileiro para avaliar a DEF em concreto.** XVI Congresso Latinoamericano de Patología de La Construcción e XVIII de Control de Calidad em la Construcción, Brasil, 2021.
R.H.R.Q. Melo1, D. Schovanz2, F. Tiecher3*, N. P. Hasparyk4*, S. C. Kuperman5*

OUVRIER-BUFFET, F. *et al*. **Linear and nonlinear resonant ultrasonic techniques applied to assess delayed ettringite formation on concrete samples**. Construction and Building Materials, v. 275, p. 121545, 2021.

PICHELIN, A. *et al*. **Sustainability, transfer and containment properties of concrete subject to delayed ettringite formation (DEF**). Cement and Concrete Composites, v. 113, p. 103738, 2020.

PORTELLA, K. F. HASPARYK, N.P.; BRAGANÇA, M.; BRONHOLO, J.L.; DIAS, B.; LAGOEIRO, L.E.. Multiple techniques of microstructural characterization of DEF: Case of study with high early strength Portland cement composites. Construction and Building Materials. V. 311, p. 125341, 2021.

RASHIDI, M.; PAUL, A.; KIM, J-Y.; JACOBS, L.J. Insights into delayed ettringite formation damage through acoustic nonlinearity. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 1-8, 2017.

SANCHEZ, L. F. M.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. Comprehensive damage assessment in concrete affected by different internal swelling reaction (ISR) mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 107, p. 284 303, 2018.

TOSUN, H. Effect of SO_3 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.

ZHANG, Z. *et al*. 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.

ZHANG, H.; LI, L.; WANG, W. **Effects of temperature rising inhibitor on nucleation and growth process of ettringite.** Journal of Solid-State Chemistry, v. 274, p. 222-228, 2019.