https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.011

UMA ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DE CONCRETO COM E SEM SÍLICA ATIVA FRENTE À DEF

"A comparative analysis of the behavior of concrete with and without silica fume against DEF"

S. OLIVEIRA[1,2]*, A. M. OLIVEIRA[2], N.P. HASPARYK[1]
*Autor de contato: solanda@furnas.com.br

[1] ELETROBRAS Furnas, Rodovia BR 153, s/n - Zona Rural, Aparecida de Goiânia - GO, 74923-650, Brasil. solanda@furnas.com.br* e nicole@furnas.com.br

[2] LABITECC – Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil, PPG-GECON – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, EECA – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, UFG – Universidade Federal de Goiás, Rua Universitária, nº 1488, Qd. 86, Lt. Área, Setor Universitário, Goiânia - GO, 74605-220, Brasil, andriellimorais@ufg.br

RESUMO

Entre as reações expansivas deletérias que afetam o desempenho e a durabilidade de estruturas de concreto, se encontram aquelas que envolvem os íons sulfatos. Quando esses íons provém de fontes internas, ainda existem lacunas sobre as medidas preventivas mais apropriadas relacionadas aos materiais constituintes do concreto, a não ser que o mesmo seja refrigerado quando do seu lançamento e aplicação. Diante do exposto, este trabalho apresenta resultados de uma pesquisa - em laboratório para avaliar a interveniência da adição de sílica ativa em concretos frente à DEF (*Delayed Ettringite Formation* – Formação tardia de etringita). Desta forma, os protocolos para a indução da DEF nos concretos estudados seguiram as recomendações de método desenvolvido no Brasil. Assim, ensaios para avaliação da expansão, de propriedades mecânicas e análise microestrutural foram realizados com o objetivo de avaliar o potencial desta adição mineral em mitigar expansões e danos em decorrência da DEF.
Palavras-chave: DEF; sílica ativa; expansão; concreto; etringita.

ABSTRACT

Among the deleterious expansive reactions that affect the performance and durability of concrete structures are those involving sulfate ions. When these ions come from internal sources, there are still gaps about the most appropriate preventive measures related to the constituent materials of the concrete, unless it is cooled when it is launched and applied. In view of the above, this work shows the results of an experimental research in the laboratory to evaluate the intervention of the addition of silica fume in concrete against DEF (*Delayed Ettringite Formation*). Thus, the protocols for the induction of DEF in the concretes studied followed the recommendations of a method developed

in Brazil. Thus, tests to evaluate expansion, mechanical properties and microstructural analysis were carried out with the objective of evaluating the potential of this mineral addition to mitigate expansions and damage due to DEF.
Keywords: DEF; silica fume; expansion; concrete; ettringite.

1. INTRODUÇÃO

A DEF (*Delayed Ettringite Formation*) é um fenômeno de deterioração do concreto, sendo a fonte de sulfatos interna da própria matriz de cimento. A DEF também pode ser descrita como a formação do composto etringita que ocorre após o endurecimento completo do material cimentício, a qual resulta na formação de produtos expansivos que aumentam a tensão interna dos concretos e ocasionam fissuras, redução de resistência mecânica e da rigidez e, portanto, da capacidade portante das estruturas de concreto (HASPARYK *et al.*, 2022; HASPARYK; KUPERMAN, 2019; TAYLOR; FAMY; SCRIVENER, 2001).

Além disso, a DEF ocorre quando o concreto nas primeiras horas de hidratação é submetido a elevadas temperaturas (acima de 60º-65ºC), permanecendo em condição úmida após o retorno à temperatura ambiente. Assim, uma das formas potenciais de redução da temperatura de hidratação do cimento e, portanto, de minimizar a DEF é a utilização de adições minerais em substituição parcial ao cimento. Neste sentido, alguns estudos vem sendo desenvolvidos e alguns resultados parecem promissores. Por exemplo, Silva, Ribeiro e Divet (2021) estudaram concretos com substituição parcial de cimento por vários teores de cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa, metacaulim, cinza volante de biomassa, fíller calcário e resíduos de mina de tungstênio. Os pesquisadores observaram que as adições minerais pozolânicas, e com hidraulicidade, podem reduzir as expansões da DEF, quais sejam cinza volante, sílica ativa, metacaulim, resíduos de mina de tungstênio e escória de alto forno. Por outro lado, o mesmo não foi observado para adições minerais como filler calcário e cinza volante de biomasssa.

Nos estudos em argamassas apresentados por Oliveira, Oliveira e Hasparyk (2021), foi observado que o uso da sílica ativa refletiu em expansões inferiores a 0,04%, enquanto a argamassa de referência (sem a incorporação da sílica ativa) apresentou expansão final bastante expressiva, e da ordem de 0,40% em estudos até 6 meses. Entretanto, vale destacar que os ensaios mencionados foram realizados em argamassas. Pesquisas já com concretos e adição mineral de cinza de casca de arroz mostraram o seu potencial de redução das expansões, porém apenas parcialmente, conforme disposto em Amantino *et al.* (2021). A expansão medida no concreto preparado com 8% desta adição ainda mostrou-se elevada e igual a 0,23%, enquanto para o concreto de referência, igual a 0,30%. .

Diante do exposto, embora as adições minerais pozolânicas possam contribuir em mitigar expansões, ainda não há um consenso sobre a definição dos teores ótimos destas adições a serem utilizados frente à formação tardia de etringita - DEF, nem do tipo de adição *versus* temperatura máxima atingida. Assim, o presente trabalho pretende avançar com contribuições nesta direção. A sílica ativa foi escolhida para o presente estudo por ser uma adição mineral de alta reatividade e com extensivo uso no Brasil, sobretudo em grandes obras. Foi objetivo deste estudo avaliar a capacidade da sílica ativa em mitigar efeitos deletérios da DEF, considerando-se a análise de propriedades mecânicas, alterações microestruturais e físicas em concretos.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2 Programa experimental

2.1 Materiais e dosagem dos concretos

Os concretos moldados em laboratório contemplaram os seguintes materiais:

- Cimento Portland: Cimento de alta resistência inicial, tipo CP V- ARI
- Adição mineral: Sílica ativa
- Agregados: Miúdo e graúdo de origem granítica
- Aditivo: polifuncional (base de lignosulfonato e policarboxilato)

Na Tabela 1 são indicadas as principais características do cimento e da sílica ativa.

Tabela 1 – Principais características: CP V-ARI e sílica ativa (%).

SiO_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	$Na_2O_{eq.}$	SO_3	PF	RI
CP V-ARI								
18,74	4,19	2,79	62,49	1,00	0,73	3,29	4,22	0,73
Sílica ativa								
95,21	0,22	0,18	0,45	0,47	0,66	0,00	2,46	N.a.

$Na_2O_{eq.}$: 0,658.K_2O+Na_2O; Massa específica (g/cm³): 3,09-cimento; 2,25-sílica ativa
PF: perda ao fogo; RI: resíduo insolúvel. N.a. Não aplicável.

Os agregados miúdo e graúdo possuem módulo de finura de 3,11 e 6,82, respectivamente.

A produção dos concretos seguiu as orientações contidas na NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm), destinados aos ensaios mecânicos, e prismáticos (7,5 cm x 7,5 cm x 28,5 cm), aos estudos de expansão. O traço do concreto adotado para os estudos foi de 1:1,6:1,9:0,46.

Para a indução da DEF, foi seguido o protocolo contido em Hasparyk *et al*. (2020), a saber: 1) período de pré-cura, em câmara úmida por 6 horas; 2) aquecimento com imersão em água (10°C/h) até 85°C; 3) manutenção em 85ºC por 12 horas; 4) resfriamento (10°C/h) até a temperatura de 38ºC. Após o final deste processo (cura térmica), os CPs ficaram acondicionados em ambiente de exposição a 38ºC, imersos em água, até a data para a realização dos ensaios.

2.2 Ensaios e investigações realizados

Os ensaios realizados ao longo de 90 dias envolveram a retirada dos CPs do ambiente de exposição, sendo ensaiados imediatamente após essa retirada, todos, sempre, na mesma condição.

De forma a avaliar o comportamento expansivo no tempo, os comprimentos dos prismas de concreto moldados foram monitorados para a avaliação do potencial de desenvolvimento da DEF. Foram determinadas também as propriedades mecânicas dos concretos (resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade), seguindo as normas da ABNT NBR 5739 (2018), NBR 7222 (2011) e NBR 8522-1 (2021), além de ter sido executado o ensaio de ultrassom para a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, conforme a NBR 8802 (2019).

Ainda, foi determinado o índice de deterioração dos concretos até a idade final de 90 dias de ensaio, seguindo os protocolos contidos em Sanchez *et al.* (2018) e Sanchez, Drimalas e Fournier (2020), e realizada uma análise comparativa entre os dois concretos e as três idades. Finalmente, aos 90 dias, amostras coletadas do interior dos CPs foram submetidas a análises por microscopia eletrônica de varredura para uma avaliação da microestrutura dos concretos e das diferenças envolvendo a formação da etringita tardia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das expansões médias determinadas em laboratório nos prismas de concreto, para cada mistura (concreto de referência – REF. e concreto com sílica ativa – SA), se encontram apresentados na Figura 1, a seguir.

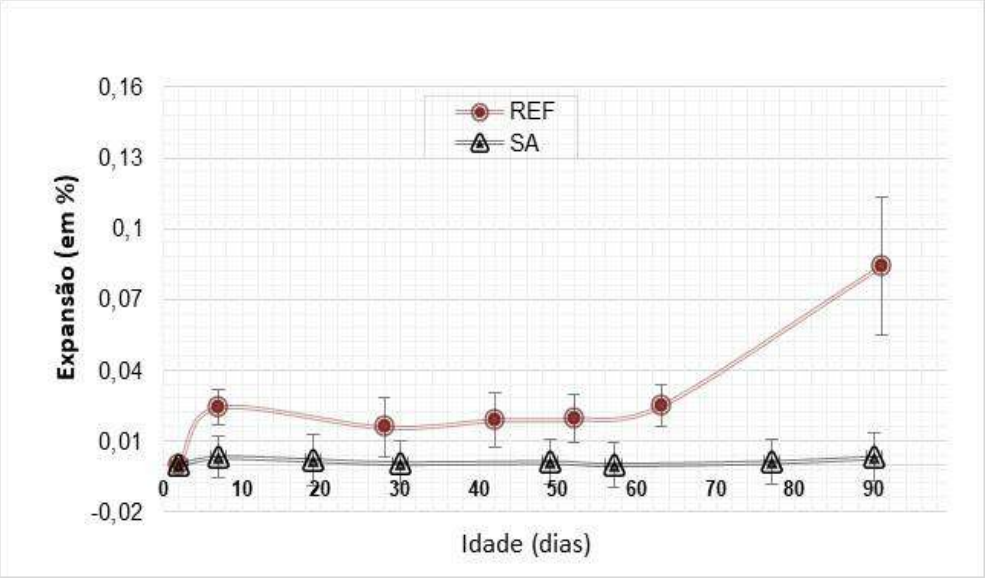


Figura 1 - Expansões ao longo do tempo.
Fonte: as autoras.

As expansões determinadas para a REF. até a idade avaliada foram, em média, dez vezes maiores do que aquelas observadas para a SA. Observa-se ainda que o concreto de referência só acusou crescimento e expansões elevadas após 2 meses, chegando a uma média de 0,08% aos 3 meses de ensaio, embora nessa idade as dispersões tenham se apresentado maiores do que aquelas observadas nas idades anteriores para essa mistura. Já a SA propiciou até a idade avaliada expansões abaixo de 0,01%, em média, embora resultados individuais já suplantem esse valor. O limite para concreto, para considerar o potencial de desenvolvimento da DEF é de 0,04%. Como o estudo foi realizado até 3 meses, torna-se necessária uma avaliação perdurando os estudos até idades mais avançadas.

O gráfico apresentado na Figura 2 agrupa os dados das expansões médias obtidas para cada mistura, nas três idades de 1, 2 e 3 meses. O crescimento é abrupto para REF. aos 3 meses, indicando um desenvolvimento mais rápido das reações internas com os íons sulfato, ao passo que para SA a taxa de crescimento foi menor haja vista a densificação da matriz e o refinamento dos poros ocasionado pela incorporação da sílica ativa, retardando assim a migração dos íons e reações envolvidas na DEF.

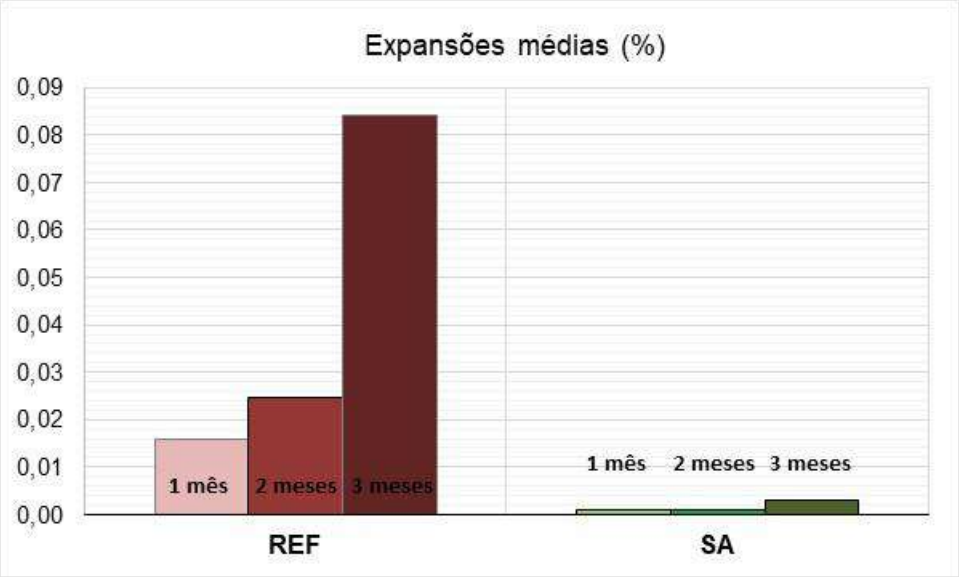


Figura 2 - Comportamento expansivo das misturas no tempo.
Fonte: as autoras.

Nos estudos executados também em concretos por Amantino *et al.* (2021), na presença da adição cinza de casca de arroz (CCA), foram observadas menores taxas de expansão quando comparadas à uma amostra de referência, sem a adição, porém, o comportamento expansivo não cessou na avaliação ao longo do tempo. As expansões atingiram 0,23% na presença da CCA aos 6 meses. Nesse estudo, a temperatura de pico foi de 85ºC. Em Hasparyk *et al*. (2022), foi observado o maior potencial de expansão de um CP V-ARI em relação a um CP IV, com taxas aos 12 meses iguais a 1,2% e 0,2%, respectivamente. Vale destacar, segundo Hasparyk *et al.* (2021), que o limite a partir do qual deve-se considerar o potencial deletério da DEF em concretos é de 0,04%.

As Figuras 3 e 4 e registram os comportamentos médios dos concretos em termos das propriedades mecânicas de resistência à compressão e à tração, respectivamente, determinadas em laboratório nas idades de 1, 2 e 3 meses.

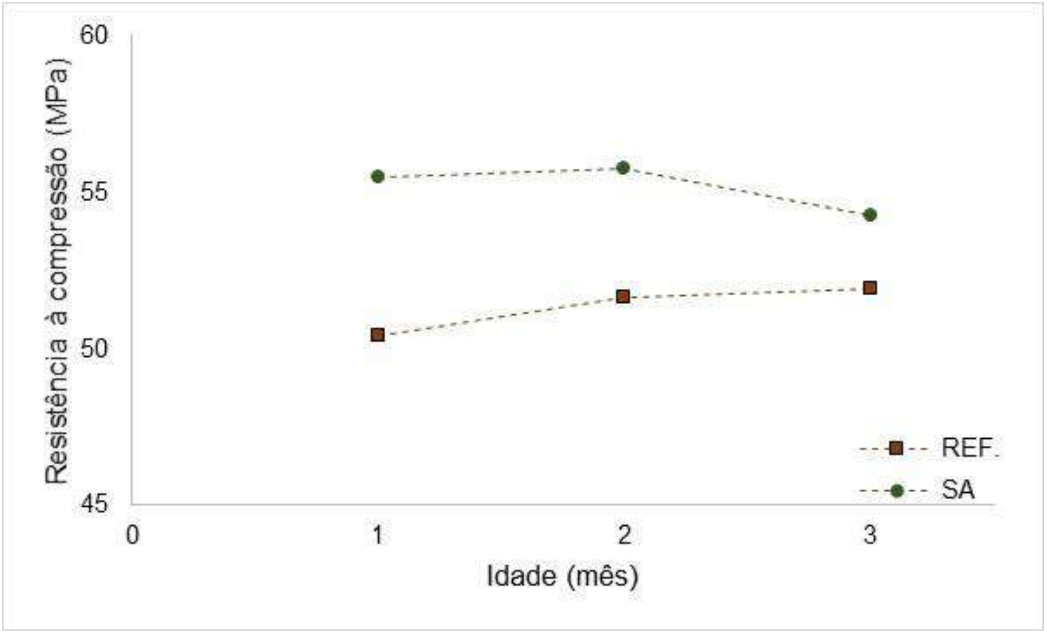


Figura 3 - Resistência à compressão ao longo do tempo.
Fonte: as autoras.

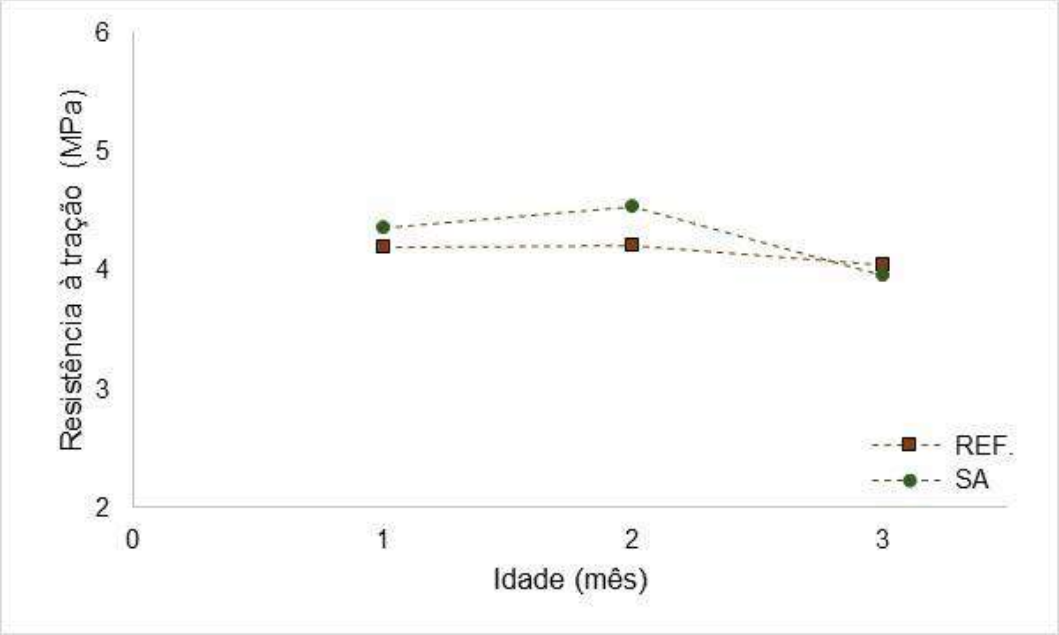


Figura 4 - Resistência à tração ao longo do tempo.
Fonte: as autoras.

De acordo Hamid *et al.* (2018), que utilizaram 15% de sílica ativa em substituição parcial ao cimento (em massa), é esperado um ganho de resistência à compressão, porém, como observado na Figura 3 após 2 meses, no presente estudo, ocorreu uma redução dessa propriedade; esse comportamento pode ser explicado devido ao efeito negativo do fenômeno da formação da etringita tardia na propriedade, sendo necessária a avaliação do comportamento em idades mais avançadas. No estudo de Giannini *et al.* (2018) também foi notado o mesmo comportamento, com reduções da resistência à compressão entre 24% e 41%.

Conforme as Figuras 3 e 4, os valores obtidos para cada uma das propriedades, de resistência à compressão e à tração, são semelhantes nas idades de 1 e 2 meses, porém, após essas idades, ocorre redução. O mesmo comportamento foi observado por Schovanz *et al.* (2021) e Hasparyk *et al.* (2022) em estudos envolvendo o fenômeno da DEF, com reduções da resistência à compressão e à tração, entre 2 e 3 meses, na ordem de 16% e 37%, respectivamente. Os pesquisadores citados também verificaram que mesmo utilizando o cimento Portland pozolânico (contendo cinza volante) ocorreram reduções das propriedades mecânicas ao longo do tempo. Nesse sentido, verifica-se que as adições nem sempre desempenham o papel esperado em termos de mitigação de reações expansivas. Pode haver um determinado teor, em geral indicado como ótimo, para o seu melhor desempenho. Ainda, para a reação álcali-agregado, por exemplo, existem teores péssimos de adição pozolânica com os quais as expansões se intensificam (Hasparyk, 1999; 2011). Silva *et al.* (2021) mostram em seus estudos de longa duração que nem sempre as adições minerais podem combater os fenômenos expansivos causados pela DEF.

As Figuras 5 e 6 e registram os comportamentos médios dos concretos em termos do módulo de elasticidade estático, determinado em laboratório, e da velocidade de propagação de ondas, determinadas por ultrassom, respectivamente, nas três idades avaliadas.

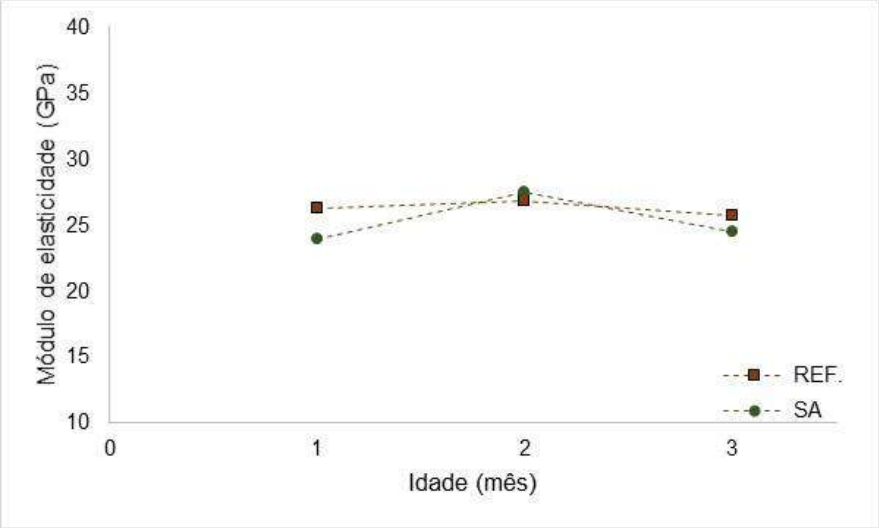


Figura 5 - Módulo de elasticidade ao longo do tempo .
Fonte: as autoras.

De acordo com a Figura 5 nota-se um comportamento semelhante do módulo de elasticidade estático com as outras propriedades mecânicas, sendo consistente com alguns estudos prévios, como os de Giannini *et al.* (2018), com reduções dessa propriedade entre 59% e 75%. Em Hasparyk *et al.* (2022), os valores são parecidos, chegando a 72% de perdas, e os pesquisadores observaram que essa propriedade foi a que se mostrou mais sensível ao fenômeno deletério da DEF. Nesses estudos, à medida que ocorreu o aumento das expansões o mesmo foi notado para o módulo de elasticidade, podendo indicar a incidência da fissuração e fragilização da zona de transição.

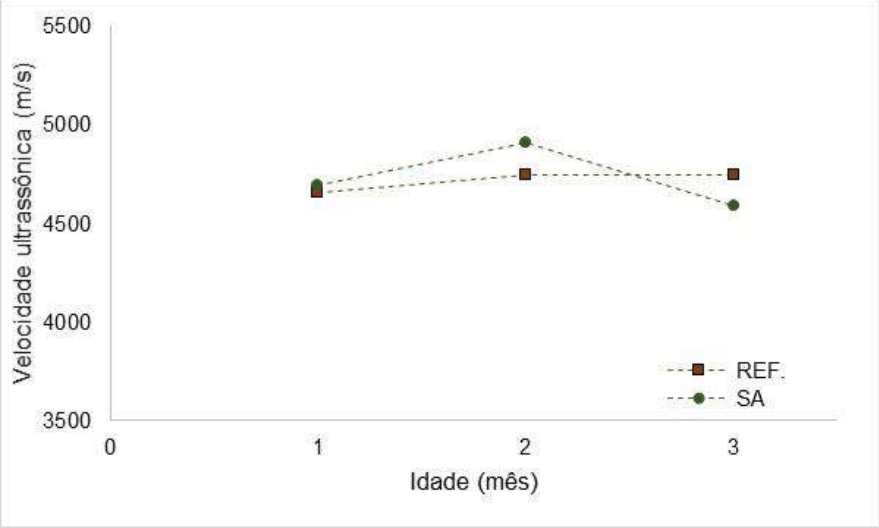


Figura 6 - Velocidade ultrassônica ao longo do tempo.
Fonte: as autoras.

Conforme a Figura 6, os concretos indicaram velocidades ultrassônicas acima de 4500 m/s, embora seja observada redução da velocidade entre 2 e 3 meses para a presente pesquisa, estando em consonância com o comportamento observado pelo módulo, na presença da sílica ativa. Já para a referência, a velocidade até a idade de 3 meses avaliada não mostrou ainda redução. De acordo com Bragança *et al.* (2021) esse parâmetro não foi considerado tendo uma boa correlação aplicável com as expansões devido à DEF em seus estudos em laboratório.

Uma vez que a formação da etringita tardia – DEF – pode provocar influências negativas nas propriedades dos concretos ao longo do tempo, foi determinado um fator de queda das propriedades (em %) na última idade do estudo, 3 meses, conforme apresentado na Figura 7. Além disso, com o objetivo de quantificar o nível de deterioração dos concretos pela DEF, foi adotado o método disposto em Sanchez, Drimalas e Fournier (2020), conforme resultados para o DRI apresentados na Figura 8.

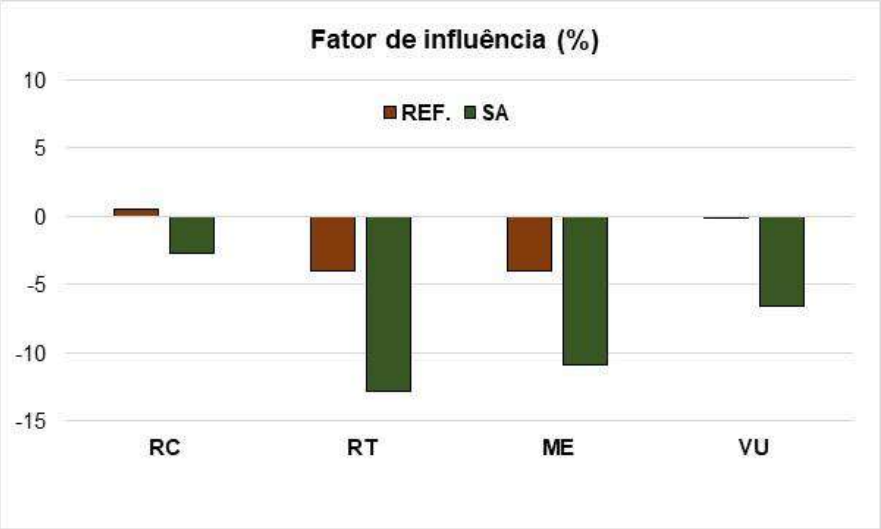


Figura 7 - Fator de influência da DEF Comportamento expansivo das misturas no tempo.
Fonte: as autoras.

Observa-se que as na idade de três meses ambas as misturas sofrem quedas nas propriedades mecânicas e, em especial, na tração e módulo, sendo a resistência à compressão menos afetada até essa idade. Ainda, o concreto contendo a sílica ativa apresentou reflexos mais expressivos, com perdas, em média, de 12%, enquanto para a referência, essa queda ficou na ordem de 4%. O END por ultrassom acompanha o mesmo comportamento para a sílica ativa por meio da velocidade de propagação de ondas, porém, em menor escala.

Outros estudos em concretos também indicam continuidade do comportamento expansivo ao longo do tempo, com importantes reflexos negativos na resistência à compressão e no módulo de elasticidade, com quedas da ordem de 40% e 20%, respectivamente, segundo Amantino *et al.* (2021). Hasparyk *et al.* (2022) também observaram, em estudos de maior duração (365 dias), reflexos expressivos nas propriedade mecânicas de concretos sem adições, chegando a perdas maiores do que 60% para resistência à compressão e tração, e chegando a quase 80%, para o módulo de elasticidade, com um cimento de alta resistência inicial. Nesse caso, as expansões atingidas pelos concretos chegaram a mais de 1%, justificando os grandes danos observados. Já em relação aos concretos contendo um cimento pozolânico (tipo CP IV, com cinza volante), as perdas ficaram abaixo de 10% para as resistências avaliadas, e o módulo praticamente não sofreu alteração.

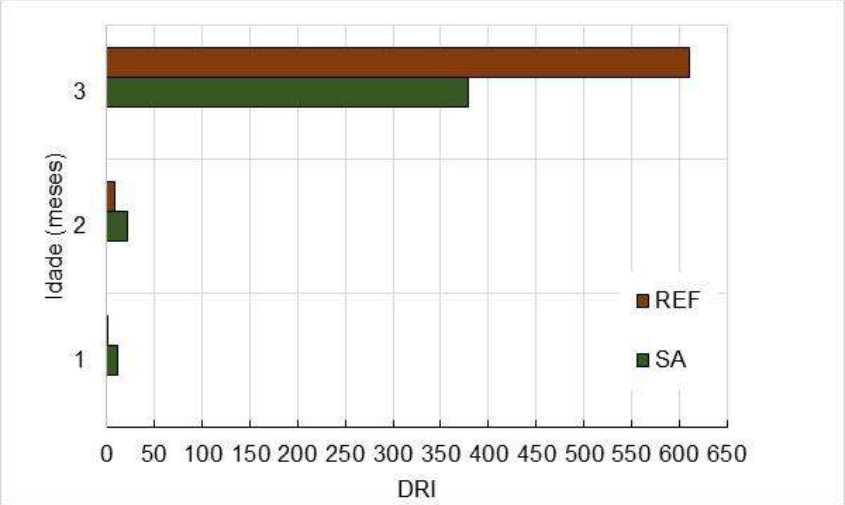


Figura 8 - DRI determinado para os concretos até 3 meses.
Fonte: as autoras.

As avaliações realizadas para a determinação do DRI indicam, para ambos os concretos, que a idade de aceleração do processo de deterioração da DEF ocorreu entre 2 e 3 meses (Figura 8). Existe um gap bastante expressivo e importante, reforçando o desenvolvimento precoce da etringita tardia para ambos os concretos. Embora o DRI determinado para a sílica ativa (380) tenha apresentado menor valor na idade de três meses ao ser comparado com aquele da REF. (611), o obtido com essa adição já se apresenta bastante elevado. Estudos realizados por Martin *et al.* (2017), Sanchez *et al*. (2018) e Sanchez, Drimalas e Fournier (2020) mostram concretos bastante deteriorados por DEF ou mesmo por ataques conjugados com índices da ordem de 1300.

A partir de uma correlação entre o DRI e as expansões médias atingidas ao longo do tempo, e até 3 meses, observa-se as diferenças do comportamento entre as duas misturas, conforme Figura 9. Porém, mesmo para faixas menores de expansão, a SA já se apresenta com sintomas de deterioração da etringita tardia, sugerindo apenas um processo expansivo mais defasado em relação à REF. Os sintomas mais expressivos observados por microscopia estereoscópica foram PP (Poro com produto de reação), PADC (Partículas de agregado desagregadas/corroídas), BB (Borda branca, na Zona de Transição), FPC (Fissura na pasta de cimento) para a SA, e FPRPC (Fissura com produto de reação na pasta de cimento), PADC, BB e PP para a REF.

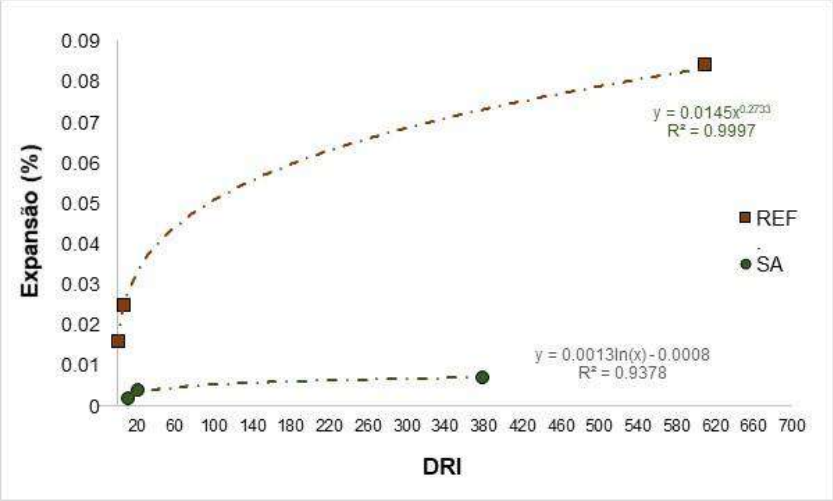


Figura 9 - Correlação entre o DRI e as expansões.
Fonte: as autoras.

As análises realizadas por MEV revelaram que ambos os concretos, aos 3 meses, apresentam feições e produtos indicativos do desenvolvimento da DEF.

No que diz respeito à formação da etringita secundária nos poros dos concretos, notou-se que ambas as misturas contém deposições nos poros. A única diferença observada foi que na mistura com a sílica ativa, alguns poros ainda se encontravam vazios ou parcialmente preenchidos, e na amostra de referência, a maioria dos poros se apresentavam quase que totalmente preenchidos por aglomerações de cristais de etringita (Figura 10). Entretanto, quando poros eram analisados de forma mais ampliada e detalhada, fissuras radiais ou no entorno eram observadas, conforme pode ser visto na Figura 11, com setas indicadas. Ainda, na mistura com sílica ativa, em poro totalmente preenchido é clara a fissura induzida pelo preenchimento e expansão da etringita (E).

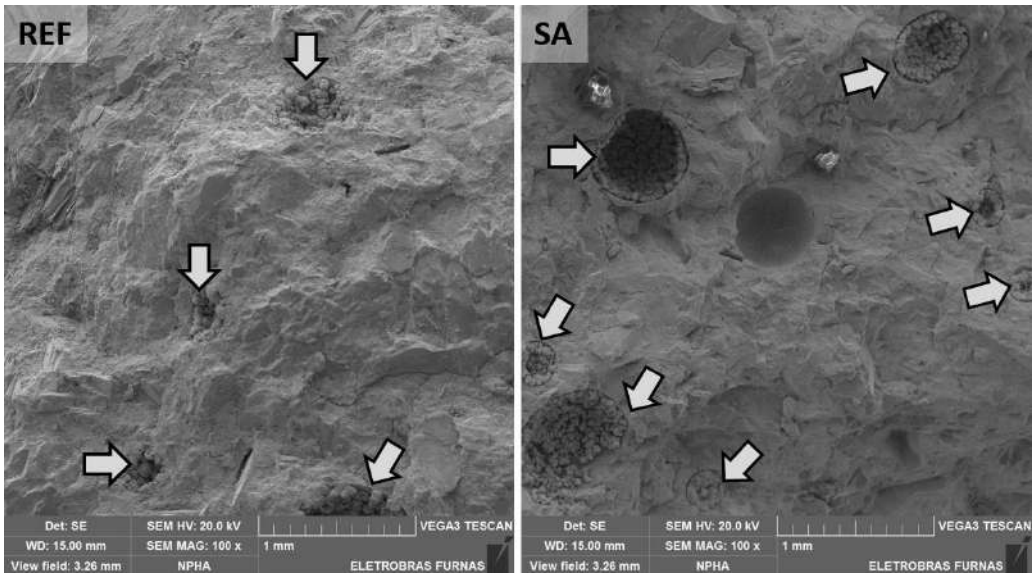


Figura 10 – Etringita neoformada nos poros das duas misturas.
Fonte: as autoras.

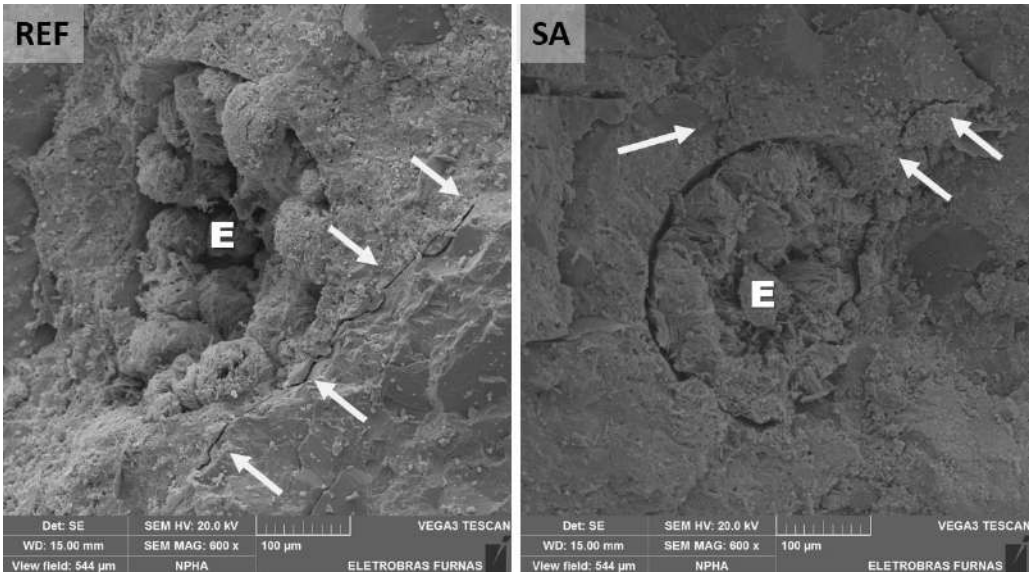


Figura 11 – Detalhe de poros com etringita (E) fissuras no entorno (setas).
Fonte: as autoras.

Entretanto, quando a matriz cimentícia foi analisada em maiores ampliações, notou-se que ambas as misturas continham vários cristais de etringita dispersos, destacando a característica mais comprimida dos produtos na amostra de referência, e indicando formações mais massivas além de fragilização da pasta e pulverulência (Figura 12). Ainda, formações de etringita secundária foram observadas nas zonas de transição (círculos tracejados), com perdas de aderência pasta/agregado (setas), conforme na Figura 13.

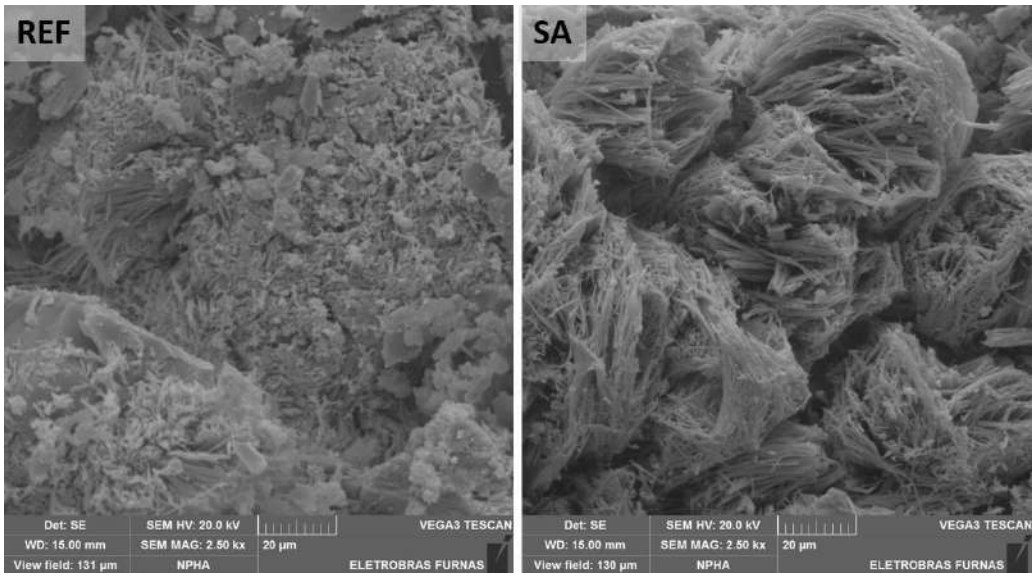


Figura 12 – Matriz cimentícia contendo formações massivas (REF.) e aglomerações de etringita (SA).
Fonte: as autoras.

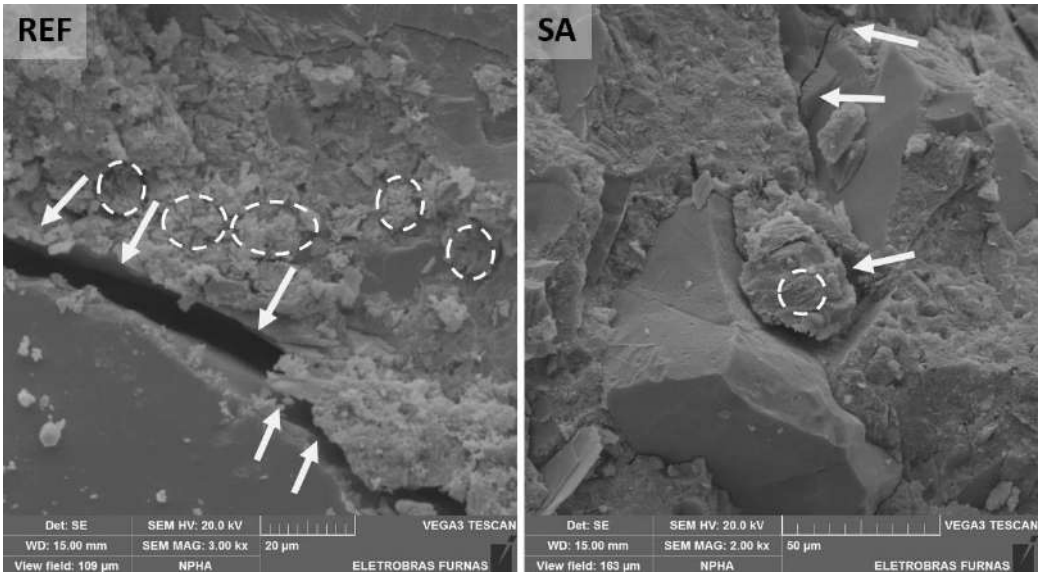


Figura 13 – Zona de transição com etringita e fragilização na interface.
Fonte: as autoras.

Feições microestruturais de compósitos acometidos pela etringita tardia, como as observadas e apresentadas anteriormente, também foram observadas por vários pesquisadores, destacando BRONHOLO (2020); SCHOVANZ *et al.* (2021), Portella *et al.* (2021), MELO (2021) e Hasparyk *et al.* (2022).

4. CONSIDERAÇÕES

O estudo realizado permitiu as seguintes considerações principais:

- O método de indução empregado permitiu a confirmação da ocorrência da formação da etringita tardia (DEF) ao longo do tempo e até a idade de 90 dias em ambas as misturas.
- O emprego da sílica ativa na tentativa de combater a DEF deve ser cauteloso, uma vez que o que se observou no presente estudo apenas um atraso no desenvolvimento das expansões, porém, mesmo com esse atraso, as propriedades já indicaram quedas bem como a microestrutura já comprova a presença de neoformações de etringita.
- As quedas das propriedades até 3 meses de avaliação chegaram a 12%, em média, sinalizando uma potencial continuidade do avanço das formações expansivas em idades mais avançadas.
- Embora as expansões ainda sejam menores na presença da sílica ativa testada, sintomas da DEF já foram possíveis de serem notados pelo DRI, trazendo um alto índice para essa mistura. A característica pozolânica da sílica ativa, que traz tanto um refinamento dos grãos e dos poros, parece estar propiciando apenas um retardo no avanço do fenômeno expansivo e avaliações em idades mais avançadas devem ser realizadas para delinear melhor o comportamento de concretos contendo esta adição. Esse estudo apresentado terá, portanto, continuidade até um ano, no mínimo.
- Recomendações técnicas devem ser feitas no sentido de evitar a geração de calor excessivo interno em concretos ou de limitar a temperatura de cura a valores abaixo de 60-65ºC, por meio de processos de refrigeração dos materiais e do concreto (pré e pós refrigeração) uma vez que as adições minerais não tem mostrado garantias no combate à DEF.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Furnas pelo apoio à pesquisa, fornecimento de todos os materiais e insumos, bem como infraestrutura para a execução do programa experimental, por parte do Departamento de Segurança de Barragens (DSB.E), e Divisão de Tecnologia de Engenharia Civil e Hidráulica (DTEC.E) de Goiânia/GO.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto. Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT_____. NBR 5739: **Concreto. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT_____. NBR 7222: **Concreto e argamassa. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT_____. NBR 8522-1: **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT_____. NBR 8802: **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019.

AMANTINO, G.; HASPARYK, N.P.; TIECHER, N.P. evaluation of the performance of rice husk-ash

in mitigating DEF in concrete. *In:* CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓN, XVI, 2021. **Anais** [...]. Brasil, Evento on-line., Alconpat, 2021.

BRAGANÇA, M.O.G.P.; HASPARYK, N.P.; BRONHOLO, J.L.; SILVA, A.S.; PORTELLA, K.F.; KUPERMAN, S.C. Electrochemical impedance spectroscopy and ultrasound for monitoring expansive reactions and their interactions on cement composites. **Construction and Building Materials**, v.305, p. 1-10, 2021.

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** – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia. Curitiba, 2020.

GIANINNI, 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.

HAMID, H.; CHORZEPA, M. G.; SULLIVAN, M.; DURHAM, S.; KIM, S. S. Novelties in Material Development for Massive Concrete Structures : Reduction in Heat of Hydration Observed in Ternary Replacement Mixtures. **Infrastructures**, v. 3, n. 8, p. 1-20, 2018.

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: ISAIA, GC. Concreto: Ciência e Tecnologia, São Paulo, Brasil: IBRACON. Cap. 27, p.933-1001, 2011.

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

HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C. Reações expansivas deletérias no concreto. **Concreto e Construções**, v. 102, p. 60-66, 2021.

HASPARYK, N.P.; SCHOVANZ, D.; KUPERMAN, S. Instrução Técnica Furnas no GSTE004R0 - Método de Ensaio para a Avaliação do Potencial de Ocorrência da Etringita Tardia (DEF) em Concreto, **Ed. FURNAS**, 2020.

HASPARYK, N.P.; SCHOVANZ, D.; TIECHER, F.; KUPERMAN, S.C. Global analysis of DEF damage to concretes with and without fly-ash. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 15, n.3, p. 1-19, 2022.

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. Avaliação da formação da etringita tardia (DEF) em laboratório e monitoramento de concretos no tempo. **Dissertação de Mestrado** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IMED. Passo Fundo, 2021.

OLIVEIRA, S.; OLIVEIRA, A.M.; HASPARYK, N.P. DEF Induction in the Laboratory and Effect of Silica Fume on the Expansions of Mortars. *In:* CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓN, XVI, 2021. **Anais** [...]. Brasil, Evento on-line., Alconpat, 2021.

PORTELLA, K.F..; HASPARYK, N.P.; BRAGANÇA, M.D.G.P.; BRONHOLO, J.L.; DIAS, B.G.; 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. 1-13, 2021.

SANCHEZ, L.F.M.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B. Assessing condition of concrete affected by internal swelling reactions (ISR) through the Damage Rating Index (DRI). **Cement**, v.1-2, p.100001, 2020.

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.

SCHOVANZ, D.; TIECHER, F.; HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S.; LERMEN, R.T. Evaluation of Delayed Ettringite Formation through Physical, Mechanical, and Microstructural Assays. **ACI Materials Journal**, v. 118, n. 1, p. 101-109, 2021.

SILVA, A.S.; RIBEIRO, A.B.; DIVET, L. Prevention of internal sulphate reaction in concrete. Long-term results of the effect of mineral additions. In: 16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – 16th ICAAR, Lisboa, Portugal, p. 458-467, 2021.

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