

Investigação e mitigação em blocos de fundações afetados pela reação álcali-agregado em edificação na cidade de São Paulo

10.35819/scientiatec.v10i1.6723

Rodrigo Rogerio Cerqueira da Silva¹
Giovanna Apolinário Sala²
Désirée Fernanda Zanovello³

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo apresentar por meio de um estudo de caso, as etapas dos métodos investigativos e a solução adotada como reforço estrutural para os blocos de fundações afetados por reação álcali-agregado (RAA). Através de ensaios mecânicos, físicos e não destrutivos, foi possível avaliar as patologias ocorridas nos blocos de coroamento, comprometendo o seu desempenho estrutural. O diagnóstico encontrado pelos ensaios de microscopia eletrônica de varredura, permitiram confirmar a patologia ocasionado por reação do tipo álcali-agregado, como possível causa do quadro fissuratório observados nos blocos de fundações da edificação. Para recuperação e reforço nas estruturas de fundações foram realizados serviços de impermeabilização, visando a proteção da estrutura contra a ação da umidade, tratamento das fissuras por meio de injeção de resinas de forma a proporcionar o monolitismo da peça, e por fim, aumento de seção do elemento de fundação, por meio de encapsulamento através da estrutura de concreto protendido. Como contribuição científica a presente pesquisa visa a importância de aumentar o banco de dados através de parâmetros e técnicas de recuperação de estruturas, através de patologias ocasionadas através da reação álcali-agregado.

Palavras-chave: Reação álcali-agregado; Patologia em estruturas; Recuperação estrutural; Ensaios não destrutivos; Ensaios mecânicos e físicos.

Abstract: The present work aims to present, through a case study, the stages of the investigative methods and the solution adopted as structural reinforcement for foundation blocks affected by alkali-aggregate reaction (AAR). Through mechanical, physical and non-destructive tests, it was possible to evaluate the pathologies that occurred in the crowning blocks, compromising their structural performance. The diagnosis found by scanning electron microscopy tests, allowed confirming the pathology caused by alkali-aggregate type reaction, as a possible cause of the cracking condition observed in the foundation blocks of the building. For recovery and reinforcement of foundation structures, waterproofing services were carried out, aiming at protecting the structure against the action of humidity, treatment of cracks by injecting resins in order to provide the monolithism of the piece, and finally, section increase of the foundation element, through encapsulation through the prestressed concrete structure. How to scientifically contribute current research aims at the importance of increasing the database through parameters and techniques for recovering structures, through pathologies caused by the alkali-aggregate reaction.

Keywords: Alkali-aggregate reaction; Pathology in structures; Structural repair; Non-destructive testing; Mechanical and physical tests.

¹ Doutor em Engenharia Agrícola pela UNICAMP, E-mail: rodrigorogerioudoutorado@gmail.com

² Bacharel em Engenharia Civil pela UNINOVE, E-mail: giovani.pro@gmail.com

³ Bacharel em Engenharia Civil pela UNINOVE, E-mail: desirez@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto estão sujeitas à presença de umidade, portanto suscetíveis às reações deletérias que podem afetar sua durabilidade, dentre essas, está a reação álcali-agregado (RAA) como uma das manifestações patológicas mais instigantes e estudadas atualmente no âmbito mundial.

Dentre as patologias conhecidas na engenharia civil, a reação álcali-agregado é de grande importância para a realização de pesquisas, principalmente pela falta de terapias eficazes uma vez iniciada a degradação dos materiais (HASPARYK, 2005, LI (2019), FISET ET AL. (2021).

Esta patologia ocorre entre a ação química do concreto diante da interação de agentes externos com os componentes da pasta de cimento, interagindo com os minerais reativos do agregado, sendo que deterioração ocorrer internamente. A reação álcali-agregado é complexa em termos de mecanismo de reação, uma vez que as fontes alcalinas nem sempre são derivadas apenas do cimento Portland e a determinação da reatividade dos agregados nem sempre é uma tarefa simples, portanto, esta é uma ótima área para experimentar e aprofundar a teoria.

Segundo Sanches et al. (2020) atualmente um dos maiores desafios no tratamento de estruturas antigas de concreto, é estabelecer a correlação entre os sinais de deterioração causados por um determinado mecanismo de dano como por exemplo (RAA), e as perdas de eficiência nas propriedades mecânicas, integridade física, durabilidade e desempenho do material afetado por colapso estrutural.

De acordo com Fournier (2018) a análise através de procedimentos mecânicos e microscópicos, são capazes de fornecer uma avaliação diagnóstica do “grau de dano real” do concreto afetado pela reação álcali-agregado ao longo do tempo, proporcionando uma avaliação estrutural mais confiável.

Para entender as causas das patologias, os fatores envolvidos e o tratamento preventivo adequado, é necessário um aprofundamento no problema técnico, e quanto mais informações são armazenadas e processadas na literatura, maior é o banco de dados especializado. Assim os resultados obtidos na presente pesquisa possibilitam estabelecer diagnósticos e processos aplicados na recuperação de fundações afetadas pela reação (RAA).

OBJETIVO

A presente pesquisa tem como objetivo apresentar por meio de um estudo de caso, as etapas dos métodos investigativos e a solução adotada como reforço estrutural para as fundações afetadas por reação álcali-agregado (RAA), contribuindo com literatura, para um maior banco de dados no tratamento de patologias para este fenômeno.

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado é uma reação expansiva e a manifestação patológica surge alguns anos após a concretagem, em forma de fissuras ativas progressivas, em geometria mapeada. Resultando muitas vezes na formação de um gel expansivo, induzindo o elemento de concreto à formação de fissuras e lascas, e como consequência a perda de sua durabilidade e outras propriedades (GOMIDE, 2021; GRAZIA, 2022).

Segundo Lya (2021) sua ocorrência está condicionada à presença simultânea de três fatores como agregado potencialmente reativo, umidade e álcalis, sendo que a reação química ocorrida na (RAA) está atribuída aos constituintes presentes em certos tipos de agregados e componentes alcalinos que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto.

Os estudos realizados por Hasparyk (2005) e Sinno (2019) demonstram que os lugares que apresentam umidade relativa superior a 80% possuem tendência à ocorrência da expansão por RAA. Em locais com umidade relativa superior a 85% e com ciclos de secagem e molhagem, a intensificação da migração e da solubilização dos íons alcalinos na solução nos poros se tornam maiores (KIHARA, 1986).

Outro fator de grande influência é a temperatura, ela funciona como um catalisador da reação, pois em altas temperaturas o concreto tende a ter suas reações químicas aceleradas, assim acontece também com a RAA (VALDUGA, 2002). De acordo com Hasparyk (2005) o gel expansivo se torna viscoso com o aumento da temperatura, assim facilitando a percolação do mesmo nos poros do concreto. Concretos que possuem uma alta relação água/cimento, tem uma maior permeabilidade, com isso permite a entrada da umidade de forma mais proeminente, assim majorando a força de expansão da RAA (FOURNIER E BÉRUBÉ, 2000).

Conforme Cachepa (2017) quanto menor a relação água/cimento há maior formação de uma pasta densa, que tornam mais lento o processo de transporte e entrada de água no concreto, reduzindo assim, a umidade relativa e conseqüentemente as expansões. As pastas de cimento com uma relação água/cimento mais elevada, ainda, contêm maiores volumes de poros capilares e maiores cristais de produtos de hidratação de cimento. Entretanto, de acordo com Berubé e Dorion (2000), quando se tem uma relação de água/cimento maior, pode dar origem as expansões baixas ou altas, dependendo de outros fatores como tamanho do agregado e idade do mesmo. RAA pode ser dividida em dois tipos de reação, como a reação álcali-sílica (RAS), mais comumente encontrada em estruturas de concreto, e a reação álcali-carbonato (RAC) muito menos comum em estruturas (FRARE ET AL., 2023). A reação álcali-sílica (RAS) é proveniente da reação química entre os minerais de sílica instáveis presente nos agregados e os hidróxidos alcalinos (Na^+ , K^+ , OH^-) oriundos da hidratação do cimento Portland. A reação álcali-sílica, conhecida como “câncer de concreto”, é uma reação química entre álcalis na solução dos poros e fases reativas de sílica nos agregados (WANG, 2020).

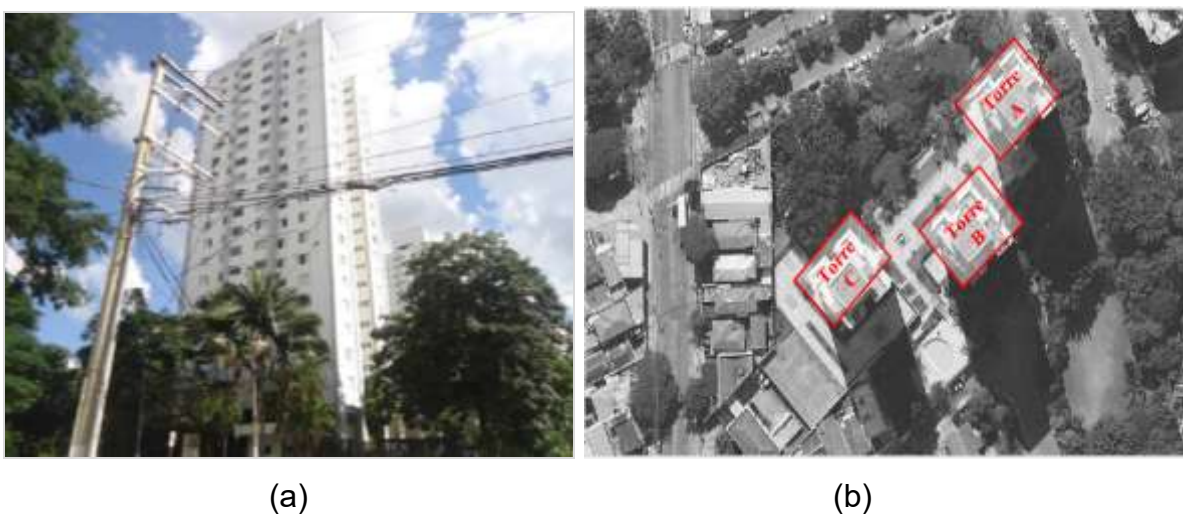
Segundo Beyene et al. (2013) a reação álcali-carbonato (RAC) acontece porque as rochas carbonáticas, calcários dolomíticos argilosos se expandem, a partir da agressão dos álcalis do cimento ao calcário dolomítico, criando compostos cristalizados, como brucita, carbonato alcalino e carbonato cálcico. Para avaliar o risco de ocorrência da RAA, torna-se necessário conhecer as condições de exposição da estrutura, isto é, se o ambiente é seco, se a estrutura é enterrada, submersa, exposta à umidade ou se está em contato direto com água ou ainda em contato com álcalis em condições de serviço. A RAA pode ocorrer em elementos de estruturas maciças, em ambientes secos, uma vez que o concreto pode possuir internamente umidade relativa suficiente para o desenvolvimento da reação (ABNT-NBR 15577-1, 2018).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Histórico da ocorrência de RAA na edificação

O objeto de estudo se refere as estruturas de fundação em um condomínio residencial, construído no ano de 1976, composto por 03 (três) torres de 20 (vinte) pavimentos cada, localizado na cidade de São Paulo/SP (Figura 1a). Os processos investigativos para avaliação da ocorrência de processos deletérios provenientes da reação álcali agregado, foram realizados através das inspeções em cinco blocos de fundação (Figura 1b), sendo dois nos blocos da torre A, dois nos blocos da torre B e um no bloco de fundação da torre C, onde pode-se constatar uma série considerável de configurações fissurações e trincas, com grandes aberturas, caracterizando a desagregação do bloco de fundação em face às expansões ocorridas.

Figura 1: (a) Vista geral das edificações, (b) localização das torres A, B e C do Condomínio.



Fonte: Autores, 2023.

REALIZAÇÃO DE ENSAIOS

Com objetivo de analisar e constatar as condições dos elementos estruturais das edificações, realizaram-se vistorias e inspeções *in loco*, além de ensaios tecnológicos em amostras de concreto. Para a confirmação do diagnóstico de RAA, realizou-se a extração de testemunhos de concreto, junto aos blocos de fundação,

seguido de uma análise microscópica. Foram realizados procedimentos de avaliação em conformidade com as normas técnicas ABNT -NBR 15577 (2018) partes 1 a 7, ABNT-NBR 16697 (2018). Para avaliação das características do concreto junto as estruturas, foram realizados ensaios não destrutivos de propagação de ondas (ABNT-NBR 8802, 2019). Com objetivo de melhor detalhar a microestrutura do concreto e, em especial, caracterizar a ocorrência da reação álcali-agregado através de seus produtos, foram realizadas análises através de microscópio estereoscópico e microanálises por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inspeção visual

Com objetivo de analisar e constatar as condições dos elementos estruturais da edificação, realizaram-se vistorias e inspeções *in loco*. Durante o processo investigativo das reações álcali-agregado, nas fundações da edificação, constatou-se a ocorrência de fissuras na região superior dos blocos de fundação, após escavação, se fez possível constatar aberturas nas regiões laterais das estruturas de concreto, conforme apresentado na figura (2).

Figura 2: Vista geral dos blocos de fundação com presença de fissuras.



Fonte: Autores, 2023.

As fissuras caudadas pela reação álcali-agregado podem assumir dois tipos principais de configuração: orientação alternada, tipo mapa, quando a restrição à expansão é nula ou baixa; e fissuração orientada na direção da maior restrição, quando existe estado de compressão no concreto. Durante as inspeções, observou-se que o quadro fissuratório variava para os blocos de fundações, mas em geral as fissuras tinham formato de “mapa”, ou “teia de aranha”, algumas com grandes aberturas, localizados principalmente na face superior dos blocos. De acordo com You (2022) fissuras do tipo mapa, pode estar relacionada aos materiais, processo de fabricação e as condições ambientais submetidas ao concreto. Salienta-se que os quadros fissuratório observados eram intensos na parte superior dos blocos de fundações, concentrando-se, exatamente, na região de baixa compressão, com fissuras de aberturas expressivas nos cantos mais extremos são indicativos da presença da RAA.

Verificações macroscópica das amostras

Através da extração de testemunhos junto aos blocos de fundações, foi possível avaliar as características macroscópicas do concreto, permitindo verificar que o adensamento possui qualidade normais. As amostras indicaram pequenas quantidade de vazios de exsudação indicando adensamento adequado, enquanto a distribuição regular dos agregados graúdos em meio à argamassa evidencia uma boa homogeneização da mistura. As amostras apresentaram um grande fraturamento central, com elevado índice de colmatação de materiais finos provenientes do solo, indicando a possível percolação de água. As características macroscópicas do concreto das amostras avaliadas foram através dos aspectos gerais e indícios da reação álcali-agregado, conforme as descrições abaixo:

Quanto aos aspectos Gerais: cor da argamassa (cinza), distribuição dos constituintes (normal), proporção dos constituintes (argamassado), aderência argamassa / agregado graúdo (normal), porosidade macroscópica (pouco poroso, com poros submilimétricos), compactidade (Compacto), adensamento (bem adensado sem vazios de exsudação), fraturamentos (observado no meio das amostras uma fratura contendo colmatação de solos finos). Em relação aos aspectos relativos à reação álcali-agregado: bordas de reação (presentes e frequentes), poros preenchidos (presentes com tufo de minerais aciculares), microfissuras (presente),

características estas típicas de álcali-agregado (Li (2019), Fiset et al., 2021). As figuras (3) abaixo demonstram as características das amostras retiradas junto aos blocos de fundações.

Figura 3: (a) extração do testemunho junto ao bloco de fundação, (b) registro de fissuração dos testemunhos, (c) cavidade resultante da extração do testemunho com fissuração em toda profundidade do elemento.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autores, 2023.

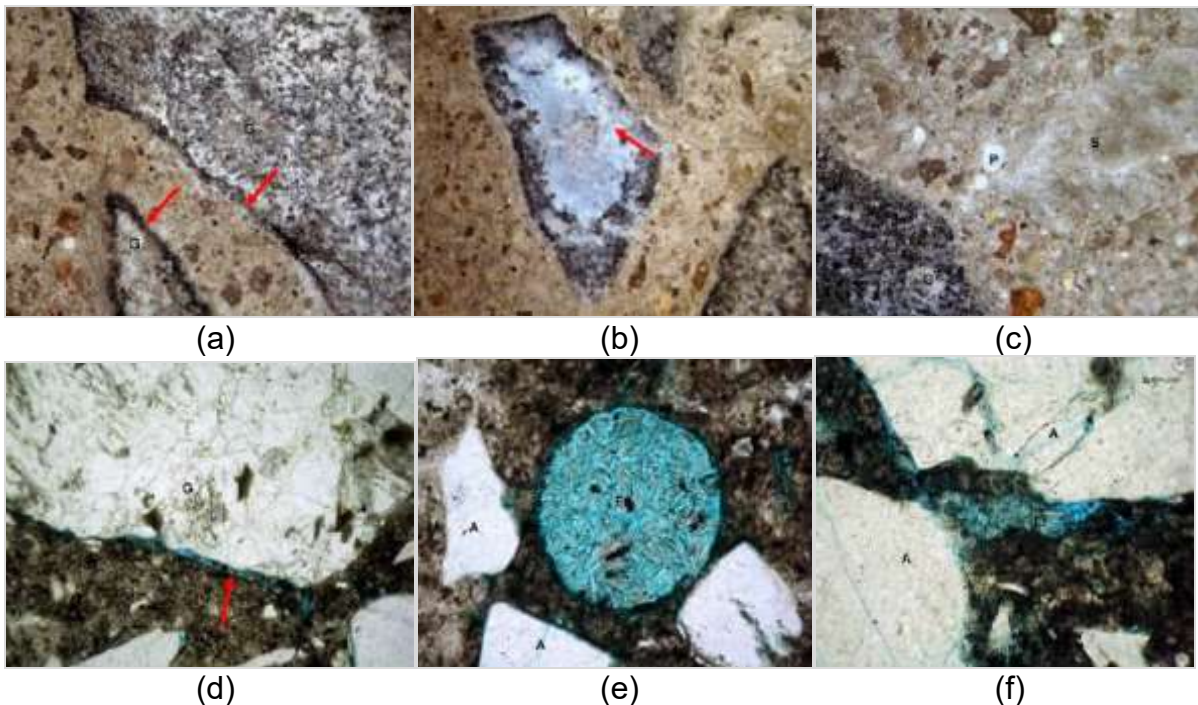
Análise por microscópio estereoscópico

Na análise realizada pelo microscópio estereoscópico, observaram-se frequentemente nos poros preenchidos das amostras, regiões densificadas na interface poro/argamassa, argamassa de coloração cinza clara. O agregado utilizado, tipo gnaiss constituído predominantemente por fragmentos angulosos eventualmente de formato lamelar. O agregado miúdo é composto por grãos quartzoso angulosos de areia natural. O concreto possui baixa porosidade e os poros são predominantemente milimétricos. Observa-se a presença de poros preenchidos por material esbranquiçado maciço ou por tufo de cristais aciculares (etringita). Com relação às evidências da reação álcali agregado observam-se, de modo frequente bordas de reação em torno dos agregados graúdos associada à deposição de material esbranquiçado nas superfícies de descolamento e quebra do concreto.

Os resultados são apresentados na figura (4) abaixo, onde: (a) aspecto do concreto no qual se observam bordas de reação (setas) entorno do agregado (G) e material esbranquiçado depositado sobre a superfície de quebra - Ampliação 15x. (b) Aspecto do concreto no qual se observam bordas de reação em torno do agregado e material esbranquiçado (seta) que recobre a superfície de quebra (gel

expansivo) - Ampliação 15x. (c) Poros na argamassa que compõe o concreto preenchidos por material branco de aspecto cerâmico – Ampliação 15x. (d) Detalhe do concreto no qual se observa o gel desenvolvendo-se no contorno dos agregados (seta) – agregado graúdo (G) - Ampliação 50x. (e) Detalhe de um poro (P) na borda dos agregados (A) preenchido por cristais aciculares de etringita gel típico da reação álcali agregado – Ampliação 100x. (f) Detalhe de uma fissura que se desenvolve na borda do agregado miúdo (A) preenchida por cristais de etringita – Ampliação 100x.

FIGURA 4: Análise realizada por microscópio estereoscópico.



Fonte: Autores, 2023.

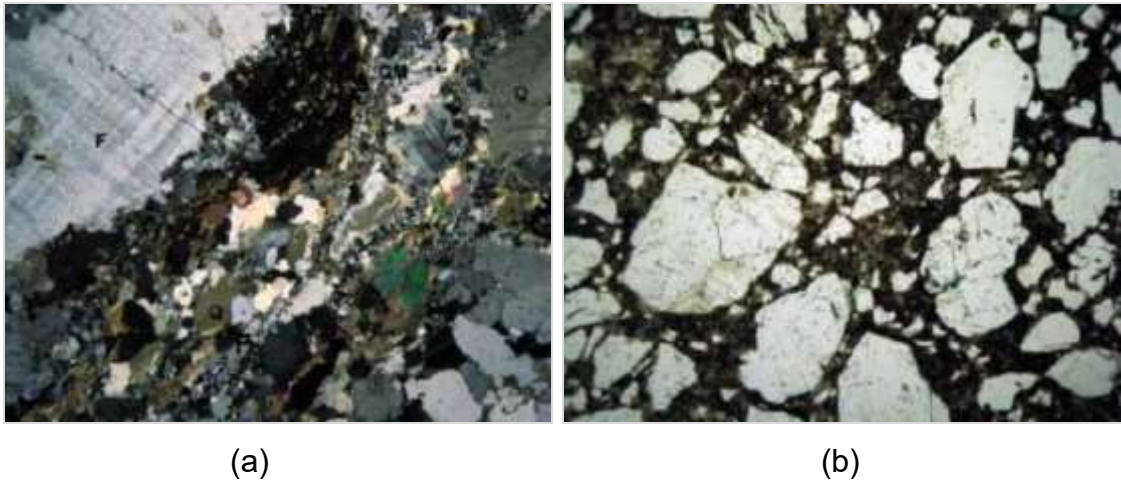
A descrição petrográfica, feita ao microscópio óptico de luz transmitida, do agregado graúdo junto as amostras de concreto demonstraram as seguintes características do agregado graúdo e miúdo. Agregado graúdo possui as seguintes características gerais macroscópicas: pedra britada de cor (cinza), forma (equidimensional a lamelar), grau de arredondamento (angulosos), dimensão com intervalo de variação (0,5 cm a 2,5 cm), dimensão Média (2 cm), caracterização físico-mecânica de Friabilidade (não friável), compactidade (compacto), tenacidade resistência à quebra (elevada).

Em relação ao agregado miúdo possui as seguintes características: Mineralogia Principal (Quartzo feldspato), Mineralogia Subordinada (Biotita, opacos, titanita, epidoto), Mineralogia Deletéria (Quartzo microgranular (10%) e quartzo com extinção ondulante (10%), Cor (Cinza), Estrutura (Foliada marcada pela orientação das micas), Textura (Milonítica), Granulação (Muita fina), Feldspatos mirmequitas e pertitas (Presentes <1%).

Do ponto de vista físico-mecânico, a alta tenacidade e a alteração incipiente de seus constituintes, permitem considerar os agregados utilizados nos concretos como de boa qualidade. Do ponto de vista mineralógico a deformação observada nos agregados graúdos favorece o desencadeamento de reações expansivas do tipo álcali-silicato. A presença de quartzo com extinção ondulante e de quartzo microangular são feições que conferem ao agregado o caráter reativo. De acordo com Prizkulnik (2005), quartzo é um mineral duro, muito comum, composto por sílica (SiO_2), risca o vidro e não é riscado por lâmina. Quando puro é incolor, com brilho vítreo e fratura conchoidal. Não apresenta clivagem visível (capacidade de romper em direções definidas ao longo de planos regulares). Quando presentes em rochas maciças, tais como granitos, normalmente não tem forma característica. É resistente ao intemperismo e é, portanto, um constituinte importante de muitos depósitos de areia e pedregulho e de vários arenitos. Por fim, o quartzo deformado ou intensamente fraturado (granulado) pode desenvolver reação deletéria com os álcalis no concreto (Prizkulnik, 2005). Com relação aos feldspatos, de acordo com o mesmo autor, são os mais abundantes formadores de rochas na crosta da terra. São constituintes importantes dos três grandes grupos de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Uma vez que todos os feldspatos apresentam boa clivagem em duas direções, as partículas de feldspato possuem, normalmente, várias superfícies lisas (Prizkulnik, 2005).

A figura (5) demonstra a fotomicrografia dos agregados encontrados nas amostras de concretos extraídas junto aos blocos de fundações, onde: a) Fotomicrografia do agregado no qual se observam cristais de quartzo deformado (Q) e massas de cristais microangulares (QM) – F = Feldspato. Microscópio de luz transmitida – Ampliação 25x. (b) Fotomicrografia do concreto mostrando os grãos de agregado miúdo angulosos. Microscópio de luz transmitida – Ampliação 25x.

Figura 5: Fotomicrografia dos agregados encontrados nas amostras de concretos extraídas junto aos blocos de fundações.



Fonte: Autores, 2023.

Segundo Diógenes e Sobrinho (2016), Grazia et al. (2021) do ponto de vista mineralógico, essas deformações observadas nos agregados grados favoreceram o desenvolvimento de reações expansivas do tipo álcali-silicato. Esse caráter reativo do agregado está fortemente associado à presença de quartzo microgranular e de quartzo fortemente deformado com extinção ondulante. A utilização de microscopia eletrônica de varredura revelou aspectos do gel típicos da citada reação álcali-agregado, a partir do qual se desenvolvem os produtos cristalizados, preferencialmente em meio aos grãos de quartzo ou feldspato que constituem o agregado, diagnósticos iguais aos encontrados na literatura por (DIÓGENES E SOBRINHO, 2016, GOMIDE, 2021; GRAZIA, 2022).

Determinação do teor de sulfatos

Os ensaios para determinação dos teores de sulfatos, permitiram identificar que as quantidades encontradas nas amostras coletadas a partir de perfurações junto aos blocos de fundações (figura 6), possibilitaram descartar a contaminação da estrutura por sulfatos provenientes das águas do lençol freático conforme Tabela (1).

Figura 6: Extração de pó de concreto para ensaio laboratorial de teor de sulfatos.

Fonte: Autores, 2023.

Tabela 1: Resultados obtidos referente ao ensaio de teor de sulfatos.

Localização	Amostra	Teor de Cimento (%)	Teor de Sulfatos (% smc*)
Blocos de fundação	01	22,60	2,26
	02	17,77	2,61
	03	16,44	1,66
	04	14,08	1,47

(*smc = sobre a massa de cimento).

Fonte: Autores, 2023.

Havendo a suspeita inicial, quanto a ocorrência de reações deletérias relacionadas a contaminação dos elementos estruturais por sulfatos, possivelmente oriunda de uma fonte externa, sendo que os edifícios são localizados na várzea de um rio e nos blocos de fundação há a presença de água em abundância proveniente do lençol freático, a realização do ensaio de determinação do teor de sulfatos. Através da extração de quartas amostras de pó de concreto para realização do ensaio de determinação do teor de sulfatos, adotou-se como referência a ABNT-NBR 16697 (2018), a qual especifica o limite de 4,5% de trióxido de enxofre (SO_3), em relação à massa de cimento (smc). Os teores médios de sulfatos encontrados na Tabela (1), indicam que não há excessiva concentração de sulfatos em nenhuma das amostras analisadas, sendo inexistente um perfil de penetração característico

de contaminação a partir do ambiente, sendo o sulfato existente oriundo dos constituintes do concreto (incorporado no amassamento).

Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado

Os resultados de expansão apresentados na Tabela (2), quando analisados em comparação aos valores de referência normativa ABNT-NBR 15577-4 (2018), bem como na literatura referente a manifestações patológicas por RAA (Frare, 2021), são relativamente baixos, entretanto reforçam que ainda há a ocorrência de reações deletérias de expansão nos elementos estruturais da edificação. Segue apresentado abaixo os resultados obtidos após a realização dos ensaios de determinação da expansão (Tabela 2).

Tabela 2: Valores médios obtidos referente ao ensaio de determinação de expansão das amostras dos blocos de fundação.

Variação dimensional média em solução alcalina (1 n naoh) (%)						
Amostra	Cura a 23° em H ₂ O			Cura a 80° em NAOH		
Idade de cura	Variação Massa (%)	Expansão (%)	Ocorrências	Variação Massa (%)	Expansão (%)	Ocorrências
7 ^a	0,09	0,05	Sem ocorrência	0,09	0,05	Sem ocorrência
14 ^a	0,12	0,07	Sem ocorrência	0,15	0,05	Apresentou fissura
28 ^a	0,21	0,09	Sem ocorrência	0,17	0,11	Apresentou fissura

Fonte: Autores, 2023.

A ocorrência de fissurações das amostras com apenas quatorze dias de imersão, demonstraram que os blocos de fundação continuam a apresentar a ocorrência de deformações por expansão, decorrente de reações deletérias da estrutura, como a RAA conforme demonstra a figura (7).

Figura 7: (a) Vista geral das amostras durante a realização do ensaio com temperatura de 23°C. (b) Vista geral das amostras durante a realização dos ensaios com temperatura de 80°C.

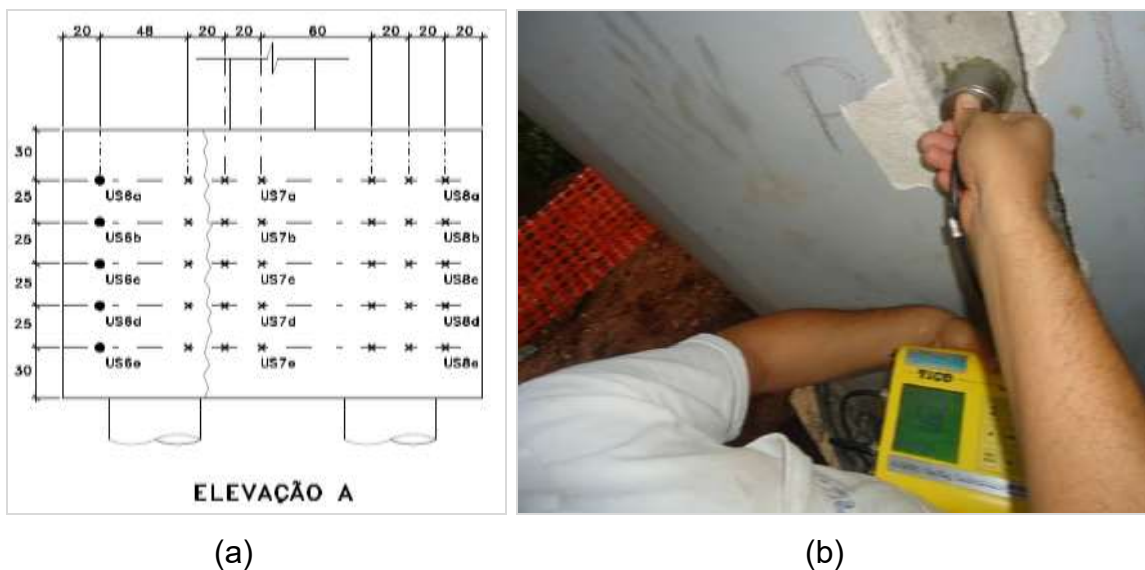


Fonte: Autores, 2023.

Velocidade de propagação de ondas de ultrassom

Junto aos elementos estruturais foram realizados ensaios de propagação de onda, para verificação da qualidade do concreto de acordo com a classificação da ABNT-NBR 8802 (2019). A figura (8) demonstra os pontos de aplicação dos ensaios junto as estruturas.

Figura 8: (a) Locação dos ensaios de ultrassom por transmissão direta. (b) Medida de velocidade de propagação de ultrassom por transmissão direta nas estruturas.



Fonte: Autores, 2023.

Durante a realização dos ensaios obteve-se os seguintes resultados de acordo com a Tabela (3), sendo a qualidade do concreto informada de acordo com a ABNT-NBR 8122 (2019).

Tabela 3: Velocidade de ultrassom e qualidade nas estruturas de fundação.

Localização	Velocidade (m.s-1)			Qualidade
	Min	Max.	Média	
Bloco A	4180	4290	4243	Ótimo
Bloco B	2.010	2.500	2.207	Regular
Bloco C	3.700	4.560	4.168	Ótimo

Fonte: Autores, 2023.

Os ensaios de determinação da velocidade de propagação de ultrassom, permitiram identificar que a redução de velocidade nas regiões superiores dos blocos decorre da microfissuração existentes nesta região. Os estudos realizados por Silva et al. (2022), através de ensaios de ultrassom realizados em estrutura de concretos, essas regiões são mais suscetíveis a fissuração, devido à menor taxa de armação.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

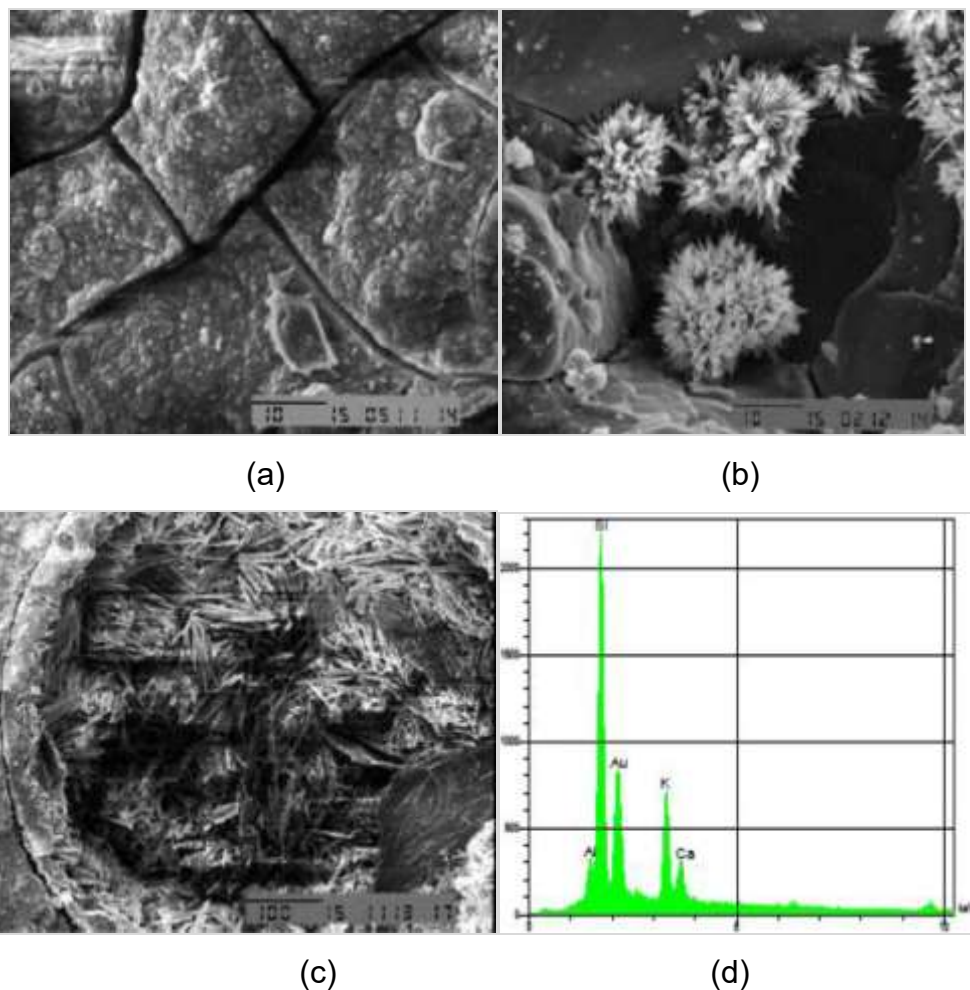
De um modo geral, as observações através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram que o concreto apresenta características microestruturais e texturas compatíveis com concretos de boa qualidade. De fato, observaram-se produtos típicos da hidratação do cimento Portland portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e CSH.

A análise dos locais preferenciais de disposição dos géis e cristais resultantes da reação álcali-agregado, isto é, as zonas de interface agregado-argamassa (superfície de descolamento do agregado graúdo) revelaram a presença de minerais característicos da reação álcali agregado. Os produtos cristalizados apresentam hábitos principalmente foliares e lancetados. Estão normalmente agrupados em “tufos” ou em grandes massas, que se desenvolvem preferencialmente em meio aos grãos de quartzo ou feldspato que constituem os agregados graúdos ou recobrem a argamassa. O gel típico da reação, a partir do qual normalmente se desenvolvem os produtos cristalizados, também está presente

em grande quantidade sendo observado em poros na argamassa ou no contorno dos agregados graúdos.

Na figura (9) observa-se com frequência a presença de tufo de cristais de etringita preenchem poros na argamassa ou vazios e fissuras, onde: (a) aspecto de detalhe do gel gretado resultantes da reação álcali agregado. Microscópio Eletrônico de Varredura – Ampliação 1500x. (b) aspecto de detalhe dos cristais foliares resultantes da reação álcali agregado desenvolvendo-se sobre o agregado graúdo. Microscópio Eletrônico de Varredura – Ampliação 1500x. (c) aspecto dos cristais aciculares de etringita preenchendo um poro na argamassa. Microscópio Eletrônico de Varredura – Ampliação 1500x. (d) gráfico de EDS no qual se observa a composição aproximada dos cristais hidratados. Observa-se o elevado conteúdo de potássio (K).

Figura 9: (a, b e c) Detalhe da frequência a presença de tufo de cristais de etringita preenchem poros na argamassa ou vazios e fissura, (d) Gráfico de EDS no qual se observa a composição aproximada dos cristais hidratados.



Fonte: Autores, 2023.

Os resultados encontrados nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura, complementam a bases de dados encontrados por outros pesquisadores como Fournier e Berubé (2000), Couto (2008) e Pires (2009), You (2022), ao qual pode-se observar a presença de produtos cristalizados, gel expansivo, no entorno dos agregados graúdos, confirmando a ocorrência de reações álcali agregado nos elementos analisados.

MÉTODO DE MITIGAÇÃO

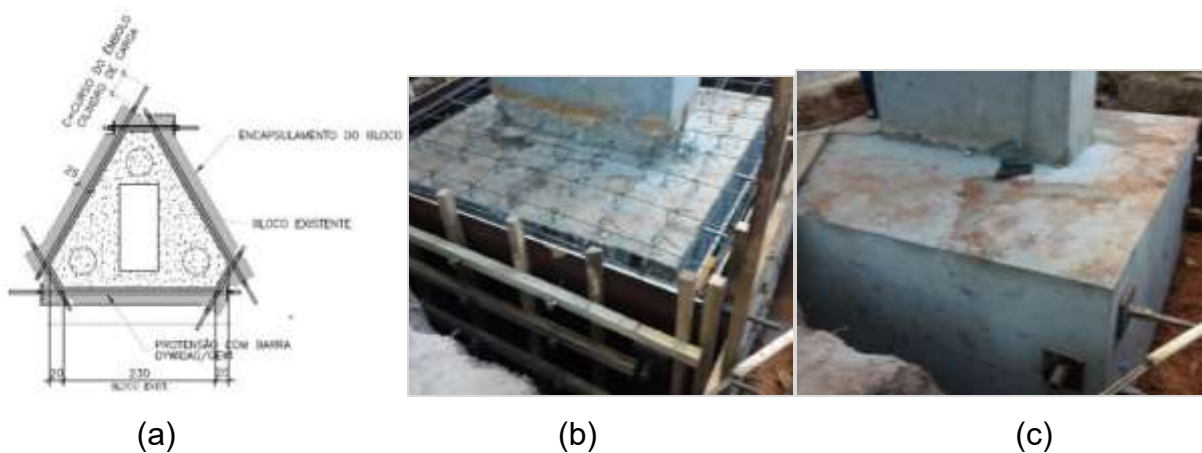
Conforme preconiza a ABNT-NBR 15575 (2018), o processo de mitigação da ocorrência da RAA, deve-se ser iniciado antes mesmo da execução dos elementos de concreto, tendo em vista que a norma se desenvolveu com objetivo de auxiliar nos processos de controle tecnológico dos materiais constituintes utilizados para confecção de um respectivo elemento estrutural em concreto.

O critério para indicação das ações de recuperação utilizado seguiu as diretrizes: os blocos de fundação que apresentam fissuras ou trincas que não sejam significativas, ou seja, em até 20% das constatadas, e tão somente junto às quinas e/ou arestas dos blocos, poderão ser reparados com injeção de resina epoxídica e impermeabilizados, e durante os próximos 10 (dez) anos monitorados.

Os blocos que apresentaram poucas fissuras ou trincas, porém situadas fora das suas arestas e que tenham seccionado os blocos deverão ser reforçados. Para recuperação e reforço dos elementos de fundação da edificação, foram realizados os seguintes serviços na estrutura: impermeabilização (visando a proteção da estrutura, contra a ação da umidade), tratamento das fissuras por meio de injeção de resinas (para proporcionar o monolitismo do elemento estrutural), por fim, aumento da seção dos blocos de fundações, através da técnica de encapsulamento do elemento estrutural, por meio de estrutura de concreto protendido (Figura 10). Para a realização do encapsulamento, foi utilizado concreto com resistência à compressão em $f_{ck} \geq 40$ MPa, módulo de elasticidade $E_c \geq 32$ GPa, com fator a/c máxima de 0,5. Essa especificação atende a classe de agressividade ambiental forte (CAA III) da norma ABNT-NBR 6118 (2014). Para a protensão foram utilizadas barras de aço do tipo DWYDAG, com tensão de escoamento de 950 N/mm²/MPa, tensão de ruptura de 1.050 N/mm²/MPa e carga de ruptura de 107 tf.

Conforme explanado por Silva (2007), partindo da hipótese de que os efeitos expansivos venham a exercer ações sobre essa área da base do bloco, a tensão de compressão exercida pela armadura complementar atuará restringindo a expansão, garantindo que o recebimento das cargas provenientes das bielas possa ser transferido para as estacas.

Figura 10: (a) especificação do encapsulamento do bloco, (b) vista geral das formas e armações de reforço posicionadas para concretagem. (c) vista do bloco após a secagem do material e retirada das fôrmas.



Fonte: Autores, 2023.

As fissuras e trincas existentes receberam injeção de resina epoxídica, com objetivo de restabelecer a integridade e monolitismo dos blocos de fundação, antes da execução dos reforços necessários e impermeabilização (Figura 11). O preenchimento das fissuras através de injeção de resina epóxi, promove o tratamento de fissuras, promovendo menores tensões de tração nas fissuras (RESHMA, ET AL. (2023). Os estudos realizados por Mourão (2010) apontam que as resinas epóxi, apresentam propriedades mecânicas superiores a qualquer resina, resistência à compressão de 80 à 100 MPa e resistências à tração entre 40 à 60 MPa.

Figura 11: Tratamento de injeção de resina nos blocos de fundação.

Fonte: Autores, 2023.

A ABNT-NBR 9575 (2010), classifica impermeabilização como sendo um conjunto de operações e técnicas construtivas (serviços), composto por uma ou mais camadas, que tem por finalidade proteger as construções contra a ação deletéria de fluidos, de vapores e da umidade. Conforme mencionado no presente trabalho em capítulos anteriores, a umidade é um dos principais requisitos para expansão de concretos afetados pela RAA, principalmente daqueles em contato constante com a água, como é o caso dos elementos de fundação das edificações estudadas. Desta forma, foram adotados alguns procedimentos para proteção das estruturas de concreto dos elementos de fundação da edificação, como por exemplo a impermeabilização dos elementos mencionados, com uso de impermeabilizante à base de asfaltos modificados, conforme apresentado na figura (12).

Figura 12: Bloco de fundação após impermeabilização.

Fonte: Autores, 2023.

CONCLUSÕES

Estruturas de concreto podem apresentar manifestações patológicas relacionadas aos materiais componentes e ao processo construtivo, o que reflete no desconhecimento às normas pelos profissionais que lidam com o assunto e a falta de cuidados na elaboração e aplicação do concreto. A presente pesquisa reuniu evidências de manifestações patológicas observadas nos blocos de fundação de um condomínio residencial, construído no ano de 1976 localizado na cidade de São Paulo/SP, e com base em referências normativas e na literatura em manifestações patológicas, os principais fatores que causam a ação deterioradora da reação álcali-agregado no concreto.

Durante o processo investigativo foram extraídas amostras junto as estruturas com realização de ensaios à fim de encontrar a real causa das patologias. O quadro fissuratório apresentou fissuras com formato de “mapa” ou “teia de aranha” na face superior de alguns dos blocos analisados, concentrando-se, exatamente, na região de baixa compressão, com fissuras de aberturas expressivas nos cantos mais extremos, o que é um indicativo da presença da RAA.

Como resultado desta pesquisa pode-se ter um panorama real dos procedimentos utilizados na recuperação de estruturas, como a injeção de resina e reforço do concreto armado e protendido, além do indicativo das normas, condições e fatores para o surgimento e desenvolvimento da reação álcali-agregados.

Alguns blocos de fundação não necessitaram de recuperação, mas os que foram realizados os procedimentos de recuperação precisam de acompanhamento efetivo e sistemático uma vez que a RAA poderá se manifestar novamente, sendo de extrema importância a aplicação de uma janela de inspeção que possibilite as verificações.

Como sugestões de futuros trabalhos, recomenda-se após ensaios laboratoriais constatando a patologia por RAA, a utilização de novas técnicas construtivas para mitigação do problema, além do controle e o acompanhamento técnico ao longo do tempo do elemento estrutural.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9575: **Impermeabilização – Seleção e Projeto**. Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1: **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-2: **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto**. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-3: **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto**. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-4: **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-5: **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-6: **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-7: **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: **Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica**. Rio de Janeiro. 2019.

BERUBÉ, M. A.; DORION, J.F. **Distribution of alkalis of concrete structures affected by alkali-silica reactivity and contribution by aggregates**. 11a ICARR-International conference of alkali-aggregate reaction. Quebec. 2000. p. 139-148.

BEYENE, M., SNYDER, A., LEE, R. J., BLASZKIEWICZ, M. **Alkali Silica Reaction (ASR) as a root cause of distress in a concrete made from Alkali Carbonate Reaction (ACR) potentially susceptible aggregates**. Cem. Concr. 51. 2013. p.85–95.

- CACHEPA, M. M. **Mitigação da reação álcali-agregado em concreto com o emprego de resíduo de cerâmica vermelha e metacaulim**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. 2017. 42p.
- COUTO, T.A. **Reação Álcali-agregado Estudo do Fenômeno em Rochas Silicosas**. Dissertação em Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2008.
- DIÓGENES, A. T. DE; SOBRINHO, C. W. A. P. **Blocos de Fundações de Edifícios Afetados por Reação Álcalis-Agregado (RAA): Estudo de Caso**. Vol. I. Escola Politécnica de Pernambuco. 2016.
- FISSET, M., SANCHEZ, LF, BILODEAU, S., MITCHELL, D., BASTIEN, J. **Influence of Alkali-Silica reaction (ASR) on aggregate interlock and shear-friction behavior of reinforced concrete members**. Engineering Structures, v. 233. 2021. p. 111890.
- SANCHEZ, L. F. M., DRIMALAS, T., MITCHELL, D., BASTIEN, J. **Comprehensive damage assessment in concrete affected by different internal swelling reaction (ISR) mechanisms**. Cement and Concrete Research, 107, 2018. p. 284-303.
- FOURNIER, B.; BERUBÉ, A. **Alkali-Aggregate reaction in Concrete: a review of basic concepts and engineering implications**. Paper, Ottawa. 2000.
- FRARE, A., LANGARO, EA, DE SOUZA, DJ, DE MEDEIROS. **Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil**. Revista ALCONPAT, v. 13, n. 1, 2023. p. 1-27.
- GRAZIA, M., GOSHAYESHI, N., GORGA, R., SANCHEZ, L., SOUZA, D. **Comprehensive semi-empirical approach to describe alkali aggregate reaction (AAR) induced expansion in the laboratory**. Journal of Building Engineering, 40, 2021.
- GOMIDE, T. L.F.; FLORA, S. M. D. **Ferramentas Diagnósticas. Livro Manual de Engenharia Diagnóstica – Desempenho, Manifestações Patológicas e Perícias na Construção Civil**. 2ª Edição. Editora LEUD – São Paulo. 2021. p.58.
- HASPARYK, N.P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005. 326 p.
- KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos**. Simpósio nacional de agregados, São Paulo. Anais. São Paulo: Escola Politécnica da USP. 1986. p. 127-138.
- LI, ZIHUI; THOMAS, ROBERT J.; PEETHAMPARAN, Sulapha. **Alkali-silica reactivity of alkali-activated concrete subjected to ASTM C 1293 and 1567 alkali-silica reactivity tests**. Cement and Concrete Research, v. 123, p. 105796, 2019.

MOURÃO, D.K. **injeção de resinas em estruturas de concreto armado**. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. 2010.

PIRES, K.O. **Investigação do potencial reativo álcali-agregado residual – um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Programa de pós-graduação em construção civil, Curitiba. 2009. 167 p.

PRISZKULNIK, S. **Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto Afetadas pelas Reações Cimento-Agregado**. Livro: Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) – São Paulo. 2021. p. 1017 – 1070.

RESHMA, T. V.; KUMAR, P. Chandan; KHALID, S. **Influence of self-healing behavior of bacteria & e-waste incorporated concrete on its mechanical properties**. Materials Today: Proceedings, 2023.

SANCHEZ, L. F. M., FOURNIER, B., MITCHELL, D., BASTIEN. **Condition assessment of an ASR-affected overpass after nearly 50 years in service**. Construction and Building Materials, v. 236, p. 117554, 2020.

SILVA, G. A. **Recuperação de Blocos de Coroamento Afetados pela Reação Álcali-Agregado**. Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. Recife/PE. 2007.

SILVA, R.R.C. GONCALVES, R., BERTOLDO, C. **Methodological Aspects for Quality Control and Ultrasound Inspection Tests on Retaining Walls**. MATERIALS EVALUATION, v. 80. 2022. p. 42-53.

SINNO, NOURA; SHEHATA, MEDHAT H. **Effect of sample geometry and aggregate type on expansion due to alkali-silica reaction**. Construction and Building Materials, v. 209, 2019. p. 738-747.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Estadual de Campinas. 2002. p.213.

WANG, WEI; NOGUCHI, TAKAFUMI. **Alkali-silica reaction (ASR) in the alkali-activated cement (AAC) system: A state-of-the-art review**. Construction and Building Materials, v. 252. 2020. p. 119105.

YOU, R., WANG, J., NING, N., WANG, M.,ZHANG, J. **The Typical Damage Form and Mechanism of a Railway Prestressed Concrete Sleeper**. Materials, v. 15, n. 22. 2022. p. 8074.