CAPÍTULO 78 · Parte V · Diagnóstico
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/gryfmx49
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/xgrv6113

OCORRÊNCIA CONCOMITANTE DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E ATAQUE INTERNO POR SULFATOS EM BLOCO DE FUNDAÇÃO DE EDIFÍCIO

João Ricardo Pereira da Silva[1]*
*Autor de contato: eng_jrps@hotmail.com

[1] Professor Doutor Departamento de Engenharia Civil, UNIT-PE/NARDO Engenharia&Consultoria, Recife, Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta a investigação das manifestações patológicas observadas em blocos de fundação de um edifício residencial localizado em Recife-PE. A estrutura apresentava fissuração mapeada e exsudação. A análise envolveu ensaios de resistência à compressão, pacometria, carbonatação, além de avaliações microestruturais (ME, MLT e MEV/EDS) e químicas. Os resultados indicaram dispersão na resistência do concreto e ausência de carbonatação ou ataque por cloretos. As análises petrográficas identificaram agregados reativos (quartzo microgranular e tensionado). As microscopias evidenciaram a presença significativa de gel de Reação Álcali-Agregado (RAA) e formação de etringita secundária, associadas a teores elevados de álcalis (0,44%) e sulfatos (0,46%). O conjunto dos resultados indica a ocorrência concomitante de RAA e Ataque Interno por Sulfatos, favorecidos pela umidade constante e pela composição dos materiais constituintes.
Palavras-chave: Reação álcali-agregado; ataque interno por sulfatos; etringita secundária; durabilidade do concreto.

ABSTRACT

This study presents the investigation of pathological manifestations observed in foundation blocks of a residential building located in Recife, Brazil. The structure exhibited map cracking and exudation. The assessment included compressive strength tests, covermeter survey, carbonation testing, as well as microstructural (SM, TLM, and SEM/EDS) and chemical analyses. The results indicated dispersion in concrete strength and absence of carbonation or chloride attack. Petrographic analyses identified reactive aggregates (microgranular and strained quartz). Microscopic examinations revealed significant presence of Alkali–Aggregate Reaction (AAR) gel and formation of secondary ettringite, associated with elevated alkali (0.44%) and sulfate (0.46%) contents. The overall findings indicate the concomitant occurrence of AAR and Internal Sulfate Attack, favored by constant moisture conditions and by the composition of the constituent materials.
Keywords: Alkali–aggregate Reaction; internal sulfate attack; secondary ettringite; concrete durability.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho do concreto em serviço está diretamente relacionado às variáveis inerentes à sua composição, ao processo executivo e às condições ambientais às quais a estrutura é submetida (Griffiths *et al.*, 2023; Fernandes; Broekmans, 2013). No campo da durabilidade, é amplamente reconhecido que reações expansivas internas podem comprometer a integridade do material ao longo do tempo, especialmente quando presentes condições favoráveis ao seu desenvolvimento (Sellier; Multon, 2018; Belghali *et al*., 2025).

Entre os principais mecanismos de deterioração interna observados em estruturas de concreto, destacam-se a Reação Álcali-Agregado (RAA) (Chéruel; Ftima, 2023) e a Decomposição da Etringita Tardia (DEF) (Sanjeewa; Asamoto, 2024), embora distintos quanto à origem, podem produzir manifestações patológicas semelhantes, como fissuração em rede, exsudações e desagregação progressiva da matriz cimentícia (Ollivier; Vichot, 2014).

A Reação Álcali-Agregado (RAA) foi identificada pela primeira vez nos Estados Unidos na década de 1940, por Stanton (Swamy, 1992), e desde então tem sido reportada em diversos países, incluindo o Brasil (Silva *et al*., 2016). A RAA desenvolve-se a partir da interação entre os álcalis do cimento e fases silicosas potencialmente reativas presentes nos agregados, onde a formação de gel expansivo, em ambiente com disponibilidade hídrica, promove tensões internas progressivas e consequente fissuração da matriz cimentícia (Shi *et al.*, 2006; Olajide; Nokken; Sanchez, 2023).

No Brasil, a RAA ganhou notoriedade a partir de 2005 na cidade de Recife, capital do Estado de Pernambuco (Andrade, 2019). Especificamente, relatos em obras de infraestrutura e edifícios têm alertado para a necessidade de investigação detalhada, especialmente em locais com elevada umidade e uso de agregados potencialmente reativos.

A Formação de Etringita Tardia (DEF) está associada a concretos submetidos a elevações térmicas durante o período inicial de cura, nas quais a etringita primária sofre instabilidade e, em idades posteriores, recristaliza-se sob forma expansiva, promovendo fissuração interna progressiva (Hasparyk *et al.*, 2022). Embora frequentemente relacionada a elementos pré-moldados ou a concretos de grande volume, essa manifestação também pode ser observada em estruturas moldadas in loco submetidas a históricos térmicos relevantes (Costa *et al*., 2025). No contexto nacional, casos de DEF vêm sendo diagnosticados com maior frequência, muitas vezes associados a concretos de alto desempenho ou elementos estruturais que sofreram sobrecarga térmica durante a execução (Torres; Andrade, 2016) (Torres; Torres; Andrade, 2024). Algumas construções de concreto têm apresentado imaturidade quanto a sua tecnologia, onde, isso pode afetar diretamente a durabilidade da obra, apresentando problemas inesperados, por exemplo, com o inadequado uso dos materiais de construção (Sims; Poole, 2017).

À luz desse contexto, analisa-se um estudo de caso referente a blocos estruturais de fundação de um edifício localizado no bairro de Boa Viagem, Recife/PE, sob a perspectiva da patologia das construções, onde os resultados obtidos em campo e em laboratório são interpretados de forma integrada para a identificação dos mecanismos de degradação atuantes.

2. METODOLOGIA

A investigação seguiu as diretrizes de inspeção predial estabelecidas pela NBR 16747 (ABNT, 2020), sendo conduzida em duas etapas principais: campo e laboratório. As etapas laboratoriais compreenderam ensaios, nas amostras, de resistência à compressão, microscopia estereoscópica

(ME), Microscopia de luz transmitida (MLT), microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada à espectroscopia de energia dispersiva (EDS), análise petrográfica em lâmina delgada, determinação dos teores de álcalis solúveis em ácido, teor total de enxofre no concreto e determinação do teor de cloretos na profundidade de 15 mm. Cada ensaio foi executado conforme as normas técnicas e procedimentos laboratoriais aplicáveis, de forma a subsidiar a interpretação integrada dos mecanismos de deterioração identificados.

Inicialmente, realizou-se inspeção visual e registro fotográfico da peça estrutural (Figura 1-a), com definição dos pontos de amostragem. A localização das armaduras foi feita por pacometria digital (Figura 1-b), conforme as boas práticas de inspeção estabelecidas pelas normas BS 1881-204:1988 (BS, 1988) e ACI 228.2R (ACI, 2013), de maneira a evitar interferências no processo de extração. Em seguida, efetuou-se a extração de quatro testemunhos de concreto, sendo dois testemunhos por face oposta, conforme NBR 7680 (ABNT, 2015), adotando diâmetro nominal de 100 mm e comprimento de aproximadamente 200 mm (Figura 1-c).

Figura 1 - Etapas da investigação experimental de campo: (a) inspeção visual e registro da fissuração mapeada; (b) ensaio de pacometria digital; (c) extração de testemunhos de concreto.



Fonte: o autor.

Ainda em campo, executou-se o ensaio de carbonatação com indicador de base conforme RILEM CPC-18 (RILEM, 1988).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das análises em campo e laboratoriais realizadas sobre os corpos de prova extraídos das sapatas.

A interpretação dos dados foi conduzida à luz das normas técnicas e referências científicas aplicáveis à patologia das construções de concreto armado e à durabilidade do concreto, buscando identificar indícios químicos e microestruturais compatíveis com a ocorrência de RAA e/ou DEF, bem como compreender os mecanismos de deterioração e o grau de comprometimento microestrutural do material.

3.1. Ensaios de campo

3.1.1 Inspeção visual, pacometria e extração de testemunhos

A superfície do concreto evidenciou um padrão de fissuração mapeada. A pacometria confirmou as localizações das armaduras, facilitando a extração dos corpos de prova e contribuindo para manter a integridade das amostras (Figura 2).

Figura 2 - Corpos de prova de concreto extraídos.



Fonte: o autor.

3.1.2 Profundidade de carbonatação

O ensaio de carbonatação foi realizado na superfície interna do furo correspondente ao ponto de extração do testemunho, de acordo com RILEM CPC-18 (RILEM, 1988). Observou-se coloração rósea em toda a extensão da parede interna do furo (Figura 3), indicando que a região avaliada apresenta pH superior a 9,5, portanto, sem ocorrência de carbonatação (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2016).

Figura 3 - Análise de carbonatação na parede interna do furo.



Fonte: o autor.

Não foi observada alteração de cor no fundo do furo, o que se deve à ausência de aplicação direta do indicador nessa área e não à presença de zona carbonatada.

3.2. Ensaios de laboratório

3.2.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em laboratório, conforme os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando dois testemunhos extraídos do bloco estrutural inspecionado. Os corpos de prova foram previamente retificados e ensaiados em prensa hidráulica de classe 1, garantindo paralelismo das faces e precisão na determinação das cargas de ruptura. Os resultados individuais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de resistência à compressão

Corpo de Prova	Carga de Ruptura (N)	fci,ext (MPa)
1	160436,8	23,0
2	96791,6	13,8

Fonte: o autor.

Os resultados evidenciam uma significativa dispersão na resistência do concreto da amostra analisada, com valores variando entre 13,8 MPa e 23,0 MPa. A “baixa” resistência observada pode estar associada à presença de microfissuração interna, à desagregação local da pasta cimentícia ou à formação de produtos expansivos secundários, características compatíveis com o estágio inicial de processos de RAA. Essa redução localizada de resistência reforça a necessidade de correlação com as análises microestruturais e químicas subsequentes, de modo a identificar se a perda de coesão da matriz está vinculada a reações deletérias internas ou à degradação física do material.

3.2.2 Teor de cloretos

O teor de cloretos solúveis em ácido de duas amostras retiradas do bloco em locais distintos, determinados conforme ASTM C1152 (ASTM, 2020) e expressos em percentual sobre a massa de concreto, apresentaram valores de 0,0035%. O concreto avaliado apresentou baixo teor de cloretos totais, caracterizando meio alcalino preservado e ausência de contaminação iônica significativa. O resultado é coerente com o ensaio de carbonatação, que também demonstrou pH satisfatório em toda a profundidade analisada.

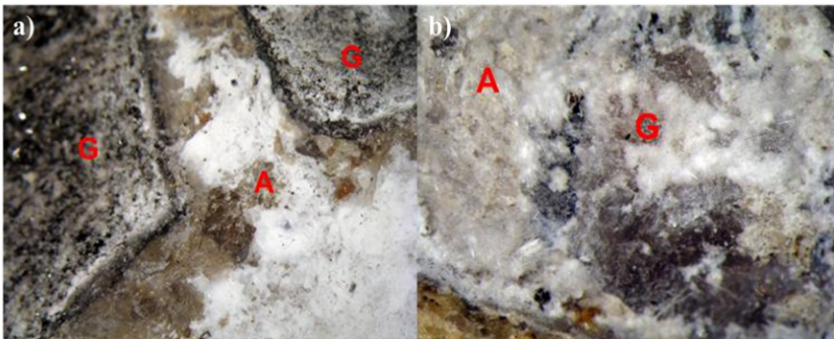
Portanto, os mecanismos de deterioração identificados não estão relacionados à presença de agentes externos do tipo cloretos ou dióxido de carbono, mas a processos de natureza expansiva, compatíveis com as reações RAA e com processos de ataque por sulfatos sugeridos nas análises microestruturais.

3.2.3 Análises microestruturais (ME, MLT, MEV/EDS)

As análises microestruturais evidenciaram características compatíveis com concretos de boa compacidade e homogeneidade, porém apresentando indícios expressivos de reações expansivas internas, observáveis tanto na argamassa quanto nas interfaces agregado/pasta.

A análise ao microscópio estereoscópico, representada na Figura 4, revelou evidências significativas de processos expansivos. Observa-se a presença de material neoformado esbranquiçado preenchendo poros e cobrindo agregados, associado a bordas de reação bem definidas ao redor dos agregados graúdos. Também foram observadas acículas de etringita dispersas na argamassa, cuja origem pode estar associada a processos secundários de ataque por sulfatos, sugerindo possível contribuição da Formação de Etringita Tardia (DEF), ainda que não de forma conclusiva.

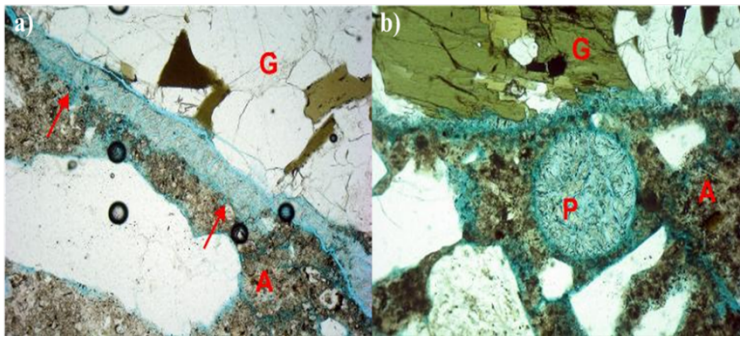
Figura 4 - Análise via ME (6x): a) material neoformado e bordas de reação em agregados; b) acículas de etringita disseminadas na argamassa.



Fonte: o autor.

A análise em microscopia óptica de luz transmitida, representada na Figura 5, complementa as evidências de reações expansivas na amostra. Na imagem a, observa-se a presença de material neoformado na zona de transição entre o agregado graúdo (G) e a argamassa (A), caracterizando a deposição de gel da Reação Álcali-Agregado (RAA) (Hou; Struble; Kirkpatrick, 2004), que compromete a aderência na interface. Paralelamente, a imagem b evidencia poros preenchidos por acículas de etringita.

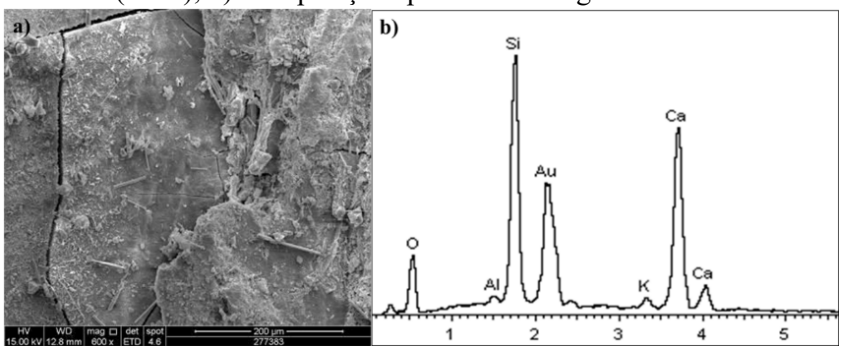
Figura 5 - Análise via MLT (100x): a) material neoformado na interface agregado graúdo (G) e argamassa (A); b) poro preenchido por acículas de etringita (P).



Fonte: o autor.

A análise por MEV, apresentada na Figura 06, forneceu evidências conclusivas sobre os mecanismos de deterioração na amostra. A imagem (a) detalha em maior ampliação a textura do gel, confirmando sua natureza não cristalina. O espectro EDS da imagem (b) revela pico de potássio (K), que pode contribuir para formação do gel de RAA, produto da reação entre uma quantidade significativa de agregado reativo; álcalis (sódio e potássio) disponíveis acima de um nível crítico na estrutura de poros do concreto e a presença de água ou umidade (Diamond, 1975; Helmuth *et al.*, 1993; Fournier; Bérubé, 2000; Hou; Struble; Kirkpatrick, 2004; Rajabipour *et al*., 2015; Shi; Lothenbach, 2020; Da Fonseca *et al*., 2018).

Figura 6 - Análise via MEV/EDS: a) visão geral do gel de RAA desenvolvido sobre agregado graúdo (600x); b) Composição aproximada do gel de RAA.

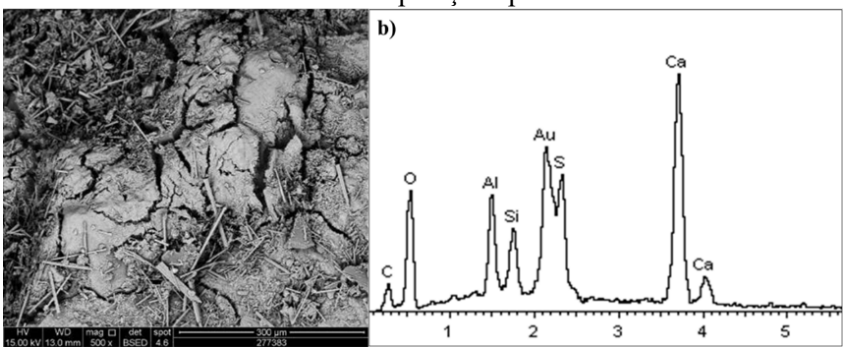


Fonte: o autor.

Ademais, a análise por MEV/EDS complementa a caracterização dos produtos de deterioração na amostra, conforme apresentado na Figura 7. A imagem (a) demonstra a presença de tufos de etringita de grandes dimensões com hábito compactado, distribuídos de forma generalizada na argamassa. O espectro EDS da imagem (b), onde os picos de S, Al, Ca e O característicos da composição química da etringita secundária, podem ser observados (Batic *et al*., 2000; Collepardi, 2003; Ramu *et al*., 2021).

Estas morfologias cristalinas, associadas aos teores elevados de SO_3 identificados nas análises químicas, indicam processo expansivo associado à formação de etringita secundária, atuando simultaneamente com a RAA no processo de degradação do concreto.

Figura 7 - Análise via MEV/EDS: a) acículas de etringita associadas a cristais de portlandita (500x); b) Composição aproximada dos cristais de etringita.

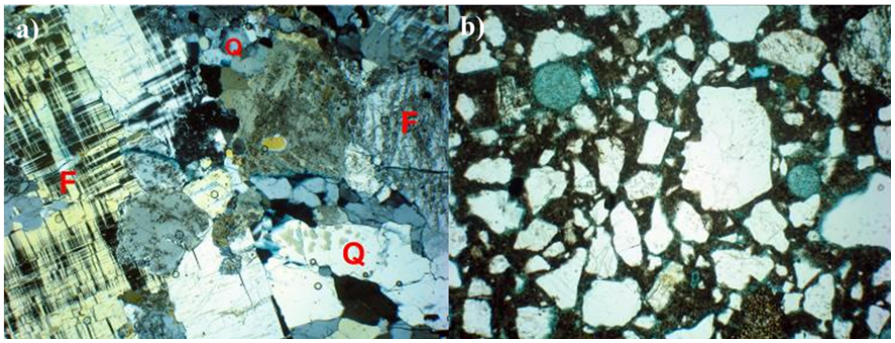


Fonte: o autor.

3.2.4 Análises petrográficas

A análise petrográfica, apresentada na Figura 8, caracterizou a natureza mineralógica dos agregados constituintes do concreto. Na imagem a, observa-se o agregado graúdo com composição predominante de quartzo (Q) e feldspato (F), arranjados em textura granoblástica blastoporfirítica cataclasada, típica da biotita gnaisse identificado. A imagem b detalha o agregado miúdo, constituído por partículas de quartzo subarredondadas a subangulosas de baixa esfericidade. Criticamente, a presença de quartzo microgranular (5-10% da composição) confere ao agregado graúdo característica de potencial reatividade frente aos álcalis do cimento, constituindo fator determinante para o desenvolvimento da Reação Álcali-Agregado (RAA) identificada nas análises microestruturais (Silva, 2016).

Figura 8 - Análise via MLT (25x): a) agregado graúdo com mineralogia predominante de quartzo (Q) e feldspato (F); b) detalhe do agregado miúdo (25x).



Fonte: o autor.

3.2.5 Teores químicos (álcalis e SO_3)

As análises químicas indicaram teores de álcalis solúveis em ácido equivalentes a 0,44% (Eq. Na_2O) no concreto analisado. Esse valor foi obtido a partir da determinação dos teores de Na_2O e K_2O, com cálculo conforme a Equação 1, amplamente adotada como parâmetro de referência para a avaliação da durabilidade do concreto frente à reação álcali-agregado (RAA) (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2016), a partir dos teores individuais de Na_2O (0,024%) e K_2O (0,638%) determinados na análise química.

$$Na_2Oeq = Na_2O + 0{,}658 \cdot K_2O \quad (1)$$

Onde:
Na_2Oeq = equivalente alcalino (Na_2O equivalente) em porcentagem (%);
Na_2O = teor de óxido de sódio em porcentagem (%);
K_2O = teor de óxido de potássio em porcentagem (%).

Essa relação permite normalizar a contribuição dos diferentes álcalis presentes no material cimentício para a solução dos poros, com base na estequiometria molecular dos óxidos de sódio e potássio (Taylor, 1997).

Para fins de comparação em base volumétrica, adotou-se o valor normativo de 2400 kg/m³, representativo para concretos de massa normal conforme a NBR 6118 (ABNT, 2026), resultando em um teor estimado da ordem de 10,66 kg/m³ de concreto. Ressalta-se que essa conversão possui caráter estimativo, uma vez que depende diretamente da massa específica adotada. Contudo, mesmo admitindo variações dentro da faixa típica (2300-2500kg/m³), o teor de álcalis permanece significativamente elevado, de forma que a interpretação dos resultados não se altera de maneira significativa. Esses teores configuram condições químicas potencialmente favoráveis à formação de géis alcalinos e ao desenvolvimento de produtos expansivos (Fanijo; Kolawole; Almakrab, 2021).

Esses valores situam-se acima daqueles usualmente associados a concretos considerados estáveis do ponto de vista da durabilidade, onde estudos de caso reportam a ocorrência de reação álcali-agregado (RAA) mesmo para conteúdo de álcalis disponíveis significativamente inferiores. Nesse contexto, foram identificadas manifestações de RAA para teores da ordem de 1,8 kg/m³ e 2,3 kg/m³, respectivamente (Ozol, 1990; Ozol; Dusenberry, 1992; Andrade; Figuerôa, 2007).

Em relação ao teor de enxofre total, obteve-se o valor de 0,46% no concreto, o que corresponde a 3,45% sobre a massa de cimento. Na ausência da dosagem original, esse cálculo fundamentou-se na premissa técnica de um consumo de cimento de 320kg/m³ e da massa específica do concreto (2400 kg/m³), valor compatível com as exigências da NBR 12655 (ABNT, 2022) para a agressividade ambiental de Recife.

O teor de enxofre total em relação à massa de cimento foi determinado considerando a estimativa de consumo de cimento e a massa específica adotada, conforme a Equação 2:

$$SO_3, cem = \frac{(SO_3, conc \times \rho)}{C} \quad (2)$$

Onde:
SO_3,cem = teor de trióxido de enxofre em relação à massa de cimento (%);
SO_3,conc = teor de trióxido de enxofre determinado na amostra de concreto (%);
ρ = massa específica adotada para o concreto (2400kg/m³);
C = consumo de cimento estimado (320kg/m³).

Os valores obtidos de SO_3 mostram-se superiores aos níveis usualmente reportados para concretos considerados estáveis, nos quais o teor de SO_3 total tende a situar-se, em geral, abaixo de 0,3–0,5%, e os teores de álcalis equivalentes permanecem inferiores a 0,60% (Eq. Na_2O), conforme indicado por Mehta & Monteiro (2014). Tal condição química indica um meio potencialmente favorável à

ocorrência simultânea da reação álcali-agregado (RAA) e à formação de etringita, aliada ao regime de saturação constante da peça analisada (bloco de concreto do presente estudo, inserido no interior da cisterna), conforme discutido por Collepardi (2003).

Somado a isso, a saturação constante da peça, a via mais provável para a formação de produtos sulfatados expansivos corresponde ao ataque por sulfatos, atuando de forma associada aos mecanismos da RAA, conforme discutido por Hasparyk, Kuperman e Torres (2016). A convergência desses dados químicos com as evidências é interpretada de maneira integrada às evidências microestruturais (MEV/EDS) e petrográficas, reforçando o diagnóstico do quadro patológico observado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados experimentais evidenciam que o bloco de fundação analisado apresenta deterioração associada a mecanismos expansivos combinados:

1. Reação Álcali-Agregado (RAA): caracterizada pela presença de gel sílico-alcalino e pela utilização de agregados potencialmente reativos (gnaisse com quartzo tensionado), associada a elevado teor de álcalis (10,66 kg/m³).

2. Ataque por Sulfatos/Etringita Secundária: evidenciado pela cristalização intensa de etringita nos poros e fissuras, associada ao teor de sulfatos (3,45% sobre a massa de cimento) e ao regime de umidade constante.

O conjunto das evidências indica um quadro de degradação química relevante, com comprometimento da integridade microestrutural do concreto, demandando estratégias de reabilitação que considerem o controle da umidade e a mitigação das reações expansivas identificadas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 228.2R - **Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures**. Farmington Hills: ACI, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C1152 - **Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete**. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

ANDRADE, T.; FIGUEIRÔA, J. P. **O ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto - a descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de ponte e edifícios na Região Metropolitana do Recife.** Recife: Universitária da UFPE, 2007. 228 p.

ANDRADE, Tibério Wanderley Correia de Oliveira. **Efeito da distribuição microestrutural de fases mineralógicas na susceptibilidade de rochas da região Nordeste para o desenvolvimento da reação álcali-agregado**. 2019. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16747: **Inspeção predial - Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7680: **Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos - Procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2026.

BATIC, Oscar R *et al*. Secondary ettringite formation in concrete subjected to different curing conditions. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 30, n. 9, p. 1407-1412, set. 2000. Elsevier BV.

BELGHALI, Mohammed *et al*. The influence of sulfate attack on existing concrete bridges: study of external sulfate attack (esa). **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 483, p. 141751, jul. 2025. Elsevier BV.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). BS 1881-204:1988 - **Testing concrete – Recommendations on the use of electromagnetic covermeters**. London: BSI, 1988.

COLLEPARDI, M.. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 25, n. 4-5, p. 401-407, maio 2003. Elsevier BV.

COSTA, Eliane Betânia Carvalho *et al*. Assessment of Premature Failures in Concrete Railway Ties: a case study from brazil. **Materials**, [S.L.], v. 18, n. 13, p. 2994, 24 jun. 2025. MDPI AG.
DA FONSECA, J. M. M., et al. Alkali-Aggregate Reaction: Definition, Influence and Control. **Eng. Appl**. Sci, 2018, 3: 12.

CHÉRUEL, É.; FTIMA, M. Alkali–aggregate reaction in concrete structures: mechanisms, diagnosis and durability implications. **Materials**, v. 16, 2023.

DIAMOND, Sidney. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 329-345, jul. 1975. Elsevier BV.

FANIJO, Ebenezer O.; KOLAWOLE, John Temitope; ALMAKRAB, Abdullah. Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the united states. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 15, dez. 2021. Elsevier BV.

FERNANDES, Isabel; BROEKMANS, Maarten A. T. M.. Alkali–Silica Reactions: an overview. part i. **Metallography, Microstructure, And Analysis**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 257-267, 26 jul. 2013. Springer Science and Business Media LLC.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, n. 2, p. 167-191, 2000.

GRIFFITHS, Steve *et al*. Decarbonizing the cement and concrete industry: a systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 180, p. 113291, jul. 2023. Elsevier BV.

HASPARYK, N. P. et al. Global analysis of DEF damage to concretes with and without fly-ash. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 3, 2022.

HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C.; TORRES, J. R. **Combined attack from AAR and DEF in the foundation blocks of a building**. In: *15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*, 2016, São Paulo. Proceedings… São Paulo: ICAAR, 2016.

HELMUTH, R.; STARK, D.; DIAMOND, S.; MORANVILLE-REGOURD, M. *Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research*. Washington, D.C.: **Strategic Highway Research Program (SHRP)**, National Research Council, 1993.

HOU, Xiaoqiang; STRUBLE, Leslie J.; KIRKPATRICK, R.James. Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 34, n. 9, p. 1683-1696, set. 2004. Elsevier BV.

INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES (RILEM). RILEM CPC-18: **Measurement of hardened concrete carbonation depth**. Paris: RILEM Publications, 1988.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIAO, Y. *et al*. Unrestrained ASR volumetric expansion for mass concrete structures: Review and experimental investigation using 3d laser scanning. **Construction and Building Materials**, v. 399, 132565, 2023.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLAJIDE, O. D.; NOKKEN, M. R.; SANCHEZ, L. F. M. Alkali–Silica Reactions: literature review on the influence of moisture and temperature and the knowledge gap. **Materials**, v. 17, n. 1, p. 10, 2023.

OLLIVIER, Jean-Pierre; VICHOT, Angélique. **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Tradução de: Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. São Paulo: IBRACON, 2014. 606 p.

OZOL, M. A. Alkali-Silica Reaction of Concrete in Electrical Substation Piers Accelerated by Electrical Currents, Petrography Applied to Concrete and Concrete Aggregates, **ASTM STP 1061**, B. Erlin and D. Stark, eds., pp. 106-120, 1990.

OZOL, M.A.; DUSENBERRY, D.O., Deterioration of Precast Panels with Crushed Quartz Coarse Aggregate due to Alkali–Silica Reaction, SP-131 (**American Concrete Institute**, Farmington Hills, 1992), pp. 407–415

RAJABIPOUR, F. et al. Alkali–silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 130-146, 2015.

RAMU, Y. K. et al. Evaluating the impact of curing temperature in delayed ettringite formation using electrochemical impedance spectroscopy. **Construction and Building Materials**, v. 282, p. 122726, 2021.

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

SELLIER, Alain; MULTON, Stéphane. Chemical modelling of Delayed Ettringite Formation for assessment of affected concrete structures. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 108, p. 72-86, jun. 2018. Elsevier BV.

SHI, Caijun; KRIVENKO, Pavel V.; ROY, Della. **Alkali-activated cements and concretes**. Abingdon: Taylor & Francis, 2006. 388 p. ISBN 0-415-70004-3.

SHI, Z.; LOTHENBACH, B. The combined effect of potassium, sodium and calcium on the formation of alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Research**, v. 127, p. 105914, 2020.

SILVA, F. A. N. et al. Alkali-Aggregate Reaction - Brazil Experience. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 21.22, p. 6879-6892, 2016.

SILVA, J. R. P. **Reação álcali-agregado: influência da granulometria do agregado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2016.

SIMS, Ian; POOLE, Alan. **Alkali-aggregate reaction in concrete: a world review**. London: Taylor & Francis, 2017. 805 p.

SWAMY, R. N. (Ed.). **The alkali-silica reaction in concrete.** Glasgow: Blackie and Son, 1992. 348 p. ISBN 0-216-92691-2.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T.. Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife - PE - Brasil. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 357-394, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO).

TORRES, Igor Ferraz; TORRES, Sandro Marden; ANDRADE, Tibério. From risk study to field evidence: an unprecedented and isolated case of delayed ettringite formation in brazil. **Magazine Of Concrete Research**, [S.L.], v. 76, n. 18, p. 1033-1047, 1 set. 2024. Emerald.