

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO



AMANDA GABRIELA DIAS MARANHÃO

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: Proposta para método de inspeção em edifícios prontos e diagnóstico rápido em elementos de fundação

Recife
2021

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO

Amanda Gabriela Dias Maranhão

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: Proposta para método de inspeção em edifícios prontos e diagnóstico rápido em elementos de fundação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação da Universidade Católica de Pernambuco, como requisito parcial para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva

Recife
2021

M311r

Maranhão, Amanda Gabriela Dias

Reação álcali- agregado : proposta para método de inspeção em edifícios prontos e diagnóstico rápido em elementos de fundação / Amanda Gabriela Dias Maranhã, 2021
84 f. : il.

Orientador: Angelo Just da Costa e Silva

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil, 2021.

1. Reação álcali-agregado. 2. Fundações (Engenharia)
3. Concreto. I. Título.

CDU 666.972.11

Luciana Vidal - CRB 4/1338

FOLHA DE APROVAÇÃO

AMANDA GABRIELA DIAS MARANHÃO

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: Proposta para método de inspeção em edifícios
prontos e diagnóstico rápido em elementos de fundação**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação da Universidade Católica de Pernambuco, como requisito parcial para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Data de Aprovação - 18/ 12 / 2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva (Orientador e Presidente da Banca)

Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP



Prof. Dr. Aluizio Caldas e Silva (Titular Externo)

Chesf e Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE



Prof^ª. Dr^ª. Eliana Cristina Barreto Monteiro (Titular Interno)

Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

**RECIFE
2021**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, família, amor e amigos.

AGRADECIMENTOS

Após anos de muito estudo, esforço, dedicação gostaria de agradecer a todos que proporcionaram a realização deste sonho. Sendo assim, expresso aqui os sinceros agradecimentos e gratidão a todos. Primeiramente, agradeço à Universidade Católica de Pernambuco por ter me proporcionado o ensino gratuito, sem isso eu não poderia ter realizado esse curso. Agradeço também a minha família, amigos e namorado por todo suporte nesses anos de estudo, compreensão na minha ausência em muitas ocasiões, estímulo para nunca desistir do mestrado, compreensão em todos os momentos. Agradeço especialmente ao Professor Doutor Angelo Just, por ter me acolhido em sua pesquisa, por ter acreditado e depositado sua confiança em mim ao longo de todos esses anos de trabalho que se iniciaram ainda na graduação, e agora, na pós graduação. Por todo ensinamento, pela amizade que criamos, pela pessoa e profissional que é, agradeço imensamente. Agradeço também à Professora Doutora Eliana Monteiro, uma profissional exemplar, amiga, que sempre esteve de braços abertos, onde muitas vezes deixou de lado seus momentos de descanso para me ajudar e me orientar.

Somewhere, something incredible is waiting to be known.

(Carl Sagan)

RESUMO

Sabe-se que as manifestações patológicas ocorrem devido a um conjunto de fatores. Entre eles pode-se citar, o ambiente ao qual a estrutura está exposta, os materiais utilizados para a confecção do concreto, projeto mal elaborado, assim como a má execução da estrutura e falta de manutenção periódica. Dentre as manifestações deletérias conhecidas em estruturas de concreto, ressalta-se a reação álcali agregado (RAA), a qual se dá basicamente por ocorrência de interações químicas entre os compostos mineralógicos do agregado reativo com hidróxidos alcalinos do cimento e o meio propício para reação ocorrer. Ou seja, principalmente em fundações das edificações. Sabe-se que o quadro patológico é irreversível, e tem como consequência produtos expansivos, que geram fissurações, movimentações e podem causar o comprometimento das estruturas de concreto. Apesar de estudada no Brasil desde 1960, em Pernambuco, com o colapso do Edifício Areia Branca (2004) movimentou os estudos em obras prediais nas regiões metropolitanas de Olinda, Recife e em outras regiões do país. Ainda assim, não se tem um método único de inspeção em edifícios prontos e diagnóstico rápido para elementos de fundação. Afim de diminuir os custos e prazos na identificação e monitoramento dessa patologia, a pesquisa atual propõe um protocolo para rápida identificação da RAA em elementos de fundação de edifícios de múltiplos pavimentos.

Palavras-chave: Reação álcali agregado, fundações, patologia.

ABSTRACT

The pathological manifestations occur due to a set of factors. Among them, we can mention the environment to which the structure is exposed, the materials used to make the concrete, poorly designed projects, as well as the poor execution of the structure and lack of periodic maintenance. Among the deleterious manifestations known in concrete structures, the alkali-aggregate reaction (AAR) stands out, which occurs due to the occurrence of chemical interactions between the mineralogical compounds of the reactive aggregate with alkali hydroxides of cement and the suitable medium for the reaction to occur. That is, mainly in building foundations. It is known that the pathological condition is irreversible, resulting in expansive products, which generate cracks, movements and can compromise concrete structures. Although studied in Brazil since 1960, in Pernambuco, with the collapse of the Areia Branca Building (2004), it moved the studies in building works in the metropolitan regions of Olinda, Recife and in other regions of the country. Still, there is no single method of inspection in finished buildings and quick diagnosis for foundation elements. To reduce costs and time in the identification and monitoring of this pathology, current research proposes a protocol for the rapid identification of AAR in foundation elements of multi-storey buildings.

Keywords: Aggregate alkali reaction, foundations, pathology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Indícios de RAA em amostras.....	20
Figura 2 - Paredes dos vertedouros em barragem nos Estados Unidos, detectado a ocorrência da RAA.....	21
Figura 3 - Bloco de fundação com padrão de fissuração típico de RAA.....	22
Figura 4 - Consequências da formação do xerogel.....	22
Figura 5 - Processo da reação álcali-agregado.....	23
Figura 6 - Fissuração em bloco de apoio do vão central da ponte Paulo Guerra.....	24
Figura 7 – Foto histórica de Stanton em estrutura comprometida pela RAA.....	25
Figura 8 - Ponte Elgester na Noruega, afetada pela RAA.....	26
Figura 9 - Número de barragens de concreto com evidências de ataque por RAA.....	27
Figura 10 - Fissuração em blocos de fundação de edifício na RMR afetada pela RAA.....	28
Figura 11 - a) Fissuras em bloco sobre duas estacas. b) Fissuras em bloco com 18 estacas.....	29
Figura 12 - Definições dos tipos de RAA.....	30
Figura 13 - Fatores condicionantes da RAA.....	31
Figura 14 - Representação esquemática do mecanismo da reação álcali-silica segundo Plum, Pouse e Idorn.....	32
Figura 15 - Esquema apresentado no modelo de Dent-Glaser e Kataoka: a) Neutralização b) Ruptura das pontes da estrutura.....	33
Figura 16 - Representação do ataque dos álcalis à sílica a) estrutura cristalizada b) estrutura amorfa.....	33
Figura 17 - Expansão das barras de argamassa em função da proporção de materiais reativos no agregado (p).....	35
Figura 18 - a) Análise macroscópica, b) Análise estereoscópica, c) Análise microscópica, d) Análise do MEV.....	38
Figura 19 - Aparelho Spectroline.....	40
Figura 20 - Método do acetato de uranila em amostra de concreto.....	40
Figura 21 - Método das Barras de Argamassa. Medição da expansão das barras...	42
Figura 22 - Moldes e sistema de leituras empregados no método CPT.....	43
Figura 23 - Fluxograma dos passos para interpretar e analisar problemas patológicos nas edificações.....	44
Figura 24 - Classificação das fissuras quanto à sua forma de manifestação (IBAPE).....	45

Figura 25 - Trincas em paredes com aberturas, causadas pela deformação dos componentes	46
Figura 26 - Trinca de cisalhamento	47
Figura 27 - Fissuras em pilar com maior recalque.....	47
Figura 28 - Lei de Sitter.....	48
Figura 29 - Gráfico de distribuição da incidência dos acidentes prediais por tipo de origem.....	49
Figura 30 - Esboço das etapas e da importância de um diagnóstico nas estruturas com manifestações patológicas.	54
Figura 31 - Lavagem das faces com a lavadora de alta pressão.....	58
Figura 32 - Limites para a abertura característica w_k das fissuras	59
Figura 33 - Fissuração do tipo mapa em bloco de fundação de edifício em construção	60
Figura 34 - Mapeamento das lesões	61
Figura 35 - Retirada de corpos-de-prova para análise laboratorial	64
Figura 36 - Detalhe da lesão na superfície do testemunho extraído de um bloco de fundação.	65
Figura 37 - Testemunho embalado em papel filme	66
Figura 38 – Lesões aparentemente superficiais no canto do bloco	67
Figura 39 - Análise interna: lesão se propaga até o aço.....	67
Figura 40 - : Inspeções visuais a olho nu no testemunho. a) Presença de bordas de reação no agregado, b) Presença de poros preenchidos na amostra.	68
Figura 41 - Características do agregado antes (a) e depois da reação (b)	70
Figura 42 - Poro (P) preenchido por tufo de material cristalizado e gel de aspecto cerâmico. Imagem obtida através de microscópio estereoscópico com ampliação 6x.	71
Figura 43 - Detalhe de um poro na borda do agregado graúdo preenchido por cristais de etringita (et). Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 100x.....	71
Figura 44 - Micrografia obtida através do microscópio óptico.....	72
Figura 45 - Gráfico obtido com o MEV, no qual se observa a composição aproximada dos cristais hidratados	73
Figura 46 - Aspecto de detalhamento do gel gretado resultantes da RAA.....	73
Figura 47 - Preparo das amostras.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Casos confirmados de estruturas afetadas no Brasil pela RAA mencionados em trabalhos publicados até o ano de 2000.	27
Tabela 2 - Classificação das fissuras (IBAPE)	45
Tabela 3 - Exemplo de uma análise macroscópica do concreto	59

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

RAA Reação álcali-agregado

RAS Reação álcali-sílica

RASS Reação álcali-silicato

RAC Reação álcali-carbonato

FCK Resistência Característica do Concreto à Compressão

Na₂O Óxido de sódio

K₂O Óxido de potássio

Na⁺ Íon de sódio

K⁺ Íon de potássio

RMR Região Metropolitana do Recife

OH⁻ Hidroxilas

SiOH Silanol

MEV Microscópio Eletrônico de Varredura

ASTM American Society for Testing and Materials

NaCl Cloreto de Sódio

SiO₂ Dióxido de silício

NaOH Hidróxido de sódio

CaO Óxido de cálcio

Si-OH Grupo silanol

CaMg (CO₃)₂ Calcáreo dolomítico

Mg(OH)₂ Brucita

CaCO₃ Carbonato de cálcio (calcita)

CO₂ Dióxido de carbono

SO₂ Dióxido de enxofre

H₂S Sulfeto de hidrogênio

Ca⁺ Íon cálcio

H₂O Água

HF Ácido fluorídrico

Na₂SO₄ Sulfato de sódio

Al₂O₃ Óxido de alumínio

CaO Óxido de Cálcio

SiO₂ Óxido de silício

Fe₂O₃ Óxido de ferro

MgO Óxido de magnésio

Na₂O Óxido de sódio

K₂O Óxido de potássio

SO₃ Anidrido sulfúrico

C-S-H Silicato de cálcio hidratado

C-H Hidróxido de cálcio ou Portlandita

“C” CaO

“S” SiO₂

“H” H₂O

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	16
1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivo específico	18
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	19
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO	20
2.1.1. Reação álcali-agregado – Fator histórico	24
2.1.2. Reação álcali-agregado no brasil	28
2.1.3 Conceitos da reação álcali-agregado	30
2.2 MÉTODOS DE ENSAIOS	35
2.2.1 Ensaio qualitativos	37
2.2.1.1 Ensaio análise petrográfica	37
2.2.1.2 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)	39
2.2.1.3 Método do acetato de uranila ou método Cornell	40
2.2.1.4 Método da mancha ou Método do Cobaltonitrito de Sódio	41
2.2.2 Ensaio quantitativos	41
2.2.2.1 Método acelerado das barras de argamassa	41
2.2.2.2 Método de prismas de concreto	42
2.2.2.3 Método acelerado de prismas de concreto	43
2.3 MÉTODO PARA INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO	43
2.3.1 Inspeção	50
2.3.1.1 Etapas da Inspeção Predial	50
2.3.1.2 Laudo da Inspeção Predial	52
2.3.2 Diagnóstico	53
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 MÉTODO DE INSPEÇÃO EM EDIFÍCIOS PRONTOS E DIAGNÓSTICO RÁPIDO EM ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO	55
3.1.1 PRIMEIRA ETAPA - Inspeção preliminar	56
3.1.2 SEGUNDA ETAPA – Planejamento dos ensaios	64

3.1.3	TERCEIRA ETAPA – Preparação dos testemunhos	64
3.1.4	QUARTA ETAPA – Ensaaios laboratoriais.....	68
3.1.4.1	Análises microestruturais	69
3.1.4.2	Microscopia Estereoscópica e Óptica.....	70
3.1.4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	72
3.1.4.4	Difratometria de Raios x (DRX)	74
3.1.5	QUINTA ETAPA – Diagnóstico	76
	CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
4.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
	REFERÊNCIAS	79

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Estudada no Brasil desde a década de 60, a RAA por muito tempo foi considerada como um problema restrito a barragens e pontes. A pesquisa pioneira de Thomas Stanton em 1940 despertou a preocupação sobre o assunto ao diagnosticar a RAA em diversas estruturas de concreto pelo mundo. Stanton foi o primeiro a concluir que o motivo do aparecimento de lesões e expansões em pontes e rodovias de concreto na Califórnia, foram provocados pela reação entre hidróxidos alcalinos liberados pelo cimento e pela sílica proveniente dos agregados, o qual denominou reação álcali-agregado (STANTON 1940), dando início a várias pesquisas sobre o tema (SANCHEZ, 2008). A partir de então, evidências de deteriorações semelhantes foram descobertas em diversos outros estados americanos, assim como em outras regiões pelo mundo (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Os primeiros estudos sobre RAA no Brasil foram feitos por Heraldo Gitahy na década de 60 na barragem de Jupirá (Mato Grosso do Sul), todavia não foram constatados RAA nos ensaios. A primeira real suspeita de RAA no Brasil foi divulgada apenas em 1985, tratando-se do caso da Usina Hidrelétrica Apolônio Sales em Moxotó (KIHARA E SCANDIUZZI 1993). Nos anos 2000, a RAA voltou a ser tema de preocupação depois dos diversos casos registrados em Recife, principalmente a partir do final de 2004, com o desabamento do Ed. Areia Branca. Embora a reação álcali-silicato não tenha sido a causa principal do desabamento, constatou-se a sua presença, despertou-se a necessidade da realização de inspeções nas edificações, incluindo as fundações. Após nove meses de trabalho, a comissão designada pelo Presidente do CREA-PE para elucidar o acidente envolvendo o edifício Areia Branca entrega ao Conselho, à Comunidade Técnica e à Sociedade, o Laudo Técnico contendo todos os estudos, análises e diagnóstico sobre as causas do desabamento do referido edifício, ocorrido no dia 14 de outubro de 2004 (Gusmão et al 2005).

Para que a RAA aconteça em estruturas de concreto são necessários os seguintes fatores: concentração de hidróxidos alcalinos suficientes na solução dos poros do concreto para reagir com o agregado, agregados reativos, e umidade suficiente. Na ausência de qualquer um desses três fatores, a reação não ocorrerá (LOPES, 2004).

Ademais, a RAA pode ser classificada, em função do tipo e mineralogia do agregado reativo envolvido, de três formas, como: reação álcali-sílica (RAS), reação álcali-silicato (RASS) ou reação álcali-carbonato (RAC), (HOBBS, 1988).

Apesar de ser um processo lento, o produto desta reação é um gel sílico-alcálico (O gel deixa de ser gelatinoso e torna-se sólido. A designação química mais adequada é dada pelo termo xerogel), normalmente visível nos poros do concreto e na interface pasta/agregado. Como consequência, são desenvolvidos produtos que, no contato contínuo com umidade, são suscetíveis a expandir, gerando um quadro de microfissuras desordenadas e deformações diferenciais nas fundações, podendo comprometer as estruturas de concreto (HASPARYK, 2005). Sendo assim, essa manifestação patológica permite também a entrada de outros agentes agressivos, como os íons cloreto e/ou sulfatos que, em concomitância, causam a perda de homogeneidade da estrutura, de resistência mecânica e de durabilidade.

Diversos autores citam a formação de etringita secundária em concretos afetados pela reação álcali-sílica. Como o caso do Hasparyk (2005), que observou em estudos do xerogel da RAA em testemunhos de concretos da UHE Furnas, formações de etringita secundária nos poros do concreto em microanálises. Poole (2003) cita a formação da etringita secundária em regiões fissuradas de concretos afetados pela RAA. Ainda supõe que o transporte dos íons sulfatos se dá pela água que hidrata o xerogel, proporcionando o desenvolvimento e crescimento dos cristais de etringita.

Mesmo em meio a tantos estudos desenvolvidos por engenheiros pesquisadores, ainda não existe um consenso para o problema da RAA, sendo um quadro patológico irreversível. Observa-se também que essa ausência de consenso definitivo sobre possíveis soluções, tende a retardar ou até inibir os avanços na aplicação de cuidados na prevenção ou recursos na recuperação de estruturas já afetadas pela patologia (NOGUEIRA, 2010).

Apesar disso, Ollivier e Vichot (2014) explicam que é muito raro que seja necessário demolir uma estrutura devido à reação álcali-agregado, o que se deve fazer é monitorar a patologia e tomar algumas medidas paliativas. Outrossim, é caracterizado pelo fato de que a maioria das soluções são altamente onerosas, temporárias ou na maioria das vezes ineficientes (SANCHEZ, 2008).

Além disso, devido à dificuldade da correlação entre os sintomas observados e o diagnóstico positivo para a ocorrência da RAA, normalmente demanda-se muito tempo, e assim, mais gastos. Vale ressaltar ainda, a dificuldade em fazer uma investigação com o edifício ocupado, pois gera muito transtorno aos usuários, além da dificuldade de acesso tanto no apartamento do proprietário, quanto na estrutura em si caso seja necessário investigar o seu interior, devido as reformas executadas e compostas por diversos revestimentos internos, e até mesmo, móveis planejados.

Além disso, até então, não existe uma solução rápida e eficaz para identificação dessa reação que seja consenso no meio técnico-científico. Evidenciando a necessidade de pesquisas e o desenvolvimento de métodos que possibilitem a rápida identificação da manifestação. Dessa maneira, a pesquisa visa viabilizar o processo de diagnóstico da RAA em fundações de edifícios prontos, através de um protocolo, tornando mais simples a identificação dessa patologia.

1.2 OBJETIVOS

1. 2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo viabilizar a rápida inspeção e diagnóstico em fundações de edifícios de múltiplos pavimentos em uso com suspeita de manifestação patológica por RAA, através de um protocolo prático e eficaz.

1.2.2 Objetivo específico

- Apresentar sugestões de ensaios indicados para o diagnóstico de RAA em fundações, técnica e economicamente viáveis
- Discutir critérios para amostragem dos elementos investigados a partir de parâmetros como área construída, tipo de fundação etc
- Classificar os danos encontrados ao longo da investigação
- Propor procedimentos para atividades futuras de inspeção em fundações

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em 4 (quatro) capítulos.

O primeira apresenta a introdução, a importância da pesquisa, os objetivos da dissertação, a justificativa para sua realização e os limites do estudo.

O Capítulo 2 compreende os aspectos conceituais importantes, com a apresenta da revisão bibliográfica envolvendo a descrição da reação álcali-agregado, os métodos de ensaio e a descrição de casos pelo mundo e os métodos para inspeção e diagnóstico da patologia.

A metodologia é apresentada no Capítulo 3. Este capítulo é onde consta todo o protocolo sugerido para a inspeção em fundações de edifícios prontos, afim de diagnosticar de maneira rápido a RAA. Onde toda a metodologia é descrita de acordo com as normas existentes, trabalhos passados utilizados para as análises.

O capítulo 4 apresenta as considerações finais, bem como recomendações para trabalhos futuros.

1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Para melhor interpretação, são apresentados algumas limitações do presente estudo, os quais podem ser objeto de estudos futuros, conforme detalhado no final da dissertação.

- O método proposto não foi validado;
- As técnicas propostas de ensaios são restritas a métodos possíveis de serem executados em laboratórios nacionais;
- Não está sendo contemplado qualquer tipo de análise estrutural decorrente dos danos causados pela RAA nas fundações;
- O estudo não se propõe a discutir as técnicas de recuperação necessários para os problemas encontrados

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO

A expressão RAA refere-se, resumidamente, a um mecanismo de degradação do concreto por meio da expansão gerada por reações químicas internas (ANDRIOLO, 2000). Essa expansão é causada pela formação de um gel (também chamado de gel de sílica/gel sílico-alcálico ou xerogel) que absorve água por osmose e se expande entre os poros do concreto, ocupando os espaços vazios e provocando a elevação da tensão interna (Figura 1). Esta expansão é lenta e irreversível, que pode resultar em um quadro de fissuração generalizado das estruturas de concreto, conseqüentemente comprometendo a durabilidade e vida útil das mesmas. Sendo assim, esta patologia acontece basicamente a partir da combinação simultânea de 3 elementos: agregado reativo, álcalis e umidade.

Figura 1 - Indícios de RAA em amostras.



Fonte: Pires Sobrinho (2012)

Hasparyk (2005) define bem esse conceito como sendo a RAA uma nomenclatura geral empregada para representar a reação química que ocorre no interior de estruturas de concretos, entre os hidróxidos alcalinos, originários especialmente do cimento, e determinados minerais reativos presentes nos agregados utilizados. Como consequência da reação, são desenvolvidos produtos que, no contato contínuo com

umidade, são suscetíveis a expandir, gerando fissurações e podendo causar o comprometimento das estruturas de concreto. A Figura 2, por exemplo, apresenta as paredes dos vertedouros de uma barragem nos Estados Unidos com a ocorrência de RAA.

Figura 2 - Paredes dos vertedouros em barragem nos Estados Unidos, detectado a ocorrência da RAA



Fonte: CITY OF GREENSBORO, (2014).

Pela sua vasta extensão territorial, o Brasil possui uma variedade muito grande de rochas, as quais são exploradas para uso na construção civil. Grande parte das rochas brasileiras têm um alto potencial reativo, devido às suas características mineralógicas, especialmente pela sua composição apresentar uma forte presença de sílica e silicatos.

A adoção de agregados não reativos é uma maneira eficiente para evitar a reação, uma vez que eliminando um dos fatores, a reação não ocorre. Se isso não for possível, o ideal é inserir materiais capazes de neutralizar a reatividade, como no caso de cimento Portland pozolânico ou de alto-forno (TIECHER, 2006).

Os álcalis originários do cimento, na presença de agregado reativo e umidade, podem promover a reação. De acordo com NEVES (2010), álcalis são os elementos que se localizam na primeira coluna da tabela periódica, apesar de somente o sódio e potássio serem considerados álcalis na química do cimento. Apenas os chamados álcalis ativos disponíveis no cimento participam do ataque à sílica ativa dos agregados, ou seja, aqueles que não ficam fixos na estrutura dos silicatos de cálcio hidratados ou dos próprios agregados.

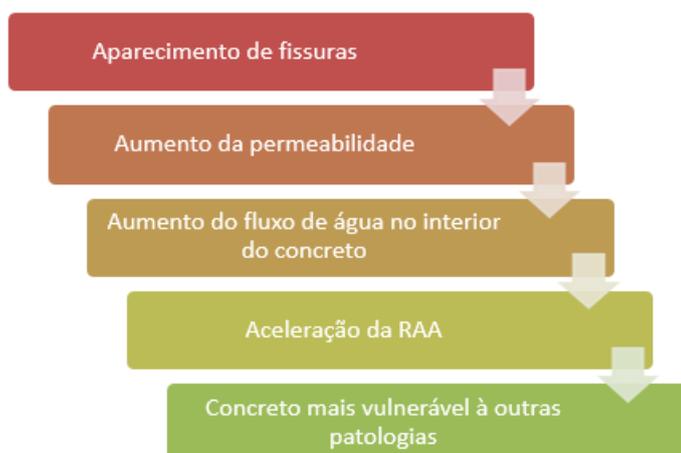
Via de regra, a umidade está presente em todas as obras, seja por fatores climáticos, como as chuvas, ou da constante presença de água, como no caso de reservatórios, barragens e hidrelétricas ou no caso das fundações em contato direto com o solo, como mostra na Figura 3. A água promove a difusão dos íons alcalinos bem como a hidratação e incorporação dos compostos formados. Sendo assim, como o fenômeno ocorre em condições de umidade, após iniciado o processo de fissuração, o concreto torna-se vulnerável, assim, outros agentes agressivos podem atuar secundariamente, como mostra o resumo da Figura 4.

Figura 3 - Bloco de fundação com padrão de fissuração típico de RAA



Fonte: Nogueira (2010).

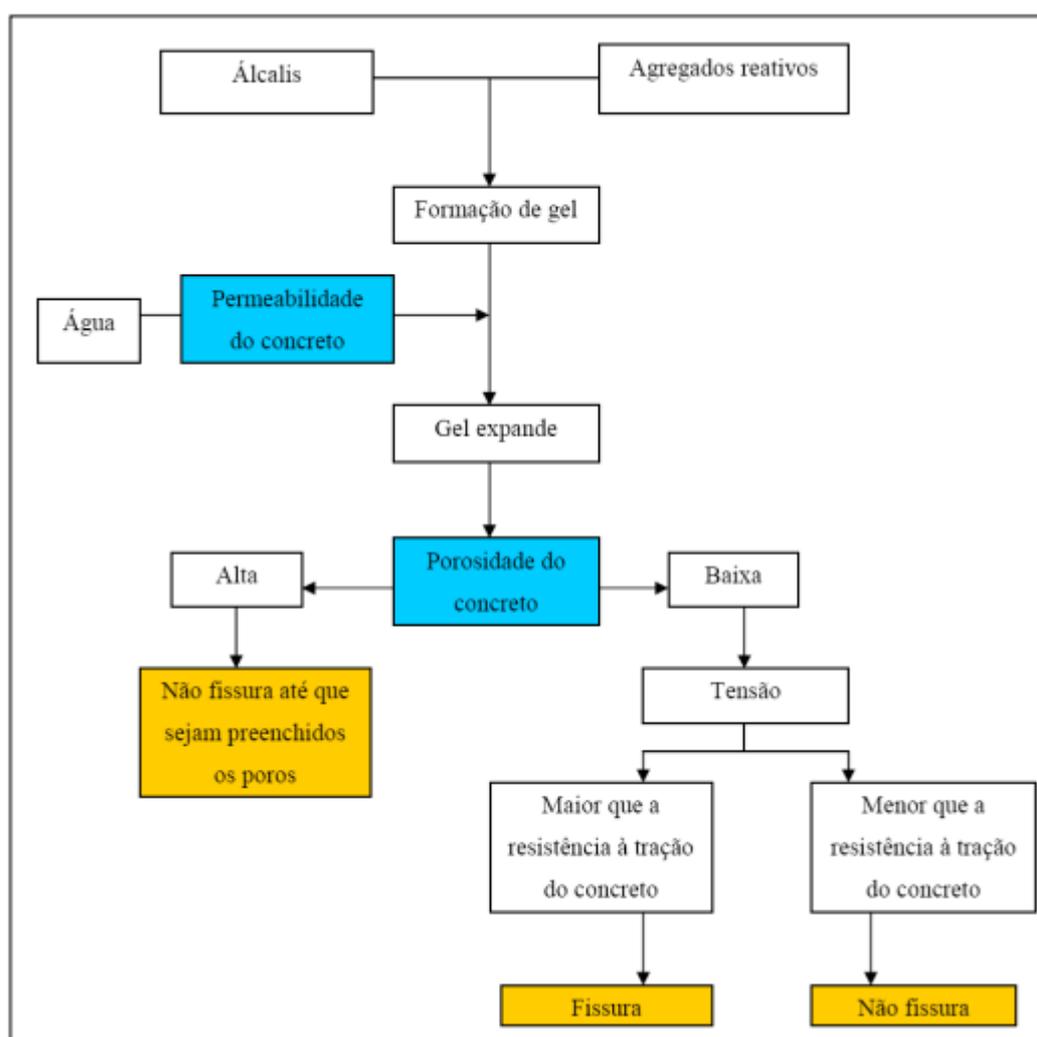
Figura 4 - Consequências da formação do xerogel



Fonte: Autora (2020).

A chance de ocorrência da RAA depende da interação entre os álcalis disponíveis e a potencialidade reativa dos agregados. Além disso, fatores externos como umidade e temperatura são determinantes no processo deletério. O tempo necessário para notar indícios da RAA depende também de vários outros fatores, como o tipo e proporção dos agregados, o teor de álcalis do cimento, a composição do gel, entre outros. Ademais, Valduga (2002), montou um diagrama mostrado na Figura 5, onde explica as etapas do processo da reação desde a formação do gel até a possível fissuração.

Figura 5 - Processo da reação álcali-agregado



Fonte: FERRAIS (2000) apud VALDUGA (2002).

Segundo Pires Sobrinho (2012), quadros de fissuras 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. No trabalho de Gomes (2008), sobre a ponte Paulo Guerra na RMR, o quadro fissuratório era variável de bloco a bloco, mas no geral, as fissuras possuíam o formato de 'mapa', ou 'teia de aranha', algumas com grandes aberturas. As fissuras ocorriam mais nos blocos, mas apareciam também nos cálices e placas pré-moldadas da ponte (Figura 6). Sendo esses formatos de fissuração característicos da RAA.

Figura 6 - Fissuração em bloco de apoio do vão central da ponte Paulo Guerra



Fonte: Gomes (2008)

No começo de 2002, a Prefeitura da Cidade do Recife resolveu proceder a uma ampla análise do estado da Ponte Paulo Guerra, em consequência do acentuado grau dos sintomas patológicos que colocavam em cheque à solidez estrutural (ANDRADE, 2016).

De maneira resumida, Tiecher (2006) explica que, os fatores que afetam a RAA podem ser classificados em: Agentes relacionados ao meio ambiente, umidade, temperatura, ciclos de molhagem e secagem; agentes químicos: sais, aditivos aceleradores de pega e superplastificantes; agentes relacionados ao concreto: teor de álcalis do cimento, fator a/c, dimensão e composição dos agregados; agentes que controlam a reação: adições pozolânicas, teor de ar incorporado, porosidade dos agregados, aditivos químicos inibidores de expansão.

2.1.1. Reação álcali-agregado – Fator histórico

A RAA foi descoberta no Estados Unidos, na Califórnia, na década de 30, causando preocupação ao meio técnico. O precursor dos primeiros estudos foi o engenheiro

americano Thomas Stanton em 1940 (Figura 7), que identificou a RAA como sendo uma reação deletéria que ocorria entre os constituintes do concreto, os álcalis do cimento e a sílica do agregado reativo. Segundo Valduga (2002), em 1940 após alguns experimentos, Stanton publicou um artigo concluindo que a reação formava eflorescências brancas, causadoras de expansões e fissurações, isso por causa de certos componentes dos agregados em combinação com os hidróxidos alcalinos liberados pelo cimento durante sua hidratação.

Figura 7 – Foto histórica de Stanton em estrutura comprometida pela RAA.



Fonte: Califórnia Departamento of Transportation *apud* MEHTA e MONTEIRO (2008)

Entretanto, Valduga (2002) relata que a primeira vez que se observou anomalias em estruturas e elementos estruturais de concreto semelhantes à posteriormente conhecida RAA foi, na verdade, em 1922, na Usina Hidrelétrica de Buck (Virginia, EUA), dez anos após a sua construção.

Entre 1940 e 1941, os Estados Unidos iniciaram pesquisas em centros científicos, universidades e empresas de cimento em função da constatação da RAA em várias barragens importantes e em obras de arte e rodovias, porém entre 1941 e 1960 o estudo da RAA perdeu forças. O assunto foi retomado de forma mais intensa na década de 70, quando vários países relataram a presença da anomalia em estruturas de concreto (Valduga, 2002). Como no caso da ponte Elgester na Noruega (Figura 8), construída em 1949-1951. As fissurações foram percebidas em 1985 (após 34 anos da construção) e RAA foi confirmada apenas em 1991.

Segundo MIZUMOTO (2009), na África do Sul ocorreram os primeiros registros da reação e o início dos estudos sobre o tema na década de 1970. Já a China identificou a deterioração de estruturas na década de 1990.

Figura 8 - Ponte Elgester na Noruega, afetada pela RAA



Fonte: Jensen, (2004)

Estudos feitos por Andriolo (2000) concluíram que pelo menos 19 barragens foram confirmadas como afetadas pela RAA no Brasil (Tabela 1). Posteriormente, Silveira (2006) descreve que no mundo foram diagnosticadas várias estruturas afetadas, dentre elas pode-se citar as barragens de Val de La Maré, no Reino Unido, a Sandouping, na China e de Kougá, na África do Sul.

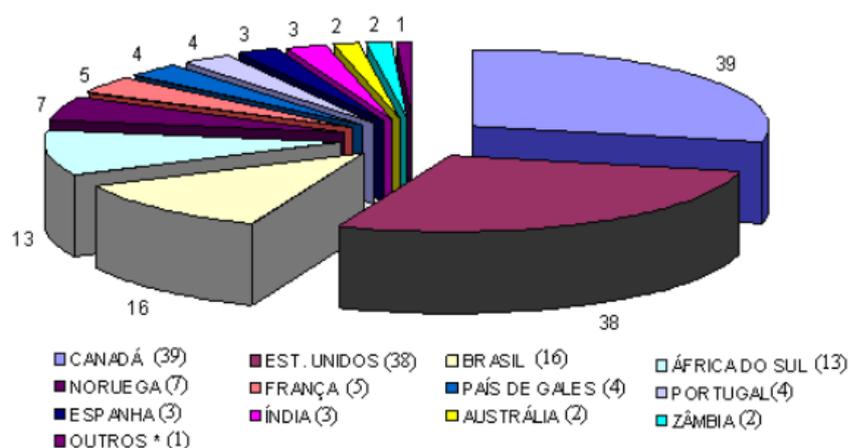
Tabela 1 - Casos confirmados de estruturas afetadas no Brasil pela RAA mencionados em trabalhos publicados até o ano de 2000.

Identificação da RAA	Nome da Estrutura	Tipo de estrutura	Agregado utilizado	Fim da Obra
1964	Peti	Barragem	Gnaisse	1945
1976	Furnas	Barragem	Quartzito	1963
1978	Paulo Afonso I	Barragem	Granito-gnaisse	1955
1978	Paulo Afonso II	Barragem	Granito-gnaisse	1962
1978	Paulo Afonso III	Barragem	Granito-gnaisse	1973
1980	Moxotó	Casa de Força	Granito-gnaisse	1974
1980	Traição	Usina Elevatória	Milonito	1940
1985	Paulo Afonso IV	Barragem	Granito-gnaisse	1979
1985	Porto Colômbia	Vertedouro e Casa de Força	Cascalho e Basalto	1973
1988	Joanes II	Barragem	Gnaisse	1971
1989	Túnel 6	Tomada d'água	Granito-gnaisse	1974
1990	Tapacurá	Barragem	-	1975
1991	Ilha dos Pombos	Barragem	Gnaisse	1924
1991	Pedro-Beicht	Barragem	Granito-gnaisse	1932
1992	Billings-Pedras	Barragem	Granito	1936
1996	Jaguara	Barragem	Quartzito e Granito	1971
-	Jurupará	Barragem	Gnaisse e Biotita granito	1937
-	Mascarenhas de Moraes	Barragem	Quartzito	1957
-	Sá Carvalho	Barragem	Gnaisse	1951

Fonte: Nogueira (2010)

Ainda segundo o mesmo autor, a Figura 9 mostra um gráfico resumido do número de barragens afetadas pela RAA em 1997, sendo um total de 147 em 23 países.

Figura 9 - Número de barragens de concreto com evidências de ataque por RAA.



Fonte: ANDRIOLO, (2000).

Valduga (2002), considera que as principais jazidas de agregados reativos do mundo estão localizadas nos Estados Unidos, leste do Canadá, Austrália, Nova Zelândia, África do Sul, Alemanha, Inglaterra e Islândia.

2.1.2. Reação álcali-agregado no Brasil

No Brasil, só foram desenvolvidos estudos em relação a RAA duas décadas após os primeiros estudos publicados nos Estados Unidos. Isso ocorreu através do pesquisador Heraldo Gitahy após o problema na barragem de Jupia, entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. Verificou-se, na composição dos agregados selecionados para os concretos da barragem, a existência de substâncias reativas com os álcalis do cimento, em conformidade com o que Stanton havia publicado em 1940 (LIMA, 2009).

Na Região Metropolitana do Recife (RMR), a primeira obra diagnosticada com a ação da RAA foi a Ponte Paulo Guerra, em 1999 que surpreendeu a engenharia local (ANDRADE, 2016). De acordo com Ávila (1999) a reação foi encontrada nos blocos de coroamento. Sabe-se também que a partir do desabamento do Edifício Areia Branca, em 2004, apesar da RAA não ter sido a causa principal do acidente, foi constatado a presença da reação nos blocos de fundação. Sendo assim, gerou-se uma preocupação no meio técnico-científico resultando em muitos estudos sobre a temática na região e os condomínios de dezenas de edifícios da RMR solicitaram vistorias nas fundações (Figura 10), desse modo, foram encontrados vários casos de RAA nos elementos de fundações. (Andrade, 2006)

Figura 10 - Fissuração em blocos de fundação de edifício na RMR afetada pela RAA.



Fonte: ANDRADE, (2006)

Ainda na RMR, Andrade (2006) constatou a ocorrência de RAA em elementos estruturais de fundações em cerca de oito edifícios urbanos, com idades que variavam entre três a vinte e um anos. Fato este que chamou a atenção do meio técnico. Ademais, dentre as características predominantes tem-se: lençol freático raso, presença de agregados reativos e álcalis disponíveis.

Gomes (2008), apresenta um caso parecido, em um edifício comercial investigado na RMR, apresentando um quadro fissuratório altíssimo. Construído na década de 1980, com 11 pavimentos, com o sistema construtivo em concreto armado e fundação em blocos de concreto armado sobre estacas tipo Franki (Figura 11).

Figura 11 - a) Fissuras em bloco sobre duas estacas. b) Fissuras em bloco com 18 estacas.



Fonte: Gomes (2008)

Após esses fatos ocorridos na RMR, iniciaram movimentos com profissionais e especialistas de diversas áreas para implantação de uma comissão de estudos e discussões para a elaboração de uma norma brasileira. Em 2005, engenheiros especialistas em Estruturas, Tecnologia de Concreto e Mecânica dos Solos se reuniram para padronizar a elaboração de laudos e vistorias técnicas em estruturas e fundações, originando o Manual da Associação Brasileira de Engenharia, Consultoria e Estrutura.

Ainda no ano de 2005, na 470 reunião anual do IBRACON foi possível enfatizar o assunto com a presença do engenheiro canadense Bernoit Fournier, compartilhando uma abordagem internacional sobre a RAA. Após isso, em 2008 ocorreu a criação da

primeira norma brasileira sobre os aspectos da reação álcali-agregado, nomeada como NBR 15577. A norma é dividida em sete partes e foi inspirada na norma canadense: – CSA A23.2-27A, *Practice to identify degree of alkali reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete*.

2.1.3 Conceitos da reação álcali-agregado

O termo reação álcali-agregado (RAA) é genérico, Segundo Mizumoto (2009), o processo químico de deterioração pela RAA no concreto pode ser classificado em função do tipo e da mineralogia do agregado reativo envolvido, mostrados na figura 12 abaixo.

Figura 12 - Definições dos tipos de RAA



Fonte: Autora, 2020.

Distinguem-se, de acordo com as fases contidas nos agregados e ao tempo de evolução da reação, a reação álcali-sílica (RAS), a reação álcali-silicato (RASS) e a reação álcali-carbonato (RAC). Segundo TIECHER (2006), essas classificações visam agrupar os minerais reativos pelo mecanismo de expansão provocado por eles, facilitando medidas de mitigação. Ainda, Amo e Pérez (2001) enfatizam que a reatividade depende de outros fatores aliados, tais como a textura e o tamanho dos grãos.

Atualmente, a RASS é considerada um caso particular de RAS (HASPARYK, 2011), mas são diferenciadas pela complexidade e velocidade com que ocorrem, por exemplo, a RAS é a mais comum entre as três, sendo também a que ocorre mais rapidamente (TIECHER, 2006). Valduga (2002) explica que, apesar da semelhança com a RAS, a

RASS é mais lenta, devido aos minerais reativos estarem mais disseminados na matriz. Entretanto, na RAC não ocorre a formação de gel expansivo, mas sim a chamada desdolomitização, que enfraquece a ligação entre pasta e agregado, provocando fissurações (ABNT NBR 15577-1, 2008).

Os álcalis presentes no cimento, representados pelo Na_2O e K_2O , podem se apresentar na forma solúvel ou insolúvel. Estes elementos alcalinos em solução resultam no acréscimo da alcalinidade nos poros do concreto (pH) elevando a concentração de hidroxilas (OH^-), que são responsáveis pela reação. Sendo assim, um dos fatores essenciais para o início e o desenvolvimento da reação é a umidade.

De acordo com Santos (2008), os álcalis oriundos do cimento se originam ainda no processo de calcinação do clínquer. Devido as altas temperaturas dos fornos, os íons Na^+ e K^+ presentes no clínquer são inicialmente vaporizados no processo, sendo posteriormente condensados ao longo de seu transporte e resultando na formação de uma camada superficial de álcalis. Alguns álcalis permanecem na superfície do clínquer, enquanto que outros se encontram internos na sua estrutura.

A Figura 13 ilustra os três fatores condicionantes da RAA. Por se tratar de um material heterogêneo e de uma reação complexa, elementos de concreto afetados pela RAA podem responder de maneira bem diferente um dos outros, no entanto na ausência de um destes fatores, a reação com caráter deletério não ocorrerá.

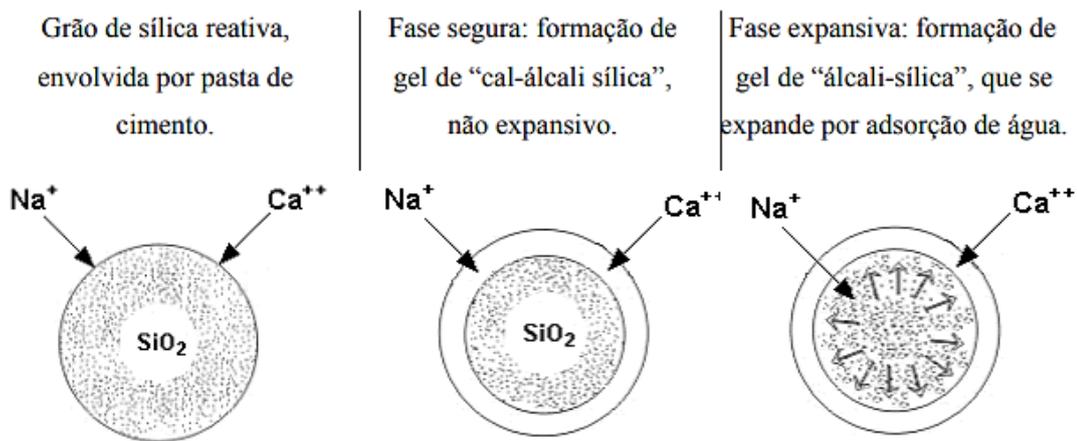
Figura 13 - Fatores condicionantes da RAA



Fonte: Couto (2008).

Farny e Kosmatka (1997) adotam didaticamente a RAS em dois processos: 1º processo: álcalis + sílica reativa = formação do gel. 2º processo: gel + umidade = expansão. Já GITAHY, (1982) formulou um mecanismo que pode ser esquematizado segundo a Figura 14 abaixo:

Figura 14 - Representação esquemática do mecanismo da reação álcali-silica segundo Plum, Pouse e Idorn.

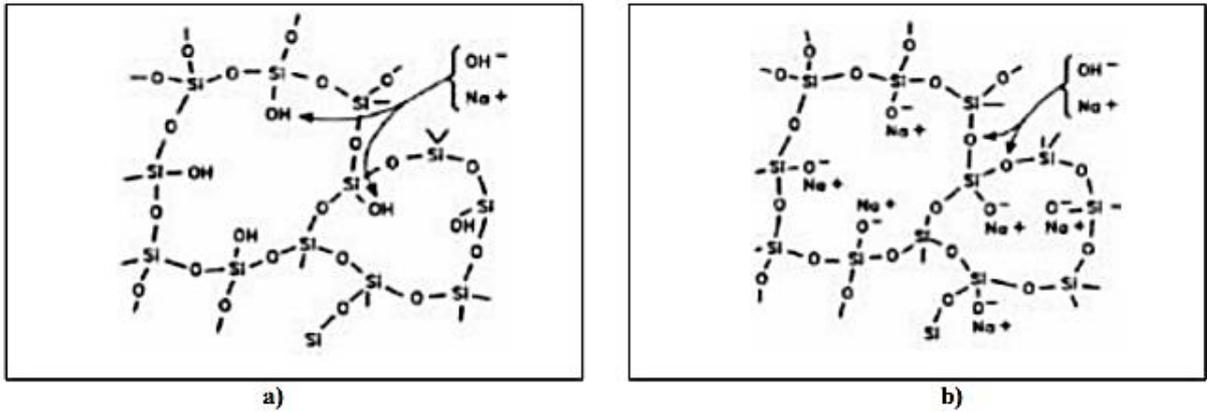


Fonte: GITAHY, (1982)

De acordo com Kihara (1993), a RASS se dá entre os álcalis disponíveis do cimento com os silicatos presentes em rochas sedimentares, metamórficas e ígneas, sendo a presença do quartzo tensionado ou minerais expansivos os principais elementos para ocasionar a reação.

A teoria de Dent Glasser e Kataoka (1981) é o início dos modelos sobre o ataque por RAA. De acordo com o modelo, a sílica em meio alcalino tem sua ligação quebrada por conta dos íons hidroxilas que penetram na estrutura (Figura 15). A presença dessas hidroxilas aumenta a tendência de absorção da água no interior do concreto. A sílica então se torna menos rígida expandindo com absorção da água. Esse processo continua até a formação do xerogel.

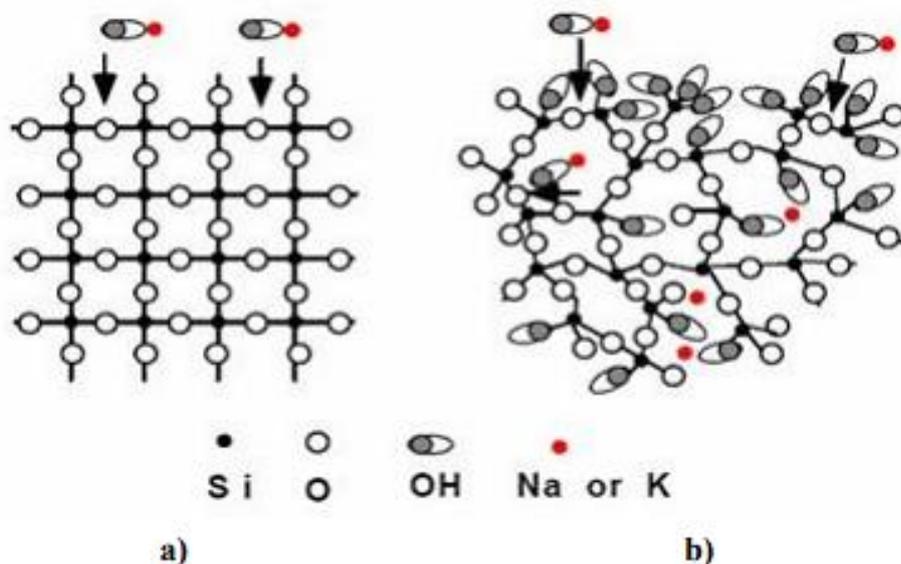
Figura 15 - Esquema apresentado no modelo de Dent-Glaser e Kataoka: a) Neutralização b) Ruptura das pontes da estrutura.



Fonte: Dent Glasser e Kataoka (1981)

A velocidade do ataque depende da quantidade de hidróxidos alcalinos na solução e da estrutura da sílica. Quanto mais cristalizada a sílica, mais lento e superficial é o ataque. No entanto, quando a estrutura é amorfa, mais rápido e generalizado é o ataque dos íons hidroxilas e alcalinos (Na^+ ou K^+) (Figura 16). Este processo leva à destruição da estrutura da sílica.

Figura 16 - Representação do ataque dos álcalis à sílica a) estrutura cristalizada b) estrutura amorfa



Fonte: Dent Glasser e Kataoka (1981)

Assim, Couto (2008) resume as reações químicas que formam o gel expansivo em 3 etapas:

Etapa 1: As hidroxilas (OH⁻) presentes no cimento reagem com a superfície da sílica presente no agregado, produzindo ligações do tipo silanol (SiOH) (Equação 1):



Etapa 2: As hidroxilas atacam então o grupo SiOH, em uma reação típica ácido-base (Equação 2). Em seguida, a equação é então balanceada pelos íons (Na⁺ e K⁺), formando um gel sílico-alcálico (Equações 3 e 4):



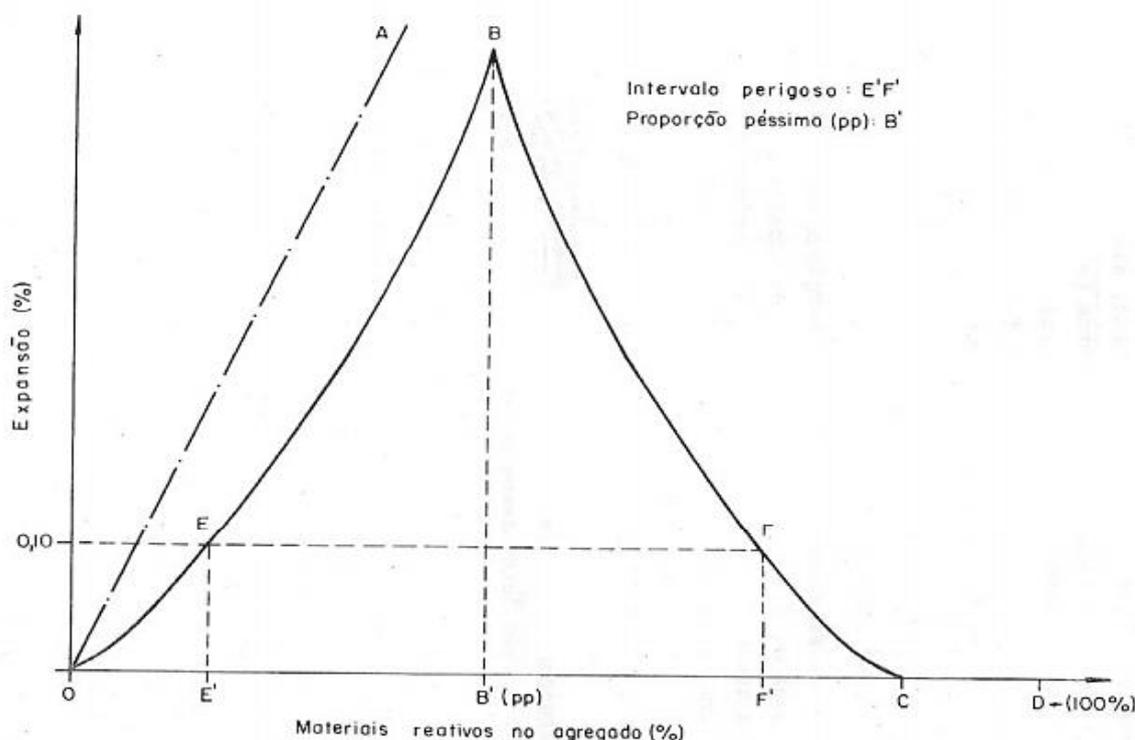
Etapa 3: Os íons de hidroxila excedentes atacam então as ligações internas da sílica, desintegrando-a e deixando-a em solução monômeros de silicatos, e propiciando a absorção de água e íons alcalinos, tendo como resultado a Equação 5:



Quanto maior for a carga elétrica superficial, mais pronunciada será esta manifestação. É provável que a expansão devido à RAA esteja ligada à força de atração entre os cátions alcalinos e a superfície dos minerais, (HASPARYK, 2005). Desta forma, o gel formado pode ter uma composição química variável de acordo com os tipos de agregado, proporção de materiais e posição do gel no interior do concreto. Vale salientar que a formação do gel, em si, não causa fissuração no concreto. Contudo, quando em contato com a água, este expande e provoca pressões hidráulicas, que se ultrapassarem a resistência à tração do concreto causam fissurações. (VALDUGA, 2002).

Gomes (2008) explica a importância do estudo da quantidade de grãos reativos entre os grãos do agregado através do gráfico da figura 17 onde, quando a quantidade de grãos reativos no agregado é pequena, o consumo de álcalis é reduzido e a reação é mais rápida para a fase expansiva. Como a argamassa tem comportamento plástico, os grãos reativos podem expandir-se muito, devido à fluência da pasta que os envolve.

Figura 17 - Expansão das barras de argamassa em função da proporção de materiais reativos no agregado (p)



Fonte: GITAHY (1982) apud Gomes (2008)

2.2 MÉTODOS DE ENSAIOS

Dentro do meio acadêmico, as metodologias até então desenvolvidas contemplam alguns mecanismos de ensaios em laboratórios e em campo para a identificação da RAA. No Brasil, tem-se a norma técnica ABNT NBR 15577 que trata sobre a reação álcali-agregado. Essa norma é dividida em 7 (sete) partes, são elas:

Parte 1: É o guia inicial para a realização da análise de risco da estrutura por ocorrência da RAA. Além disso, prescreve os requisitos para avaliação da reatividade potencial álcali-agregado, assim como analisar os resultados e informa as orientações para as medidas preventivas para o emprego de agregado reativo no concreto.

Parte 2: Engloba a parte de amostragem, preparação e a frequência dos ensaios das amostras de agregados para concreto.

Parte 3: Se refere a petrografia, que nada mais é que a descrição das rochas e a análise das suas características estruturais. Com base nisso, essa norma tem a função de classificar o agregado quanto à RAA em potencialmente inócuo ou potencialmente reativo.

Parte 4: Esta parte da norma estabelece o método de ensaio acelerado para determinar, por meio da variação de comprimento de barras de argamassa, a suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva álcali-sílica na presença dos íons hidroxila associados aos álcalis (sódio e potássio), fazendo-se uso de um cimento padrão (NBR 15577- 4, 2018).

Parte 5: Especifica o método de ensaio acelerado para determinar a suscetibilidade de cimentos Portland em combinação ou não com adições em mitigar a expansão de barras de argamassa elaboradas com agregados potencialmente reativos (NBR 15577- 5, 2018)..

Parte 6: É aparte do ensaio acelerado do ataque da RAA em si, por meio da variação de comprimento de prismas de concreto, por um período de 365 dias (1 ano).

Parte 7: Similar ao método de longa duração (Parte 6), no entanto o ensaio é realizado por 20 semanas. Vale salientar que não substitui o ensaio anterior, apesar disso, têm por objetivo antecipar o tempo de resposta com relação à determinação da reatividade potencial de um agregado.

Os ensaios para avaliação da RAA podem ser classificados em dois tipos: métodos que avaliam unicamente o agregado (Análise Petrográfica, método químico), e métodos que avaliam o conjunto cimento/agregado (método das barras, método dos prismas de concreto) (VALDUGA, 2002).

A norma brasileira realiza uma análise dos riscos da ocorrência da RAA, levando em consideração vários fatores, indicando uma possível ação preventiva. No entanto, para estruturas em situações onde já estão instaladas a manifestação patológica, a norma ainda não contempla reparos e/ou ações mitigadoras.

Além disso, como explica Gomes Neto e Barreto (2013) No ambiente científico há grande dificuldade em reproduzir com fidelidade os fenômenos que se repetem em

campo. Os ensaios normatizados em todo o mundo, apontam divergências de resultados quando comparados aos efeitos presenciados nas estruturas reais. Ensaios de curta duração trazem resultados divergentes dos ensaios de longa duração, mesmo quando utilizam os mesmos materiais

Na prática, de um modo geral, pode-se verificar a presença da reação numa estrutura afetada, de maneira imediata por meio de métodos qualitativos, constituídos por reagentes químicos que formam colorações características nas regiões afetadas no concreto. Também é possível por meio de avaliação em laboratório, onde é feita a extração de amostras cilíndricas da região possivelmente afetada pela RAA, e analisada por meio da petrografia e da microscopia convencional.

2.2.1 Ensaio qualitativos

Os ensaios laboratoriais comumente realizados são Ensaio análise petrográfica, Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV), Método do acetato de uranila e Método da mancha.

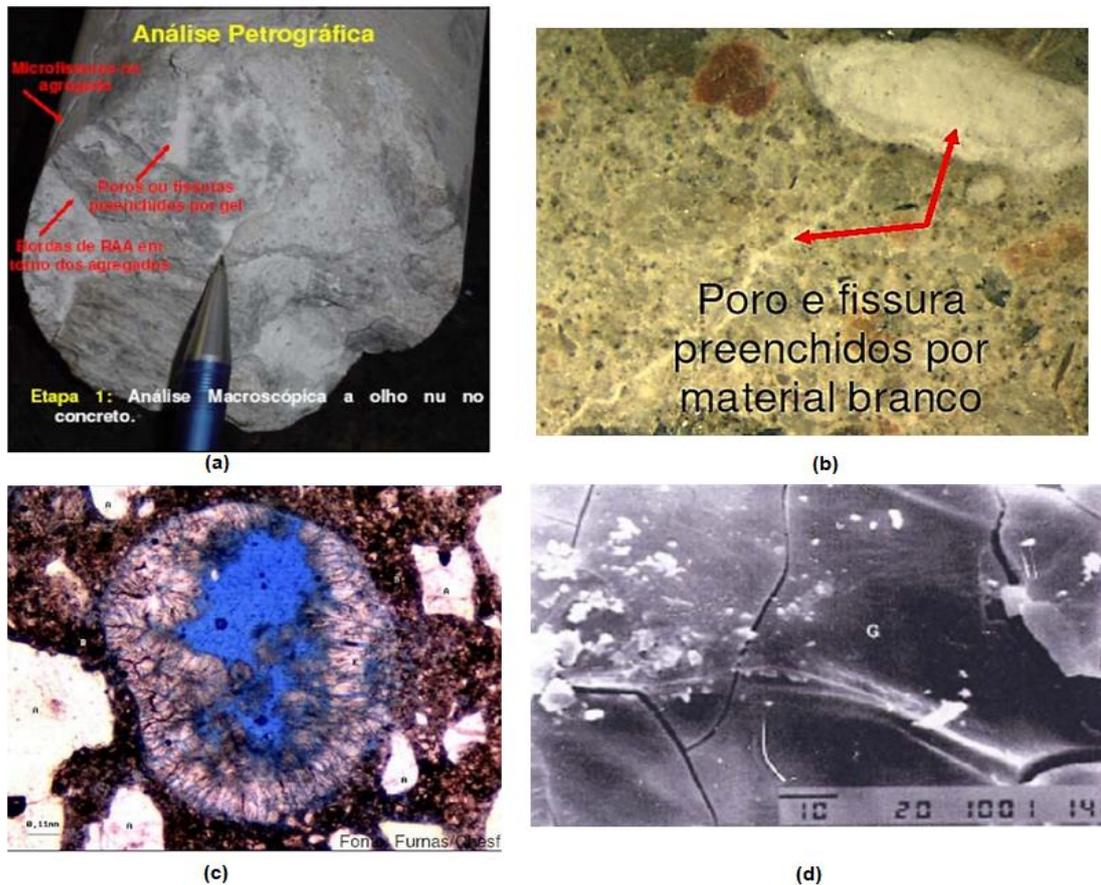
2.2.1.1 Ensaio análise petrográfica

Considerada como a primeira etapa da caracterização de expansão do agregado no concreto, esse método permite análises em grandes ampliações. Assim, permite a identificação precisa da morfologia e informações qualitativas sobre os minerais e os agregados reativos das amostras de concreto possivelmente afetadas pela RAA, devida à concentração dos produtos e classificação dos vários tipos de géis formados.

As técnicas utilizadas nesse método para a investigação do agregado, são (Figura 18):

1. Observações através de análise macroscópica (visual) e microscopia estereoscópica (luz refletida, aumento de 16 vezes), microscopia óptica (luz transmitida, aumento de 200 a 400 vezes) e microscopia eletrônico de varredura (MEV, aumento de 1500 a 2000 vezes) (HASPARYK, 2011);
2. Técnicas analíticas, utilizadas para caracterizar a textura e forma cristalina das partículas dos agregados tais como difração de raios-x e espectroscopia de infravermelho.

Figura 18 - a) Análise macroscópica, b) Análise estereoscópica, c) Análise microscópica, d) Análise do MEV



Fonte: Silva (2007)

As metodologias são normalmente baseados nas normas ASTM C856 (2004), ASTM C295 (2003) e NBR7389 (1992). De acordo com a NBR 15577-1 (2018), a Análise Petrográfica sozinha não é suficiente para avaliar a expansão potencial deletéria devido à RAA.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite analisar o gel produto da reação, através das bordas nas interfaces da pasta/agregado em amostras polidas, dos poros das amostras, bem como dispersos na argamassa e depositados nas fissuras dos agregados. Com as amostras polidas é possível observar imagens com controle de tonalidades e obtenção da composição química (HASPARYK, 2005).

2.2.1.2 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

Diferente dos demais, este ensaio deve ser usado também após a manifestação patológica, não sendo apenas de caráter preventivo. Utilizado como uma ferramenta de apoio ao estudo da RAA, o MEV não é um método propriamente dito para avaliar exclusivamente a reação. É uma análise que permite a identificação de compostos químicos e morfologia de amostras, através de imagens de alta resolução, o que possibilitam a identificação mais precisa dos produtos da RAA (HASPARYK, 2005).

A técnica tem sido uma grande aliada para analisar a microestrutura de pastas, argamassas ou concretos, sendo o primeiro trabalho publicado no Brasil utilizando o MEV para estudos da RAA em 1988, quando Kihara e Zampieri confirmaram a presença desta reação na Barragem de Abastecimento de Joanes II (VEIGA et al 1997). Essa técnica permite analisar, mais detalhadamente, as características microestruturais de um sólido, pois é um dos equipamentos mais utilizados nas análises de caracterização de materiais devido à sua alta profundidade de foco e à sua capacidade normal de ampliação ser de 10 mil a 900 mil vezes.

Segundo Maliska (2004), essa técnica tem duas abordagens que podem ser complementares:

- I. A análise da morfologia das superfícies, fornecida pelo contraste da emissão de elétrons secundários que são arrancados de um filme condutor (filme do carbono), com emissão de fótons cuja incidência no detector fornece os detalhes morfológicos tais como a identificação de agulhas, placas e detalhes da superfície estudada, tais como rugosidade e a existência de ranhuras etc;
- II. A análise química pelo contraste gerado pelos fótons produzidos em camadas mais profundas do material, cujo contraste é gerado de maneira que a tonalidade escurece quanto menor for o número atômico médio das amostras. No caso do concreto, as tonalidades são um indicativo da ocorrência de fases da hidratação. No caso da durabilidade, pode-se observar a ocorrência de camadas em torno de grãos e fissuras, indicativos de precipitação e expansão para alguns mecanismos como, por exemplo, a RAA cuja ocorrência é típica nessas áreas descritas

2.2.1.3 Método do acetato de uranila ou método Cornell

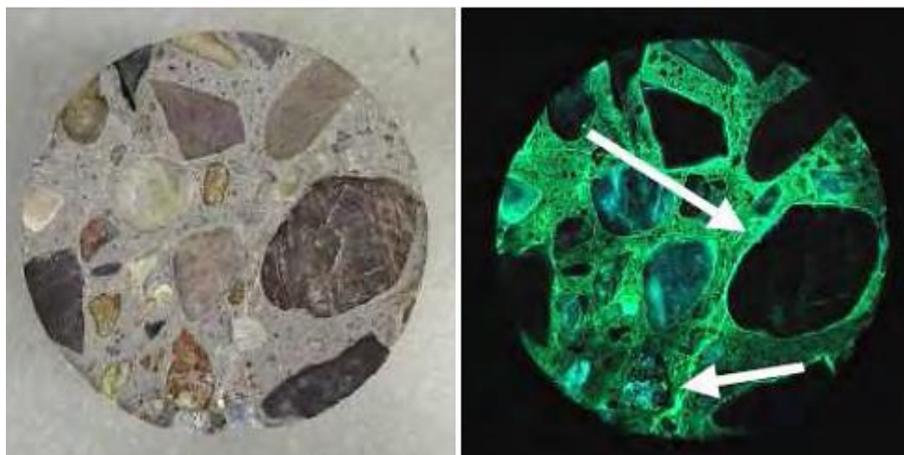
Criado por Natesaiyer e Hover (1988) e normalizado pela ASTM C-856, permite um diagnóstico imediato da reação em amostras de estruturas possivelmente afetadas. O método é capaz de identificar o xerogel através do íon uranila, que por meio do aparelho Spectroline (Figura 19), com a utilização de raios ultravioletas (UV), a amostra identifica as regiões afetadas por uma coloração amarelo-esverdeado, como mostra na figura 20.

Figura 19 - Aparelho Spectroline.



Fonte: Silva (2007)

Figura 20 - Método do acetato de uranila em amostra de concreto.



Fonte: Powers (1999).

Vale salientar que a mudança de coloração ocorre por troca iônica, mas Powers (1999) cita as dificuldades na interpretação visual das amostras com acetato de uranila, pois a coloração característica da RAS também pode ser observada em regiões carbonatadas e em depósitos secundários de etringita.

2.2.1.4 Método da mancha ou Método do Cobaltonitrito de Sódio

Um dos testes qualitativos empregados é o teste da mancha (desenvolvido no laboratório Los Álamos) ou teste colorimétrico ou contraste de imagens. Inicialmente é aplicada uma solução de cobalto-nitrito de sódio, desse modo, é possível visualizar a olho nu manchas amarelas na amostra. Logo após, aplica-se uma solução de rodamina, que são manchas rosas. O uso desses reagentes químicos confirmam a existência da reação através do surgimento dessas colorações características nos locais afetados no concreto.

2.2.2 Ensaio quantitativos

Esses métodos são comumente utilizados previamente à suspeita de patologia, ou seja, na parte preventiva da edificação. São eles Método acelerado das barras de argamassa, Método de prismas de concreto e 2.2.2.3 Método acelerado de prismas de concreto.

2.2.2.1 Método acelerado das barras de argamassa

Este ensaio expansivo foi inicialmente desenvolvido por Oberholster e Davies (1986), ficou conhecido como método Sul Africano ou método NBRI. Em seguida, foi normatizado pela ASTM C 1260/07 (Americana), CSA A23.2-25A de 1994 (Canadense), e a NBR 15577-4/18 (Brasileira). Este método investiga a RAA por meio de um método acelerado que afere, em determinados períodos de tempo, a variação no comprimento de barras de argamassa (25x25x285mm). O que difere do método das barras (ASTM C 227/03), é que esse método apresenta resultados com apenas 16 dias, contudo, normalmente prolonga-se o ensaio até os 30 dias. Atualmente, é o método mais utilizado no Brasil e no mundo (SANCHEZ, 2008).

No método proposto pela ASTM C-1260, é estabelecido que o agregado é considerado reativo para expansões superiores a 0,20% aos 16 dias em solução alcalina. No entanto, é sugerido acompanhar as leituras (Figura 21) até os 30 dias

para uma decisão final sobre a utilização do agregado, assim como Hasparyk (1999) explica que alguns agregados apresentam comportamento expansivo lento em função da sua mineralogia específica. Para a norma brasileira, a leitura já é feita aos 30 dias. Porém, para a norma NBR 15577-5, utilizando alguns cimentos específicos e/ou adições incorporadas os limites e idades podem alterar.

Figura 21 - Método das Barras de Argamassa. Medição da expansão das barras

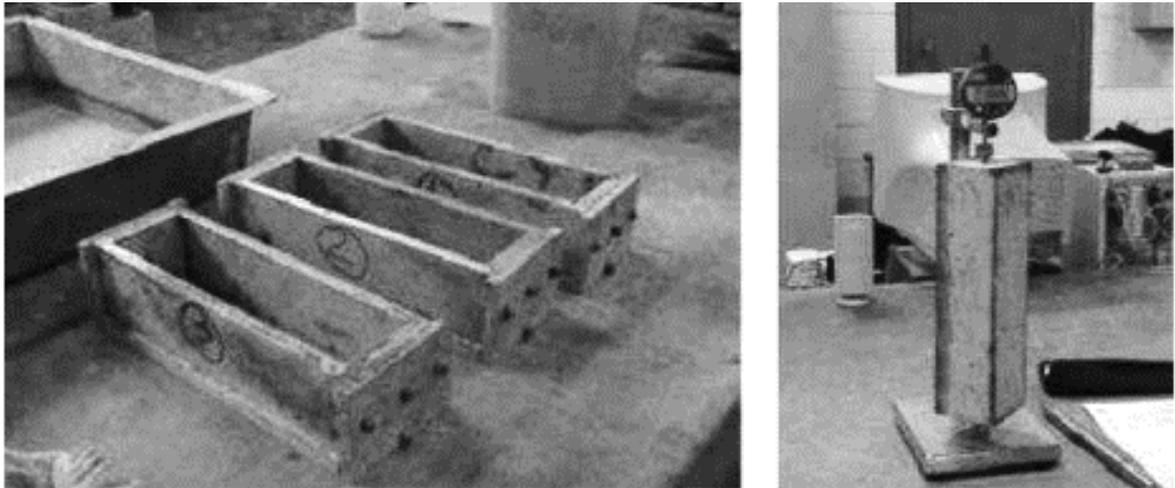


Fonte: SILVA (2007)

2.2.2.2 Método de prismas de concreto

É o método com maior confiabilidade atualmente, pelo fato de não existirem registros de divergências entre o comportamento apresentado por um agregado em laboratório e o comportamento em campo (SANCHEZ, 2008). Normatizado pela ASTM C1293 (2008) e pela ABNT NBR 15577-6 (2008) (DAHER, 2009), ambas caracterizam como inócua a reação que apresentar expansão inferior a 0,04% após 12 meses, e como potencialmente reativa a que ultrapassar esse valor. Figura 22 mostra os moldes do sistema de leitura.

Figura 22 - Moldes e sistema de leituras empregados no método CPT



Fonte: Sanchez (2008)

2.2.2.3 Método acelerado de prismas de concreto

Com o intuito de diminuir o tempo de ensaio do método anterior, no início dos anos 90, Ranc e Debray sugeriram alterar a temperatura do ensaio de 38°C para 60°C, reduzindo assim o tempo total do ensaio para 90 dias. Após alguns estudos em estudo realizados no Canadá, entre cinco laboratórios, comparando ambas as metodologias, FOURNIER et al. (2004) concluíram que na maior parte dos casos (em torno de 90%) a variação acelerada do método, com um limite de expansão de 0,04% aos 90 dias, apresenta o mesmo diagnóstico que o ensaio de 12 meses. Porém, os autores salientam a necessidade de acompanhar os ensaios até os 120 dias.

2.3 MÉTODO PARA INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO

Chama-se sintomatologia o estudo dos sinais, sintomas, que uma estrutura pode apresentar ao possuir problemas em sua integridade, ou seja, refere-se à avaliação das manifestações patológicas a partir dos sintomas observados em estruturas degradadas. Seu objetivo é realizar o diagnóstico do problema que, inicialmente, é feita através da inspeção visual (preliminar), afim de identificar os sintomas macros, assim como, mapear a sua localização na estrutura e classificar sua intensidade.

Seguidamente, faz-se necessário realizar ensaios mais específicos para auxiliar em um diagnóstico preciso. Para isto, analisa-se cada informação coletada de forma mais detalhada em escala de comportamento global da construção, como mostra o

fluxograma geral na figura 23. Além da experiência profissional, é fundamental o conhecimento teórico para interpretação dos resultados frente aos diversos materiais e agentes agressivos possíveis. Ou seja, é necessário que se conheça suas formas de manifestação (sintomas), os processos de surgimento (mecanismos), os agentes desencadeadores desses processos (causas) e em que etapa da vida da estrutura teve origem o problema (Muñoz, 2001).

Figura 23 - Fluxograma dos passos para interpretar e analisar problemas patológicos nas edificações.



Fonte: (Andrade, 1992)

No que diz respeito a patologias relacionadas à RAA, sabe-se que as lesões no concreto são os sintomas mais comuns aos fenômenos de carbonatação e ao ataque de sulfatos. A diferenciação pode ser realizada em função do conjunto de disposições internas e superficiais observadas no concreto.

Sendo assim, deve-se identificar a existência de anomalias através da inspeção visual em toda a superestrutura, ou seja, identificar os sintomas macros. Observar a natureza das manifestações patológicas presentes, avaliar o grau de incidência, estimar a gravidade, bem como a classificação de suas características e sua quantificação, pois a edificação normalmente apresenta lesões indicativas de

problemas. Vale salientar que, para edifícios tipo pilotis, é necessário analisar o sistema estrutural (pilares, vigas e lajes), caso apresente fissuras/eflorescências ou outras manifestações patológicas. Sem esquecer de analisar o piso do pavimento térreo, anteriormente à fundação. Sendo assim, é interessante registrar os dados obtidos em planilhas e desenhos. Posteriormente, verificar se foram cumpridas as manutenções preventivas previstas no manual da edificação.

A inspeção visual abrange alguns fatores, como no caso das lesões, que é classificada quanto à sua abertura através da Tabela 2, proposta pelo IBAPE – Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia.

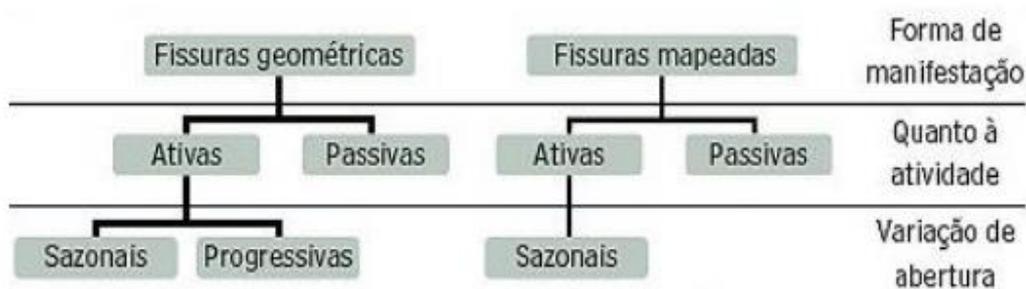
Tabela 2 - Classificação das lesões (IBAPE)

Tipo	Abertura (mm)
Fissura capilar	< 0,2
Fissura	0,2 - 0,5
Trinca	0,5 - 1,5
Rachadura	1,5 – 5,0
Fenda, greta ou frincha	5,0 -10,0
Brecha	> 10,0

Fonte: Vidal (2012).

Além disso, as lesões também podem ser classificadas quanto à sua forma de manifestação, à sua atividade e à sua variação de abertura, como pode ser visto na figura 24 (TÉCHNE, 2010).

Figura 24 - Classificação das fissuras quanto à sua forma de manifestação (IBAPE)



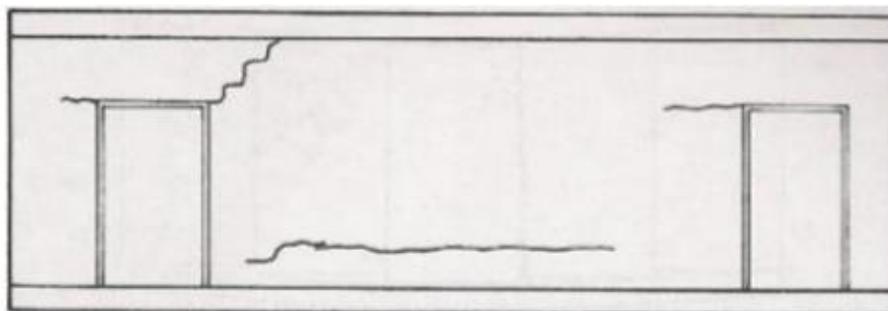
Fonte: TECHNE (2010)

Quanto à sua forma de manifestação, são classificadas de acordo com a semelhança ao desenho que se forma, podendo ser geométricas, quando a lesão acompanha o bloco cerâmico, ou mapeadas, quando apresentam forma semelhante a um mapa, que é, geralmente, nos casos da fissuração causada pela RAA em blocos de fundação.

Quanto à sua atividade, são classificadas de acordo com a existência de variação de sua abertura e de seu fechamento, podendo ser ativas, quando há uma variação sensível, ou passivas, quando há uma variação passiva ao longo do tempo. Quanto às suas variações de abertura, podem ser sazonais, em que as variações oscilam em torno de um valor médio, ou progressivas, quando as aberturas são sempre crescentes, o que pode indicar problemas estruturais (Moreira, 2018).

É possível identificar alguns motivos de lesões de acordo com a disposição delas, como mostrado nas figuras 25,26 e 27.

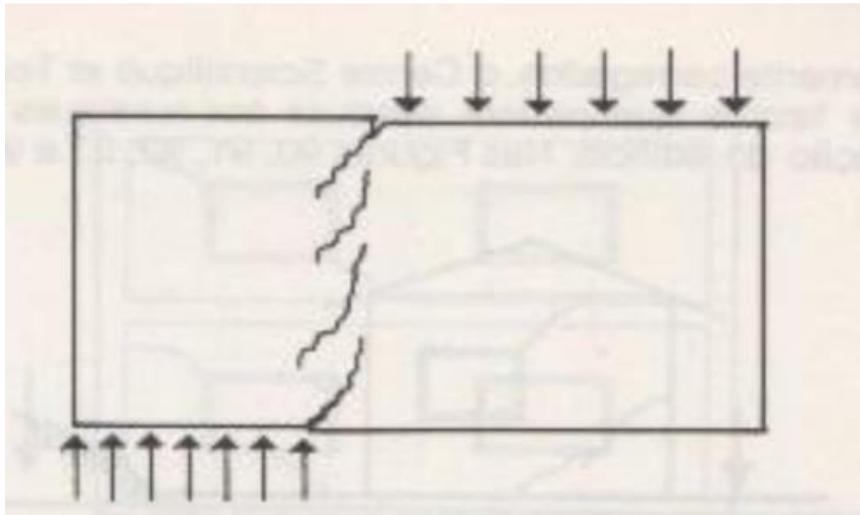
Figura 25 - Trincas em paredes com aberturas, causadas pela deformação dos componentes



Fonte: Thomaz (1989).

De modo geral, as fissuras por recalques são inclinadas, com aberturas maiores, e tendem a apontar para a parte da estrutura da fundação que sofreu recalque. Podem apresentar também esmagamentos localizados, em formato de escamas, provocados pelas tensões de cisalhamento (Figura 26). Recalques acentuados apresentam uma variação na abertura da fissura (THOMAZ, 1989).

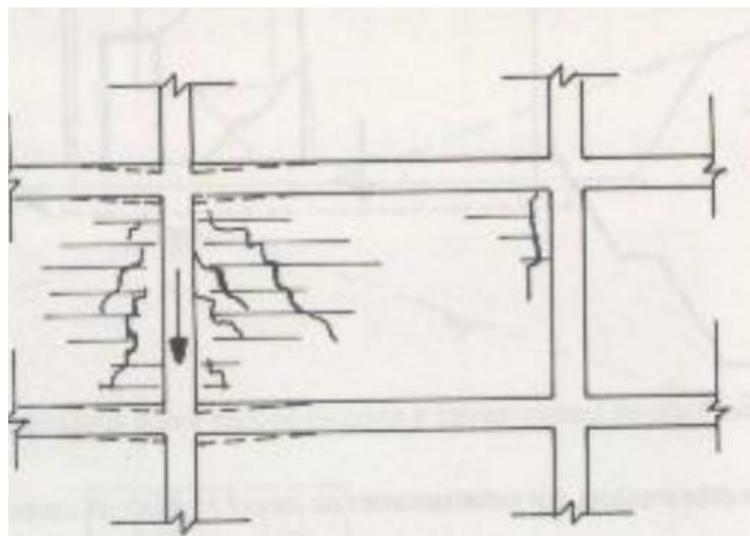
Figura 26 - Trinca de cisalhamento



Fonte: Thomaz (1989).

Recalque entre pilares, surgem trincas inclinadas na direção do pilar que sofreu maior recalque, como mostra na figura 27.

Figura 27 - Fissuras em pilar com maior recalque



Fonte: Thomaz (1989).

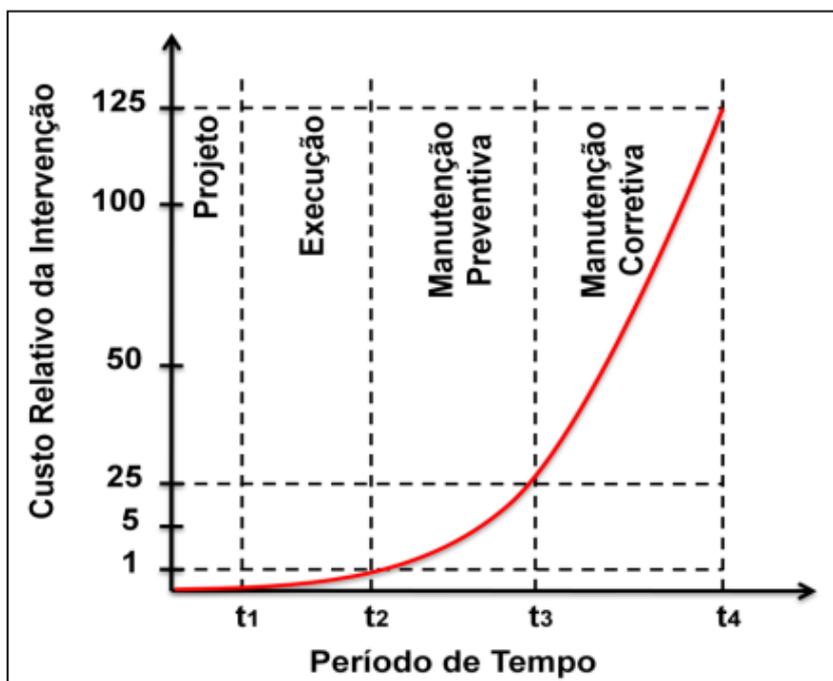
Chama-se Diagnóstico a etapa de conclusão das causas originárias das manifestações apresentadas na edificação. O diagnóstico de manifestações patológicas nas inspeções visuais possibilita a avaliação inicial do concreto, contudo

tornam-se necessários ensaios laboratoriais específicos na edificação para possibilitar um parecer mais preciso do tipo de agente agressivo envolvido.

Já o Prognóstico é quando o profissional habilitado relata as medidas corretivas (Terapia), assim como, as consequências caso não sejam cumpridas. O propósito desta Dissertação é adaptar esse fluxograma à realidade da inspeção de fundações em concreto armado, com suas particularidades, tendo como foco a deterioração da estrutura por RAA e de seus elementos, ou seja, contemplando principalmente os aspectos de durabilidade.

A lei de Sitter (1984) (figura 28) explica a importância da prevenção dos problemas nas estruturas, a qual relaciona custo e tempo. Segundo esta lei, os custos devidos a intervenções tardias em estruturas ascendem em projeção geométrica de razão 5 (cinco) em relação aos custos com medidas preventiva adotadas na etapa de projeto (CAVALLI; DOTAF, 2008)

Figura 28 - Lei de Sitter



Fonte: HELENE (1992) apud CAVALLI; DOTAF (2008)

Os organizadores da 13 International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete (ICAAR), estimam que o custo anual para reabilitação e substituição de obras com RAA é de 2,6 bilhões de dólares, segundo Figueirôa e Andrade (2007)

Sendo assim, no processo de reabilitação de um edifício, a inspeção e o diagnóstico são passos importantes, já que, segundo as definições e interpretações, virá a decisão da intervenção ou não na construção. Um diagnóstico preciso representa o sucesso do investimento e, claro, o início da solução do problema (MUÑOZ, 2001).

Muitos dos termos empregados no diagnóstico de estruturas em concreto são originários da Medicina. Visto que, inspecionar, diagnosticar, avaliar e propor uma solução são aspectos parecidos com o trabalho de um médico que, após coletar todas as informações, procura explicar suas observações através dos resultados e indícios complementares, definindo o diagnóstico mais provável para a doença. Assim, embora o corpo humano tenha seu funcionamento amplamente estudado pela medicina, cada paciente é único e tem um comportamento distinto. Assim também acontece com as estruturas de concreto. Portanto, vale ressaltar que o trabalho técnico é realizado por profissional habilitado (engenheiro ou arquiteto), especialista e capacitado para a função, assim como ocorre na medicina.

Após muitos acidentes correlacionados a Manutenção Predial, em 2009, a Câmara de Inspeção Predial do IBAPE/SP realizou um estudo sobre acidentes ocorridos em edificações com mais de 30 anos. A figura 29 abaixo ilustra os resultados.

Figura 29 - Gráfico de distribuição da incidência dos acidentes prediais por tipo de origem



Fonte: IBAPE/SP (2009)

Os resultados mostraram que expressivos 66% das prováveis causas e origens dos acidentes foram relacionados à problemas com a manutenção, perda precoce de desempenho e deterioração acentuada. Os outros 34% possuem causa e origem relacionada aos chamados vícios construtivos ou, ainda, anomalias endógenas.

2.3.1 Inspeção

Chama-se inspeção, a atividade técnica especializada que abrange a coleta de elementos, de projeto e de construção, o exame minucioso da construção, a elaboração de relatórios, a avaliação do estado da obra e as recomendações, que podem ser de nova vistoria, de obras de manutenção, de recuperação, de reforço ou de reabilitação da estrutura (Helene, 2007). De acordo com a Norma de Inspeção Predial do IBAPE/SP (2012), inspeção é a análise isolada ou combinada das condições técnicas, de uso e de manutenção da edificação.

Ou seja, o engenheiro habilitado é capaz de obter uma visão ampla e detalhada do estado de conservação e manutenção da edificação, conhecendo os pontos críticos a serem corrigidos. Sendo assim, a Inspeção Predial é apresentada através de um laudo. Esse documento segue diretrizes mínimas da IBAPE/SP, além da Norma Técnica ABNT NBR 13752, e pode ser dividido em algumas etapas.

2.3.1.1 Etapas da Inspeção Predial

A Inspeção Predial é realizada em algumas etapas principais. De acordo com a Norma de Inspeção Predial do IBAPE/SP (2015) resumidamente são elas:

Primeira etapa: Levantamento de dados e documentos da edificação: documentos administrativos, técnicos, de manutenção e operação;

Segunda etapa: Coleta de informações com síndico ou empresa responsável pela administração da edificação para analisar as informações sobre o uso da mesma, como históricos de reformas, manutenções, etc;

Terceira etapa: Realização de vistorias na edificação, que podem ser classificadas nos seguintes níveis:

Nível 1 - Edificações simples, sendo dispensável a equipe multidisciplinar. (Casas, galpões, edifícios até 3 pavimentos, lojas etc);

Nível 2 - Edifícios multifamiliares, edifícios comerciais sem sistemas construtivos mais complexos como climatização, automação etc. Normalmente envolve equipe multidisciplinar com engenheiros civis ou arquiteto e engenheiros eletricitas.

Nível 3 - Edificações complexas, onde há sistema de manutenção implantado conforme a ABNT NBR 5674. Sempre realizada por equipe multidisciplinar, envolvendo: engenheiro civil ou arquiteto, engenheiro eletricitista e engenheiro mecânico.

Quarta etapa: Classificação dos problemas constatados nas vistorias, na sua origem. Eles podem ser classificadas em:

Anomalias construtivas ou endógenas - Relacionadas aos problemas de construção ou projeto;

Anomalias funcionais - Relacionadas à perda de funcionalidade por envelhecimento natural;

Falhas de uso e manutenção - Relacionadas à perda precoce de desempenho por deficiências no uso e nas atividades de manutenção periódicas.

Lembrando que, todas as deficiências são cadastradas por fotografias que devem constar no Laudo de Inspeção Predial.

Quinta etapa: Classificações dos problemas de acordo com grau de risco (crítico, regular e mínimo), são considerados: fatores de conservação, rotinas de manutenção previstas, agentes de deterioração precoce, depreciação, riscos à saúde, segurança, funcionalidade e comprometimento de vida útil;

Sexta etapa: Elaboração de lista de prioridades técnicas, baseada na classificação do grau de risco de cada problema (do mais crítico ao menos crítico);

Sétima etapa: Elaboração de recomendações ou orientações técnicas para a solução dos problemas constatados (manutenções, reparos ou reformas para solução das anomalias);

Oitava etapa: Avaliação da qualidade de manutenção (atende, não atende ou atende parcialmente). Resumidamente, para essa classificação, consideram-se as falhas constatadas na edificação, as rotinas e execução das atividades de manutenção e as taxas de sucesso, dentre outros aspectos;

Nona etapa: Avaliação do Uso da Edificação (regular ou irregular). É observado as condições originais da edificação e os seus sistemas construtivos, além de limites de utilização e suas formas.

2.3.1.2 Laudo da Inspeção Predial

Ainda de acordo com a IBAPE/SP (2015), Laudo é o documento que segue diretriz técnica para ser elaborado, a fim de demonstrar todas as etapas da inspeção ou avaliação da estrutura e fundamentar a conclusão. Diferente de um *check-list* que possui apenas fotografias, esse documento é mais complexo, e de modo geral, devem constar pelo menos os seguintes itens:

1. Identificação do solicitante;
2. Classificação do objeto da inspeção;
3. Localização;
4. Datas das vistorias e equipe;
5. Descrição técnica do objeto: Tipologia e Padrão Construtivo Utilização e Ocupação Idade da Edificação
6. Nível utilizado de inspeção;
7. Documentação analisada;
8. Critério e metodologia da inspeção;
9. Das informações: Lista de verificação dos elementos construtivos e equipamentos vistoriados com a descrição e localização das respectivas anomalias e falhas. Classificação e análise das anomalias e falhas quanto ao grau de prioridade;
10. Lista de prioridades;

11. Classificação da qualidade de manutenção;
12. Lista de recomendações técnicas;
13. Lista de recomendações gerais e sustentabilidade;
14. Relatório fotográfico (este pode ser anexo ao Laudo ou, ainda, junto de cada problema constatado e descrito no item 9);
15. Recomendação do prazo para nova Inspeção Predial;
16. Data do laudo; Assinatura do(s) profissional(ais) responsável(eis), acompanhada do número do CREA ou CAU;
17. Anotação de Responsabilidade Técnica (ART), emitida pelo CREA, ou Registro de Responsabilidade Técnica (RRT), emitida pelo CAU.

Através do diagnóstico das anomalias existentes nas edificações, deve-se estabelecer seus níveis de criticidade, para que posteriormente possa-se elaborar a estratégia de ação de acordo com as prioridades técnicas. Logo, desta maneira auxilia na gestão predial proporcionando uma manutenção mais eficiente e menos onerosa.

2.3.2 Diagnóstico

De acordo com Tutikian e Pacheco (2013), Dá-se o nome de diagnóstico do problema patológico, todo o processo de entendimento e explicação científica dos fenômenos ocorridos e seus respectivos desenvolvimentos de uma construção onde ocorrem manifestações patológicas. Os sintomas possuem dinamismo, isto é, o diagnóstico de um problema patológico não pode ser algo imediatista, mas sim, uma análise que entenda e leve em consideração todo o processo de evolução do caso, pois, assim como o aspecto de uma manifestação pode ser de uma maneira durante uma fase, em outro período pode encontrasse completamente diferente.

Através da figura 30, é possível entender a importância de um diagnóstico nas estruturas com manifestações patológicas.

Figura 30 - Esboço das etapas e da importância de um diagnóstico nas estruturas com manifestações patológicas.



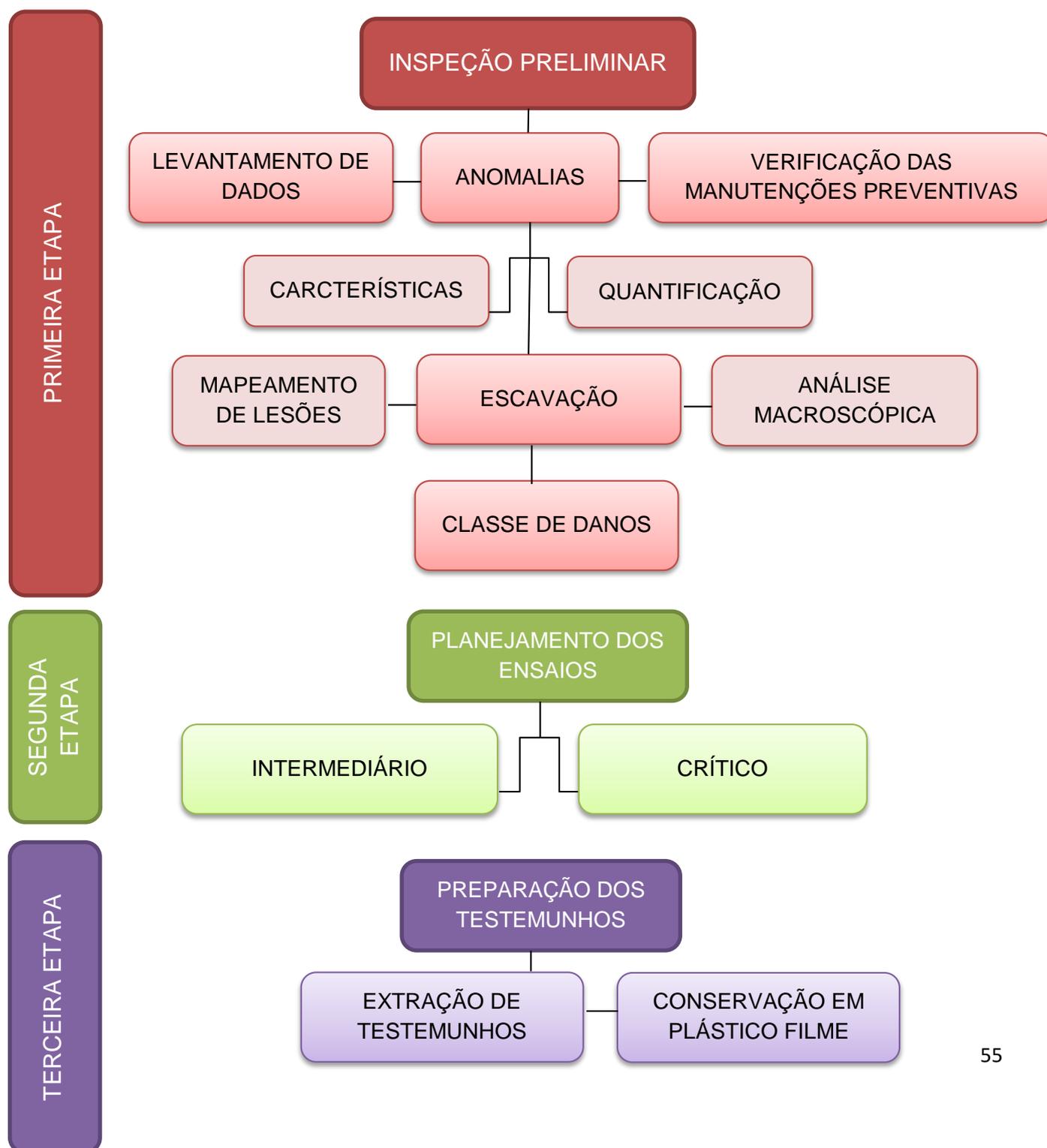
Fonte: Tutikian e Pacheco (2013),

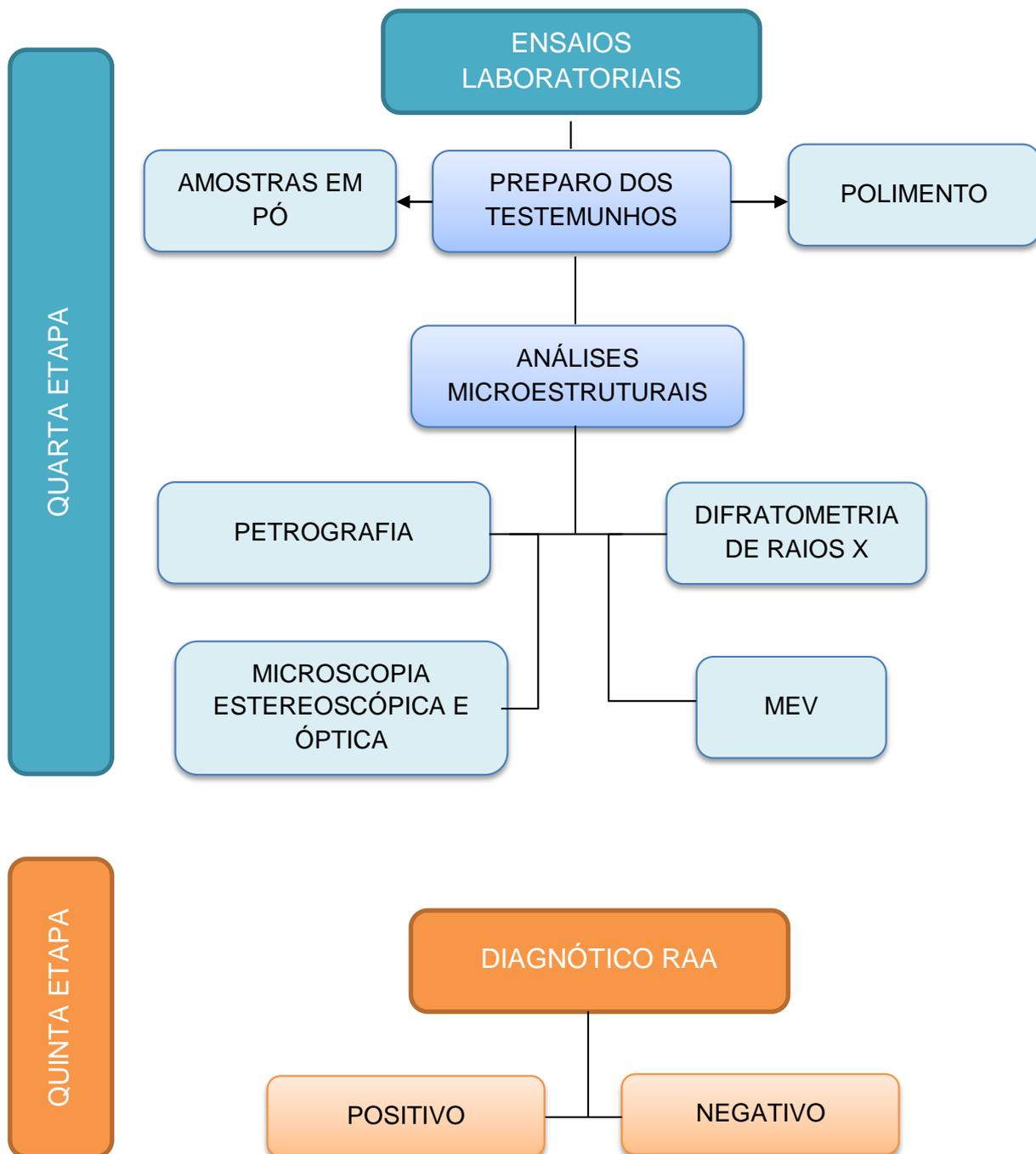
O diagnóstico é, com certeza, a fase mais importante do processo. É ele que definirá o sucesso ou fracasso da terapêutica a ser adotada. Um diagnóstico equivocado implicará em intervenções que não conseguirão curar a enfermidade, e ainda dificultarão análises e estudos futuros, além do inútil gasto de dinheiro (LAPA, 2008). Ainda segundo o autor, é importante que os dados sejam colhidos ordenadamente, até que seja possível realizar o diagnóstico. Vale salientar que, evidentemente, quanto mais cedo a enfermidade for detectada, menor terá sido a perda de desempenho, e mais simples e barato será o tratamento.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MÉTODO DE INSPEÇÃO EM EDIFÍCIOS PRONTOS E DIAGNÓSTICO RÁPIDO EM ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO

Para fins de investigação e diagnóstico da RAA em elementos de fundação, foi elaborada uma metodologia especial das atividades a serem desenvolvidas na inspeção. A representação esquemática da metodologia adotada é apresentada no organograma a seguir:





3.1.1 PRIMEIRA ETAPA - Inspeção preliminar

A primeira etapa é o levantamento de dados de construção da edificação, com enfoque na fundação. Normalmente é possível obter esses dados junto à construtora que realizou a obra, como: características (FCK, usinado, moldado in loco, aditivado ou não etc), tipo de cimento, caracterização do cimento, a água de amassamento,

dados da água do lençol freático (ph, teor de sulfatos, teor de cloretos), tipo de agregados, enfim, todas as informações possíveis são relevantes.

Sabendo que a RAA, isoladamente ou em conjunto com outros fatores, atingem a super e infraestrutura, fragilizando o sistema como um todo. Com isso, após a análise e registro das anomalias no sistema estrutural macro, é necessário analisar os possíveis blocos de fundação afetados, sendo assim o próximo passo é iniciar a escavação para acesso e inspeção dos elementos.

Para a escavação dos blocos, deve-se seguir a NR 18 (2020) - Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção, visando à segurança do ambiente de trabalho e dos funcionários envolvidos no serviço.

Estudos anteriores como Araújo e Sobrinho 2016, mostraram que inspecionar aproximadamente 13% dos blocos foi possível a confirmação do diagnóstico. Outros estudos como o caso de Berenguer et al, 2016, foram um pouco mais além, necessário inspecionar 25% das fundações para um diagnóstico positivo quanto a RAA. Essa quantidade depende do grau de deterioração da estrutura, em qual nível de ataque está, pois estruturas com maiores indícios da patologia, provavelmente terão o diagnóstico para RAA mais rapidamente, a preocupação se dá no meio termo, pois aí o custo se eleva (é necessário mais inspeções e ensaios para confirmação) e o nível incerteza, aumenta a chance de erro no diagnóstico.

Como não existe uma metodologia específica e universalmente aceita que determine a quantidade exata de escavações mínimas suficientes para um diagnóstico da RAA, e visando também não haver gastos desnecessários, deve-se inicialmente executar apenas duas escavações. Uma para o bloco de maior volume, outra para o provável de maior dano, independente do volume total da fundação.

Tendo em vista que cada região possui um preço de mercado, e que esse valor está em constante mudança, atualmente, na região nordeste do Brasil, mais especificamente na RMR, após pesquisa de mercado envolvendo algumas empresas locais, conclui-se que gasta-se em média 1000 dólares em todo o serviço de escavação (mão de obra, equipamentos, reparos de piso, ART, reaterro etc) para inspeção de cada bloco de fundação. Salientado que, muitas variáveis, como nível do

lençol freático, tamanho do bloco, profundidade da fundação, influenciam diretamente neste custo final.

Inicia-se a escavação pelo bloco mais provável de estar afetado, o qual apresentou na etapa anterior maiores índices, com maiores patologias visuais seja fissuras, trincas, destacamentos de revestimentos, eflorescências, perda de secção etc. Além disso, inicia-se pelo que esteja localizada geograficamente na área mais vulnerável da edificação (mais próximo do nível do mar, maior incidência fluviométrica e pluviométrica).

Depois de escavar as faces da sapata, realiza-se a limpeza com jato de alta pressão (figura 31), equipamento igual ao usado na lavagem de carros e fachadas, cuja capacidade de pressão pode ser de 400 Kilopascal e uma vazão de 360 litros/hora, obtendo assim, uma visualização mais precisa das trincas e fissuras.

Figura 31 - Lavagem das faces com a lavadora de alta pressão



Fonte: Silva, Geovani 2007.

Em termos de durabilidade da edificação, faz-se necessário verificar se as fissuras são toleradas, através da Norma ABNT NBR 6118 (Limites para fissuração e proteção das armaduras quanto à durabilidade). No item 13.4, a norma discrimina limites para controlar a abertura de fissuras. A Figura 32 apresenta esses valores limites para ao

tamanho da abertura da fissuras (w_k) em função do tipo de concreto e da classe de agressividade ambiental - a tabela também cita valores para concreto protendido.

Figura 32 - Limites para a abertura característica w_k das fissuras

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	

Fonte: NBR 6118 (2014)

Seguidamente, realiza-se portanto uma nova inspeção visual, agora dos blocos de fundações, e registra-se as características como mostrado no exemplo da Tabela 3 sugestão da ABCP.

Tabela 3 - Exemplo de uma análise macroscópica do concreto

Amostra		
ASPECTOS GERAIS	Cor da argamassa	Cinza clara
	Distribuição dos constituintes	Normal
	Proporção dos constituintes	Argamassado
	Aderência argamassa/agregado graúdo	Normal
	Porosidade macroscópica	Pouco poroso, com poros submilimétricos
	Compacidade	Compacto
	Adensamento	Bem adensado com poucos vazios
	Fratamentos	Não observados
ASPECTOS RELATIVOS À REAÇÃO ÁLCALIS-AGREGADO	Bordas de reação	Observadas com frequência
	Poros preenchidos	Frequentes - parcialmente preenchidos por material esbranquiçado
	Microfissuras	Observadas

Fonte: Exemplo de relatório de ensaio - ABCP

Segundo Pires Sobrinho (2012), quadros fissuratórios intensos na parte superior dos blocos de fundações, concentrando-se, exatamente, na região de baixa compressão, com fissuras de aberturas acima dos limites, nos cantos mais extremos são mais indicativos da presença da RAA. Ou seja, sabe-se que um forte indício da RAA é a presença das lesões do tipo mapa, mas, não é possível um diagnóstico apenas com a inspeção visual pois, em alguns casos, como no estudo de Ivana Arnaud (2010),

apesar das lesões nesse formato (figura 33) e do agregado ser potencialmente reativo, os resultados, assim como a petrografia feita pela ABCP não identificaram a RAA, sendo mais provável como diagnóstico que as lesões foram induzidas por tensões de origem térmica, estrutural ou DEF.

Figura 33 - Fissuração do tipo mapa em bloco de fundação de edifício em construção



Fonte: ARNAUD, I R L, 2010

É relevante verificar a presença de eflorescências e se o elemento apresenta-se friável, ou seja, que pode ter se fragmentado, sendo visível a interface deteriorada entre o agregado e a pasta. Prontamente, faz-se o mapeamento e demarcação das fissuras (figura 34), dessa forma, cria-se outra tabela composta por esses dados, para posterior análise das respectivas aberturas e orientação delas. Para melhor visualização das lesões, pode-se contorna-las com lápis de cera.

Figura 34 - Mapeamento das lesões



Fonte: Berenguer et al, 2016.

Com base nos dados obtidos com a quantidade de danos visíveis nesta etapa preliminar, deve-se enquadrar esses dois blocos em uma das três classes abaixo descritas.

CLASSE DE DANOS

MÍNIMO

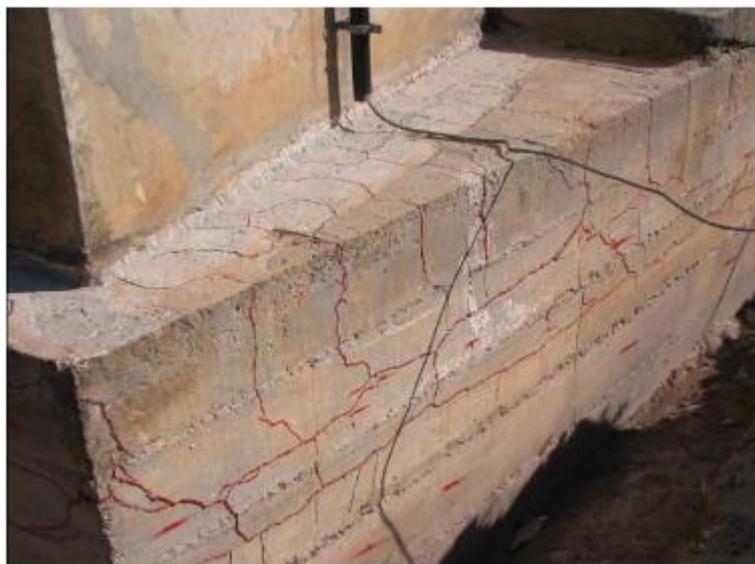
INTERMEDIÁRIO

CRÍTICO

Onde o mínimo é considerado nulo ou quase nulo de quadros deletérios aparentes e o crítico, o máximo. Sendo classificado mínimo, deve-se executar encerrar os estudos nessa edificação.

É classificado como intermediário os blocos onde existe a presença de agentes deletérios em grau não tão avançado, como exemplificado na Figura 34a.

Figura 34a - Exemplo de bloco com classe intermediária



Fonte: Andrade, T, W. (2007)

Diferentemente do nível crítico onde os blocos estão muito danificados e correm sérios riscos a edificação (Figura 34b e 34c).

Figura 34b - Exemplo de bloco classe crítica



Figura 35c - Exemplo de degradação da classe crítica



Fonte: Silva (2019)

De posse desses dados, a próxima etapa é a determinação da necessidade de mais escavações e da investigação interna do bloco. Para isto, retiram-se testemunhos dos dois blocos com o auxílio do equipamento denominado broca diamantada (Figura 35). A nível de durabilidade, que não é o caso desse estudo, essa é a etapa que poderiam ser retiradas amostras para a análise da resistência estrutural e compara-la com a estipulada em projeto, verificando a durabilidade estrutural e garantindo a segurança da edificação. Porém, este estudo contempla apenas o diagnóstico da RAA.

Figura 35 - Retirada de corpos-de-prova para análise laboratorial



Fonte: Silva, Geovani 2007.

3.1.2 SEGUNDA ETAPA – Planejamento dos ensaios

Ao contrário do que normalmente se imagina, para a classe crítica, é necessário executar menos ensaios para a confirmação da RAA. O principal problema está na classe intermediária, onde a patologia não está tão evidente, podendo ocorrer um falso negativo e comprometer toda a edificação.

Sendo assim, para a classe intermediária, aconselha-se executar todos os ensaios descritos na etapa quatro, afim de sanar qualquer dúvida que possa gerar nos resultados encontrados. Caso o resultado seja negativo e a dúvida permaneça, aconselha-se escolher outro bloco, de modo aleatório, para repetir os ensaios.

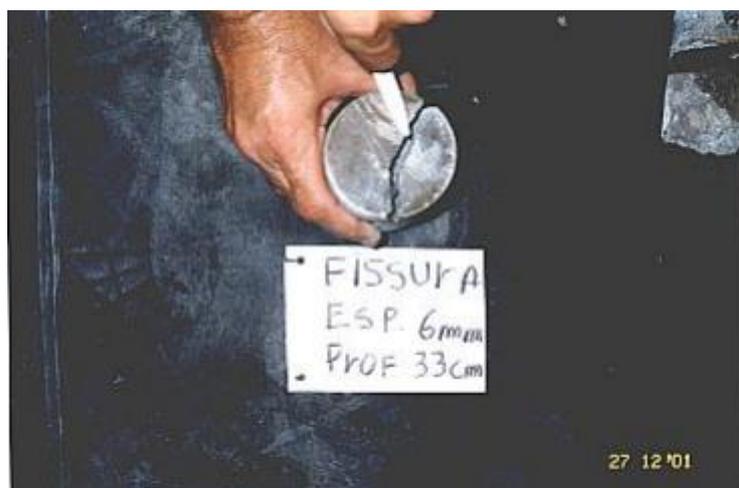
Para a classe crítica, faz-se diretamente o ensaio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Por possuir um maior detalhamento, é feita através dele a microanálise química. Ou seja, com os indícios evidentes da patologia, através do MEV é possível escolher o ponto específico para análise (o mais afetado) e caracterizar a provável ocorrência da RAA através de seus produtos constituintes por meio da análise da composição. Mesmo assim, sendo suspeito um falso negativo, caso julgue necessário, aconselha-se realizar outro ensaio da quarta etapa.

3.1.3 TERCEIRA ETAPA – Preparação dos testemunhos

Para compreender as propriedades mecânicas, tais como módulo de elasticidade, resistência e à penetração dos agentes agressivos, é necessário verificar se ocorreram realmente alterações internas na estrutura. Para isto, após a confirmação dos sintomas visuais do item anterior, inicialmente, devem-se analisar os testemunhos, os quais dependem de orientação e aprovação prévia de um engenheiro responsável, conforme critérios discutidos no presente estudo.

Como também não existe até o presente momento, uma norma específica para este caso, é recomendado seguir as recomendações gerais da NBR 7680 (2015). Além disso, através de estudos de diversos autores como Helene et al (2002), recomenda-se que as amostras sejam extraídas com furos horizontais e verticais, em locais de acordo com a incidência de lesões e possíveis ataques por agentes agressivos. Alguns estudiosos recomendam extrair de maneira horizontal da parte de menor direção do bloco, em cima da lesão lateral de maior abertura, executando o transpasse total do bloco, como mostra no exemplo da figura 36. Afim de identificar a profundidade das lesões bem como seu comportamento no interior do bloco.

Figura 36 - Detalhe da lesão na superfície do testemunho extraído de um bloco de fundação.



Fonte: Helene et al., (2002)

Os testemunhos que forem para ensaios laboratoriais devem ser extraídos com diâmetro de 100 mm e embalados em papel filme (Figura 37) para conservação de umidade e para evitar a contaminação de agentes externos como, por exemplo,

carbonatação e íons cloreto. Vale ressaltar que esses testemunhos não servem para o ensaio de compressão, pois para isso, é preciso integridade das amostras.

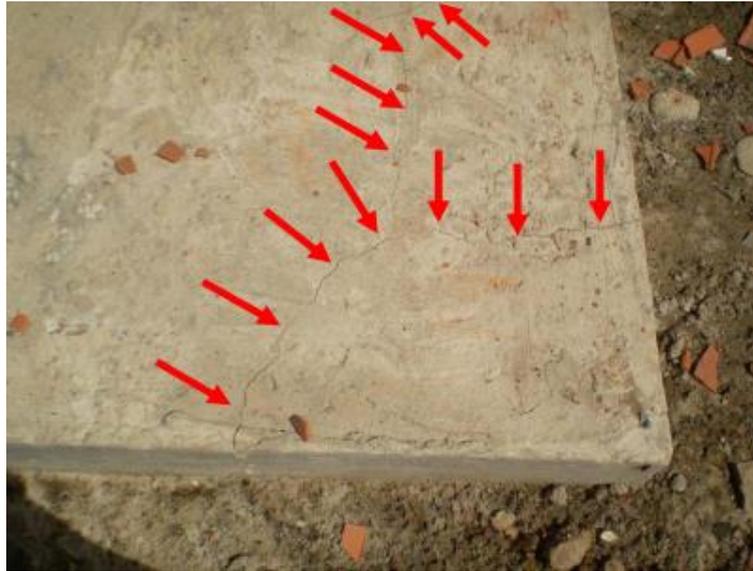
Figura 37 - Testemunho embalado em papel filme



Fonte: Silva, Geovani 2007.

Em seu estudo, mesmo não apresentando a RAA no diagnóstico, Geovani Silva (2007) mostra a importância da investigação interna nos blocos de fundação (figura 38 e 39), pois, mesmo com grau fissuratório aparentemente leve, internamente o bloco pode estar comprometido. Neste caso é considerável, em termos de durabilidade, verificar se as lesões ultrapassam a camada de recobrimento.

Figura 38 – Lesões aparentemente superficiais no canto do bloco



Fonte: Silva, Geovani 2007.

Figura 39 - Análise interna: lesão se propaga até o aço



Fonte: Silva, Geovani 2007.

Assim como no caso da escavação, para viabilizar a quantidade de extrações necessárias, precisa-se previamente alinhar o custo desse serviço. Em pesquisa de mercado, também na RMR do Recife, atualmente, no ano base 2020, o valor mínimo de uma diária de um profissional com até 4 extrações de 100mm de diâmetro e comprimento até 200mm é de aproximadamente 80 dólares. Esse valor aumenta de

acordo com cada necessidade e indicação de quantitativo pela empresa e profissional responsável pela investigação.

Após observado alguns estudos a respeito da quantidade de extração de testemunhos em blocos de fundações para identificação da RAA, conclui-se que em média, são retirados pelo menos 2 (dois) corpos-de-prova de cada bloco estudado para as análises microestruturais. Deve-se preparar uma amostra da região deteriorada e a outra da região não deteriorada para efeito de comparação. Para diagnóstico da possível patologia, é necessário uma análise micro estrutural, através de técnicas de caracterização dos materiais do concreto. Para isto, após a retirada e acondicionamento, as amostras devem ser levadas para laboratório especializado.

3.1.4 QUARTA ETAPA – Ensaios laboratoriais

Em laboratório, os testemunhos devem ser inspecionados visualmente (figura 40) e, em seguida, fragmentados em partículas menores para observação em microscópio. O ideal é o material ser fatiado com espessuras de aproximadamente 8mm, utilizando-se da serra de disco diamantada.

Figura 40 -: Inspeções visuais a olho nu no testemunho. a) Presença de bordas de reação no agregado, b) Presença de poros preenchidos na amostra.



Fonte: MIZUMOTO (2009)

Em seguida, deve-se proteger novamente com papel filme e acondicionadas em caixas plásticas fechadas, até o momento dos ensaios de caracterização do concreto.

As fatias são novamente repartidas em quatro partes, e separadas para as análises microestruturais, são elas: (Petrografia, Microscopia Estereoscópica e Óptica; Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difratomia de Raios).

Para ensaios que necessitam de amostras em pó, utiliza-se um pilão de alumina e um almofariz de ágata para separar o agregado graúdo da pasta, de modo que a pasta do concreto passe pela peneira 325mm e resulte em um pó muito fino necessário para o ensaio de difratometria de raios X. As amostras íntegras passam pelo polimento para serem levadas ao microscópio óptico e ao MEV.

3.1.4.1 Análises microestruturais

A Análise Petrográfica é uma etapa primordial ao que desrespeito à RAA, por ser a etapa da caracterização de reatividade expansiva dos agregados no concreto, uma vez que é realizada com o objetivo de detectar a presença de rochas e minerais potencialmente reativos com os álcalis do cimento. Estes minerais e rochas são, então, chamados deletérios e, ao contrário, os não-reativos são chamados inócuos, que são inertes.

As metodologias utilizadas são preconizadas nas normas americanas ASTM C856 (2004), para concreto e a ASTM C295 (2003), para agregado e pela brasileira NBR 7389, 1992. A NBR 15577 parte 3 (2013) especifica um método para execução de análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.

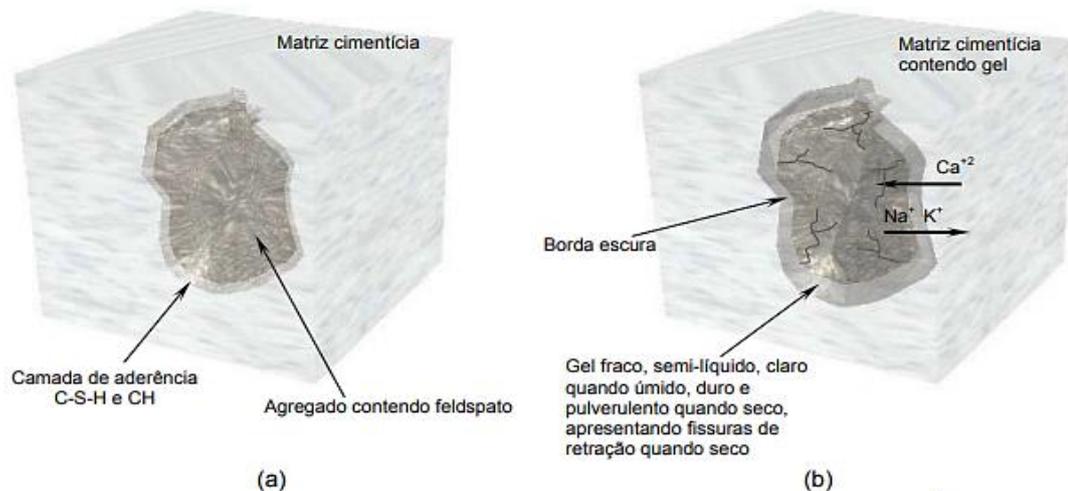
Um microscópio petrográfico ou microscópio de luz polarizada é um tipo de microscópio óptico usado em petrografia e mineralogia, instrumento utilizado na observação de rochas e minerais, possibilitando ampliações que atingem normalmente as 400x. Com ele é possível analisar a interface entre a pasta e os agregados. Por exemplo, pode-se identificar se existe a presença ou não de auréola degenerativa ao redor dos bordos dos agregados graúdos e a presença de agentes como sulfatos.

Segundo Andrade et al. (2006), devido às microfissurações ocorridas na interface entre a pasta e os agregados, ocasionada, pelo fenômeno expansivo da reação álcali-agregado, a rigidez do concreto é diretamente prejudicada, ou seja, há uma

diminuição da capacidade de deformação deste material. Além disso, sabe-se que dispersões elevadas e módulos de elasticidade baixos são grandes indícios de reações químicas e físicas intensas e prejudiciais a estrutura.

Na reação álcali-silicato, podem ser encontradas zonas escuras (figura 41) na interface da matriz cimento/agregado, que são formadas por um gel de silicato alcalino. Outra característica que pode estar presente são os depósitos brancos sobre os agregados e em seus planos de clivagem, tendo em sua constituição: silício, potássio e cálcio. (BULLETIN 79, 1991)

Figura 41 - Características do agregado antes (a) e depois da reação (b)



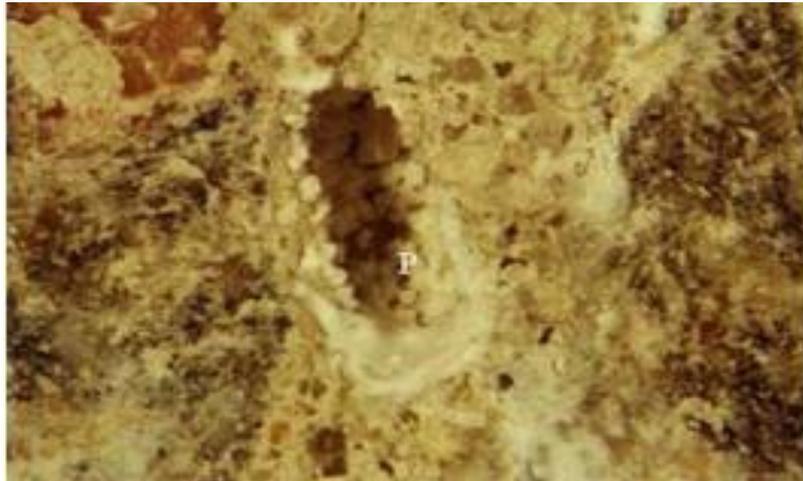
Fonte: Van Aardt e Visser (1977)

A partir do resultado da análise petrográfica, faz-se uso da ABNT NBR 15577-3 Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto, para verificar o critério de classificação dos agregados.

3.1.4.2 Microscopia Estereoscópica e Óptica

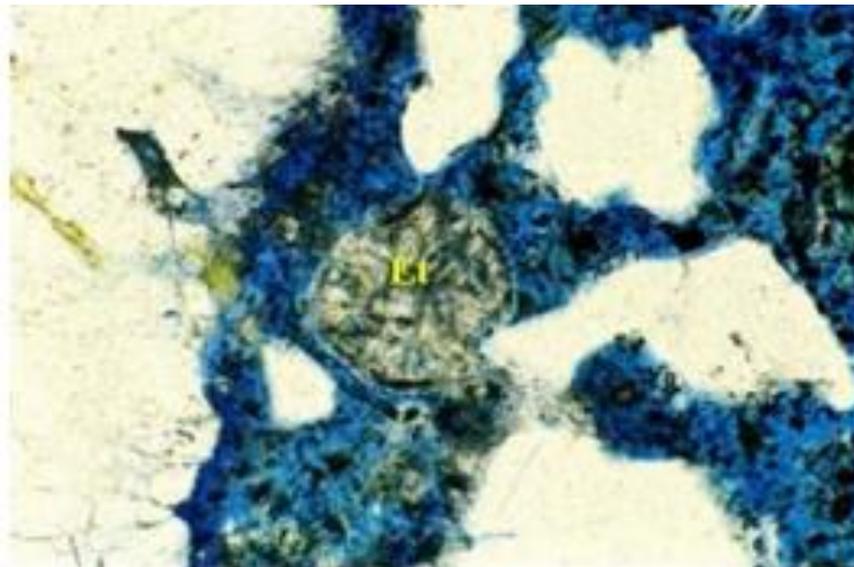
No microscópio estereoscópico deve-se observar os poros (como mostrado no exemplo da figura 42) se estão preenchidos por algum material, por exemplo esbranquiçado. Analisar também qual o aspecto, se é maciço, gelatinoso. Além disso, observar se são tufo de cristais aciculares, como o caso da etringita (figura 43).

Figura 42 - Poro (P) preenchido por tufo de material cristalizado e gel de aspecto cerâmico. Imagem obtida através de microscópio estereoscópico com ampliação 6x.



Fonte: Relatório de ensaio nº 35927 – ABCP

Figura 43 - Detalhe de um poro na borda do agregado graúdo preenchido por cristais de etringita (et). Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 100x.



Fonte: Relatório de ensaio nº 35927 – ABCP

Com auxílio de um microscópio óptico, busca-se observar as fraturas, grãos de agregados e suas interfaces (figura 44), uma vez que estes detalhes apresentam índices de reflexão diferentes, fornecendo um contraste possível para analisar as patologias. O microscópio óptico funciona a partir de emissão de luz por uma fonte

luminosa localizada na base do aparelho (luz transmitida) e outra no braço (luz refletida), essa técnica tem capacidade de ampliação em torno de 2000 vezes.

Figura 44 - Micrografia obtida através do microscópio óptico



Fonte: Relatório de ensaio nº 35927 – ABCP

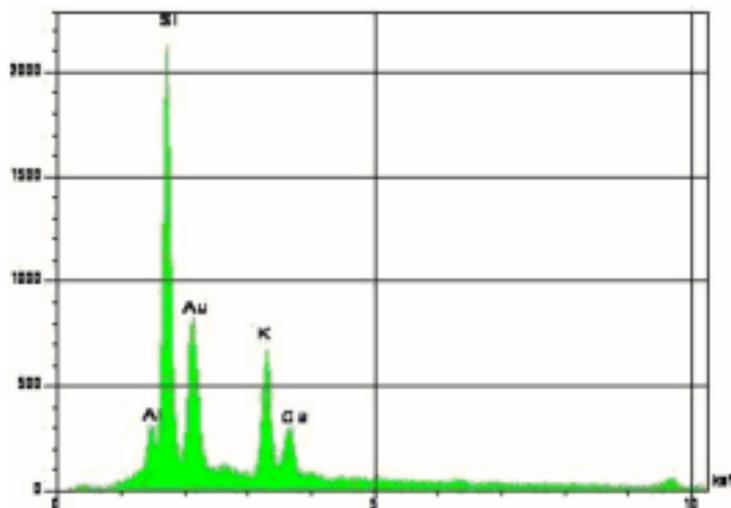
3.1.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) além de um maior detalhamento, permite outra ferramenta associada, a microanálise química. Ou seja, pode melhor detalhar a microtextura do concreto utilizado na obra e caracterizar a ocorrência da RAA através de seus produtos constituintes.

Com ela é possível escolher um ponto específico do objeto e obter sua composição química (figura 43). Através do MEV é possível visualizar melhor a interface pasta-agregado. A visualização das amostras via microscópio estereoscópico ou MEV tem o intuito de identificar o xerogel RAA nos poros do concreto e estruturas cristalinas (etringita, monossulfatos e silicatos hidratados), a etringita retardada, ou outro produto expansivo (figura 44). Caso se identifique fissuras sem esses componentes, é provável que sejam provenientes apenas de tensões térmicas.

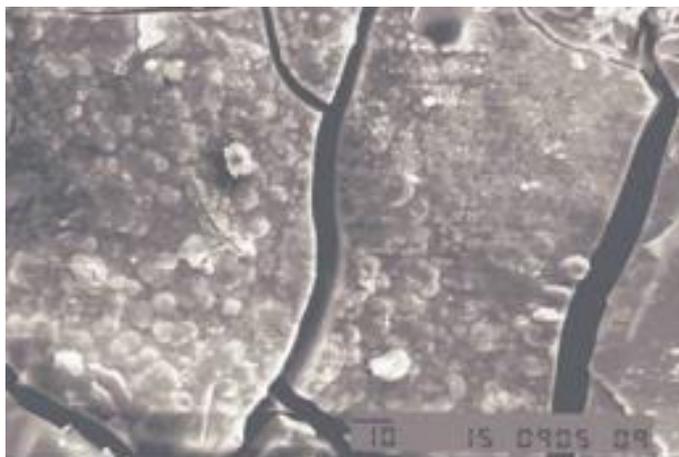
A norma ABNT NBR 15577-1 (2018) conceitua que reações álcali-agregado que mais se desenvolvem são constituídas por sílica reativa do tipo: opala, tridimita, cristobalita, vidro vulcânico, entre outros.

Figura 45 - Gráfico obtido com o MEV, no qual se observa a composição aproximada dos cristais hidratados



Fonte: Relatório de ensaio nº 35927 – ABCP

Figura 46 - Aspecto de detalhamento do gel gretado resultantes da RAA.



Fonte: Relatório de ensaio nº 35927 – ABCP

A tabela 4 mostra os elementos químicos envolvidos nas reações deletérias atuantes no concreto e os ensaios usualmente empregados nos diagnósticos definitivos:

Tabela 4 - Elementos químicos em reações deletérias

	Patologia	RAS
ENSAIOS LABORATORIAIS	Visualização microscópica	Preenchimento dos poros, bordas de reação nos agregados
	Petrografia	Minerais reativos/Poros do concreto/fissurações em pasta e argamassa
	DRX	Verificação de compostos cristalinos presentes no gel.
	MEV/EDS	Confirmação morfológica e química do gel e outras estruturas nos poros e interface do concreto

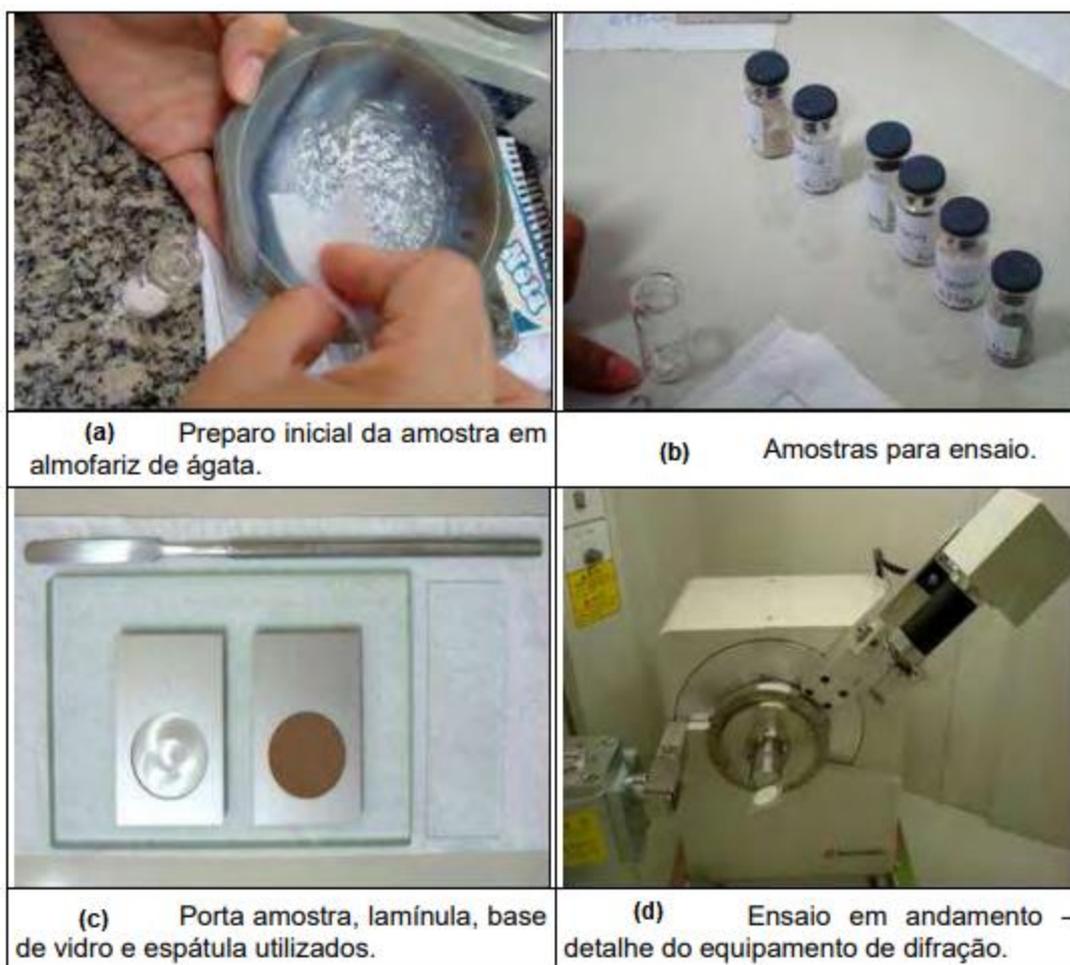
Fonte: MIZUMOTO (2009)

3.1.4.4 Difractometria de Raios x (DRX)

A análise de difratometria por raios X tem por objetivo a identificação das fases cristalinas dos constituintes dos materiais, tais como componentes minerais dos agregados e, nesse caso, principalmente a composição dos xerogéis do interior do concreto. Na análise por difração é possível determinar os compostos existentes nas amostras pela interpretação dos diagramas de difração, também chamados de difratogramas – construídos a partir dos dados de intensidade x ângulo de difração.

As amostras são preparadas em almofariz cerâmico (agregados) e de ágata (argamassa), separadas em frascos, identificadas e posteriormente acondicionadas no amostrador do equipamento, como mostra a figura 47.

Figura 47 - Preparo das amostras



Fonte: MIZUMOTO (2009)

É importante salientar que as análises difratométricas podem não identificar alguns compostos químicos destacados na literatura que participam diretamente da RAA, como, por exemplo, potássio e silício, que podem, possivelmente está na sua forma amorfa. Além disso, a sobreposição de diversas fases cristalinas presentes nestes materiais pode dificultar uma avaliação precisa dos demais compostos constituintes. Outros elementos comumente presentes na RAA são íons sódio, cálcio e alumínio, que também podem estar associados na fazer amorfa do xerogel.

O emprego do DRX na análise mineralógica das rochas também é utilizado para complementar as análises petrográficas, uma vez que esta técnica possibilita identificar a presença de grande parte dos minerais presentes na rocha e de difícil constatação na microscopia.

3.1.5 QUINTA ETAPA – Diagnóstico

Os ensaios microestruturais permitem uma visualização dos produtos da reação formados. A morfologia dos produtos da reação auxilia na confirmação da ocorrência da RAA em blocos de fundações de edifícios prontos, bem como a borda de reação entre o agregado e a argamassa. Para comprovar a presença da RAA é necessário ter como resultado minerais responsáveis por patologias expansivas tais como gel de álcali-silica, etringita ou gypsum.

A análise petrográfica segundo a ABNR NBR 15577-3 é a técnica qualitativa que permiti caracterizar os minerais presentes nas amostras e identificar seu grau de deformação e alteração na rocha, por isso é imprescindível no diagnóstico positivo da RAA. Através do MEV, pode-se constatar ou não a presença do gel da RAA onde os espectros devem mostrar os elementos químicos componentes predominantes no gel: silício, cálcio, sódio e potássio.

Na inspeção macroscópica e microscópica estereoscópica é importante analisar os aspectos de estrutura e de textura do concreto, como no processo de dosagem e adensamento. Pois o adensamento inadequado produz vazios de exsudação, e em termos de homogeneidade, deve-se verificar a distribuição dos agregados na argamassa.

A conclusão vai muito do profissional que irá analisar os resultados, pois nem sempre a RAA encontra-se tão evidente em todos os ensaios. Ou seja, o diagnóstico é considerado positivo das classes intermediária ou crítica, com a confirmação frente análise dos ensaios mencionados feita por um profissional capacitado. Não sendo necessariamente preciso, a confirmação em todos os resultados.

CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao aumento de casos de edificações residenciais e comerciais afetados pela RAA, torna pertinente o incentivo de soluções para facilitar a identificação e solução do problema. Por ser muito difícil estabelecer um padrão de danos e, com isso, diagnosticar rapidamente a degradação, demanda-se atualmente muito tempo e custo para os envolvidos.

A reação álcali-agregado é um acontecimento considerado recente se comparado com a história da humanidade, pois é uma descoberta há menos de um século. Muitos estudos tentam explicar o fenômeno e como lidar com esse fenômeno que afeta o mundo inteiro, porém, no meio científico, ainda se tem bastantes dúvidas e faltam metodologias oficiais para lidar com esse transtorno.

O presente estudo contempla uma sugestão de método para diagnóstico da RAA em elementos de fundação. Há muitos estudos a respeito, mas não se tem uma metodologia oficial com um passo a passo de como diagnosticá-la, acarretando assim, em custos onerosos ou problemas estruturais maiores futuramente.

Em relação à quantidade de escavações necessárias, é evidente que, por existirem diferentes graus da patologia, não é possível definir uma porcentagem exata para o diagnóstico, visto que, em casos mais severos é possível um resultado mais rapidamente, já o inverso também é possível. Porém, após analisar estudos passados, pode-se estimar que examinando dois blocos das fundações é provável obter um diagnóstico confiável.

Vale salientar que, como o objetivo desse estudo é propor um método de inspeção e diagnóstico seguro, econômico e eficiente para RAA em blocos de fundações em edifícios prontos, não foram abordados outros ensaios que envolvem durabilidade e segurança estrutura. Caso seja necessário, é importante executar ensaios complementares como absorção de água, resistência a compressão, à tração, frente de carbonatação etc. Apesar de, Andrade et al (2006) citarem em seu trabalho que a reação álcali-agregado pouco interfere na resistência à compressão do concreto, esta é feita com a finalidade de verificação apenas da segurança estrutural da edificação, afim de comparar com a resistência estipulada em projeto, sendo assim, por este motivo não foi abordada neste estudo.

Por existir uma variabilidade nas expansões para agregado de mesma litologia, a análise Petrográfica mostra-se útil na identificação de tais minerais potencialmente reativos na RAA. Vale salientar que ao analisar os agregados e a relação cimento/agregado, é importante observar a potencialidade de ser inócuo ou reativo. A utilização de ensaios combinados de avaliação mineralógica dos agregados

(petrografia/DRX/MEV) é imprescindível na condução de verificação da potencialidade reativa do agregado.

Em relação ao ponto de vista mineralógico, a presença de quartzo deformado ou microcristalino é um indicativo de que podem induzir reações expansivas do tipo álcali-silicato. Além disso, entende-se como evidências da presença da RAA:

- I. Presença de bordas de reação ao redor dos agregados graúdos;
- II. Presença de material esbranquiçado no contato entre agregado e argamassa;
- III. Presença de fissuração na argamassa e no agregado

Seguindo o protocolo estipulado, é provável que auxilie os profissionais na área de inspeção e recuperação, na assertividade do diagnóstico a um custo mais baixo, seguro, em menos tempo, quanto a presença ou não da RAA em blocos de fundações de edifícios prontos.

Medidas corretivas são temas para sugestões de trabalhos futuros, e para os casos de patologias pré-existentes. Deverão ser determinadas considerando as causas que originaram o problema, com o intuito de minimizá-las ou suprimi-las. Thomaz já em 1989 explica que, há casos em que apenas a recuperação do elemento trincado não é o suficiente, sendo necessário tratar a causa da fissura para que, recuperando o elemento, este não volte a fissurar.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e observações provenientes desta pesquisa, sugere-se:

- Validação do método proposto nessa dissertação;
- Medidas corretivas para o caso da RAA;
- Prevenção de blocos de fundações, ainda na construção, através de medidas preventivas na fabricação do concreto para minimizar os riscos da ocorrência da RAA.

REFERÊNCIAS

AMO, D. G.; PÉREZ, C. B. Diagnosis of the alkali-silica reactivity potential by means of digital image analysis of aggregate thin sections. *Cement and Concrete Research*, v 31, p1449-1454, 2001.

ANDRADE, T. W.; SILVA, J. J. R. Reação Álcali- Agregado. Recife: Edtado por SINDUSCON/PE e SEBRAE/PE, 2006.

ANDRADE, T. W. Curso sobre Reação Álcali - Agregado. Recife, 2007.

ANDRADE, T.; REGO SILVA, J. J.; HASPARYK, N. P.; SILVA, C. M. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e graúdos comercializados na Região Metropolitana do Recife. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBRACON, p.1-16, 2006a.

ANDRADE, C. Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras. Antonio Carmona & Paulo Helene (Trad.). São Paulo, PINI, 1992.

ANDRIOLO, F. R. AAR dams affected in Brazil - report on the current situation. In: International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, Quebec, 2000.

ARAÚJO, D, T., SOBRINHO, C, W, A, P., Blocos de Fundações de Edifícios Afetados por Reação Alcalis-Agregado (RAA): Estudo de Caso, *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, 2016.

ARNAUD, I. R. L. Patologia prematura de blocos de fundação de edificação residencial de múltiplos pavimentos em ambiente urbano. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba, 2010.

ARRAIS, M. S. M. C. Reação álcali-silicato: avaliação do comportamento de agregados graúdos da região metropolitana do recife frente a diferentes tipos de cimento. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1: Agregados – RAA – Guia para avaliação. 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 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7680-1: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.

ÁVILA, J. I. S. L. Projeto de recuperação estrutural da ponte Paulo Guerra - Recife/PE. Relatório Técnico N.01 - EST/99. FADE, Recife, 1999.

BERENQUER, R, A., TIBÉRIO ANDRADE., HELENE, Paulo., ELIANA C.B. RAA em estrutura de concreto armado de uma edificação residencial. Concreto & Construções, Setembro, 2016.

CAVALLI, A. F.; DOTAF, T. S. Avaliação da degradação do concreto devido à contaminação das águas por esgoto doméstico. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Patologias nas Obras Civis) – Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba, 2008.

CITY OF GREENSBORO, 2014. Disponível em: < <http://www.greensboro-nc.gov/index.aspx?page=2303> >. Acesso em: 22 out. 2020.

COUTO, T.A. Reação Álcali-agregado Estudo do Fenômeno em Rochas Silicosas. Goiânia, 2008. Disponível em: < <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3166> > Acesso em: 20 dez. 2020.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. Diagnosis and assessment of concrete structures. State of the art report. Boletim 192. Lausanne: CEB, 1989.

CORSINI, R. Trinca ou Fissura? TÉCNICA. Disponível: <http://techne17.pini.com.br/>. Acesso em: 10 dez. 2020.

DAHER, Cesar Henrique Sato. Avaliação do grau de influência de parâmetros de contorno no ensaio de reatividade potencial álcali-agregado pelo método acelerado. UFPR, Curitiba, 2009

DENT GLASSER, L. S. E KATAOKA, N. The chemistry of alkali-aggregate reaction. Cement and concrete research, 1981.

FARNY, J. A. e KOSMATKA, S. H. Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete. Concrete Information Series, 1997.

GITAHY, H. S. Reação Álcali-Sílica. Mecanismo, diagnóstico e medidas preventivas. São Paulo, 1982.

GOMES, E. A. O. Recuperação estrutural de blocos de fundação afetados pela reação álcali-agregado - a experiência do Recife. 2008

GOMES NETO, D. P., BARRETO, L. S. Uma discussão sobre a reação álcali-agregado (RAA), seu mecanismo e fatores que a influenciam. João Pessoa-PB, 2013

GUSMÃO, A. D. ; TEIXEIRA, D. C. L. ; ANDRADE FILHO, J. C. ; VITORIO, J. A. P. ; OLIVEIRA, R. A. . Laudo Técnico sobre as Causas do Desabamento do Edf. Areia Branca. 2005.

FIGUEIROAA, J. P.; ANDRADE, T. W. O ataque da Reação Álcali - Agregado sobre estruturas de concreto. Recife: Editora Universitária, UFPE, 2007.

FOURNIER, Benoit; CHEVRIER, Ray; GROSBOIS, Marie de; LISELLA, Rino; FOLLIARD, Kevin; IDEKER, Joson; SHEHATAD, Medhat; THOMAS, Mike; BAXTER, Steve. The Accelerated Concrete Prism Test (60°C): Variability of the test method and proposed expansion limits. Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, 2004

HASPARYK, N. P. Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado, 2005.

HASPARYK, N.P. Reação Álcali-Agregado no Concreto. In: ISAIA, G. C. Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011.

HELENE, Paulo & PEREIRA, Fernanda (Ed.). Rehabilitación y Mantenimiento de Estructuras de Concreto. Bogotá, Colombia, SIKA, 2007.

HELENE, P.; CORREIA, J.; ANDRADE, T.; CRUZ NETO, J.; ARAÚJO, J.; PEREIRA, F.; LACERDA, C.; MARTORELLI, S.; OLIVEIRA, M. Relatório Técnico - Inspeção e Diagnóstico dos Apoios e dos Blocos de Fundação da Ponte Governador Paulo Guerra - TECOMAT, Tecnologia da Construção e Materiais Ltda. Recife, 2002.

HOOBS, D.W. Alkali-silica reaction in concrete. London: Thomas Telford, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA DE SÃO PAULO – IBAPE/SP. Inspeção Predial “a Saúde dos Edifícios”, São Paulo, 2015.

IBRACON (Instituto Brasileiro do concreto) e CBGB (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. Reações álcalis-agregado em estruturas de concreto. Levantamento de estruturas hidráulicas afetadas pela RAA no mundo. São Paulo, 1998.

JENSEN, V. Alkali-silica reaction damage to Elgeseter Bridge, Trondheim, Norway, 2004.

KIHARA, Y; SCANDIUZZI, L. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, São Paulo, 1993.

Lapa, J.S. Patologia, Recuperação e Reparo das Estruturas de Concreto. Escola de Engenharia da UFMG. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

LIMA, Renilda B. S.; SILVA, Antonio S. R.; COSTA, Fernanda N. Reação Álcali Agregado E Seus Efeitos Na Construção De Edifícios. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica do Salvador, Salvador, 2009.

LOPES, L. E. Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação a barragem de concreto, Rio de Janeiro, 2004.

MALISKA, A. M. Microscopia Eletrônica de Varredura. Florianópolis: LCMAI Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens, UFSC, Santa Catarina, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto - estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ed. IBRACON, 2008.

MIZUMOTO, C. Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em Testemunhos de Concreto e Agregados Constituintes, São Paulo, 2009.

MUÑOZ, A. H. Evaluación de patologías en estructuras de concreto. 21 p. In: Seminário Evaluación y Diagnóstico de Las Estructuras en Concreto. Bogotá, Noviembre de 2001.

MOREIRA, C Daniele. ESTUDO DE CASO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM UMA RESIDÊNCIA TÉRREA NA CIDADE DE PAIÇANDU – PR, Maringá, PR 2018.

NATESAIYER, K. C; HOVER, L. C. Insitu identification of ASR products in concrete. Cement and Concrete Research, Oxford, 1988.

NEVES, José Miguel Marinho. Reaccções álcalis-sílica e resistência aos sulfatos em betão – ensaios. Universidade do Porto, Portugal, 2010.

NOGUEIRA, Kelso A. Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia UFMG, Belo Horizonte, 2010.

OBERHOLSTER, R. E., DAVIES, G. An accelerated method for testing the potential alkali-reactivity of siliceous aggregate. *Cement and Concrete Research*. 1986

OLLIVIER, J, P.; Vichot A. Durabilidade do Concreto. Versão em português de 2014 da edição de 2008. Ibracon

PECCHIO, M.; KIHARA Y.; BATTAGIN A. F.; ANDRADE T. Produtos da Reação ÁlcaliSilicato em Concretos de Edificações da Região do Grande Recife - PE. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006.

PIRES SOBRINHO, C. W. A. Blocos de fundações de edifício afetados por RAA- Estudo de caso, Ibracon, 2012.

POWERS, L. J. Developments in alkali-silica gel detection. Concrete Technology Today Newsletter, Illinois, 1999.

POOLE, A.B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In: SWAMY, R. M. (Ed.). The Alkali-aggregate reaction in concrete. *New York: Taylor & Francis Elibrary*, 2003

SANCHEZ, Leandro. F. M. Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregados em concretos, São Paulo, 2008.

SANTOS, M. B. O panorama nacional sobre as reações álcalis-sílica em betões. Setembro, 2008.

STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. In: Proceedings of American Society of Civil Engineers. December, 1940.

SILVA, A, G. Recuperação de blocos de coroamento afetados pela reação álcali-agregado, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, 2007.

SILVA, S, C. Levantamento dos procedimentos de recuperações em elementos de fundações por problemas de reação álcali agregado - estudos de casos, (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, 2019.

SILVA, P. N. Reação álcali-agregado nas usinas do complexo Paulo Afonso/CHESF. Influência da reação nas propriedades do concreto, 2007.

TIECHER, F. Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

Tutikian, B & Pacheco, M. Inspección, Diagnóstico y Prognóstico en la Construcción Civil - Boletín Técnico. ALCONPAT, México, 2013.

VALDUGA, Laila. Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 2002.

VAN AARDT, J.H.P.; VISSER, S. Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions. Cement and Concrete Research. 1997

VEIGA, F.N.; GONÇALVES, I.N.; HASPARYK, N.O. Microscopia eletrônica de varredura de géis provenientes de usinas hidroelétricas. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, Goiânia, 1997.

VIDAL, E. C. Avaliação de Patologias em Conjuntos Habitacionais de Bauru, com enfoque em anomalias de Fundações e Coberturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.