



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO.
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CÍVIL

CRISTIANE SANTANA DA SILVA

**LEVANTAMENTO DOS PROCEDIMENTOS DE RECUPERAÇÕES EM
ELEMENTOS DE FUNDAÇÕES POR PROBLEMAS DE REAÇÃO
ÁLCALI AGREGADO – ESTUDOS DE CASOS**

Recife, 2019



CRISTIANE SANTANA DA SILVA

**LEVANTAMENTO DOS PROCEDIMENTOS DE RECUPERAÇÕES EM
ELEMENTOS DE FUNDAÇÕES POR PROBLEMAS DE REAÇÃO
ÁLCALI AGREGADO – ESTUDOS DE CASOS**

Dissertação apresentada a Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial, exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Engenharia das Construções, orientada pelos professores Eliana Barreto e Tibério Andrade.

Recife, 2019

TERMO DE APROVAÇÃO
CRISTIANE SANTANA DA SILVA

**LEVANTAMENTO DOS PROCEDIMENTOS DE RECUPERAÇÕES EM
ELEMENTOS DE FUNDAÇÕES POR PROBLEMAS DE REAÇÃO ÁLCALI
AGREGADO – ESTUDOS DE CASOS**

Dissertação apresentada a Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial, exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Engenharia das Construções, orientada pelos professores Eliana Barreto e Tibério Andrade.

Aprovada por:

Prof.(a) Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
(Orientadora – UNICAP)

Prof. Dr. Tibério Wanderley Correia Oliveira de Andrade
(Co-Orientador – UFPE)

Prof. Dr. Ângelo Just Costa e Silva – UNICAP - Avaliador Interno

Prof. Dr. João Manoel de Freitas Mota – IFPE - Avaliador Externo

Prof. Dr. Pedro Castro Borges – CINVESTAV - Avaliador Externo

Recife, 23 de outubro de 2019.

*A Deus pela vida, a Nossa Senhora e Santa Rita
minhas eternas mentoras, a minha mãe Sônia
Santana pela existência, a minha irmã Rosiane e
minha sobrinha Marília pela força, a minha filha
Beatriz Santana pela Luz, que me trouxe até aqui!!*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Eliana Monteiro, minha orientadora que abraçou a proposta deste trabalho, orientando e conduzindo esta pesquisa na busca por melhores resultados.

Meus sinceros agradecimentos a Dulce Collier pelas permissões, sem elas não teria começado e concluído, e pelas palavras de apoio durante a trajetória deste mestrado, muito grata por tudo.

A meus tios Ana Teotônio e João Santana pelos incentivos e pela ajuda. Serei eternamente grata.

A Ângelo Just e Tibério Andrade pelo apoio e incentivo e por estarem sempre ao meu lado desde do curso de Especialização. Serão sempre meus espelhos em coerência, competência e respeito ao próximo.

A Maria das Neves pelas observações e correções do trabalho escrito e a Ana Carolina Batalha pelas orientações e organizações no layout do trabalho, muito obrigada.

A Jatobeton, na pessoa de Aguinaldo Paraíso que permitiu não só o início das entrevistas, assim como contactou outras empresas, abrindo caminhos para dar continuidade a pesquisa. E Américo que gentilmente colocou-se a disposição durante a coleta dos dados.

A Concrepoxi através de Victor Tavares P. de Melo respondendo a pesquisa e descrevendo várias situações relacionadas a recuperações estruturais relacionadas a experiência de sua empresa, mas que contribuiu para conhecimentos concernentes a área de recuperações.

A Sesesp na pessoa de Michel Perboar que contribuiu não só com a pesquisa, mas ao longo de todo o trabalho, possibilitando o esclarecimento de procedimentos e materiais referentes a recuperações.

A Betonpoxi na pessoa de Celestino Soares na permissão das entrevistas e de Paulo Henrique colocando-se à disposição na coleta dos dados.

A Petrus Engenharia a Luiz Fernando e Everton Neves pelos vários dias na busca por materiais e pelas informações bastante relevantes para o trabalho.

A Fernando Buonora no fornecimento de materiais do seu acervo de recuperações, pelas palavras acolhedoras para continuidade deste trabalho, a Fernando Xavier pelos conselhos e a Almir Braga pela incansável força para iniciar e concluir o mestrado.

A PROSUSP/CAPES pelo apoio financeiro, sem ele, não teria conseguido.

SILVA, C.S. **Levantamento dos Procedimentos de Recuperações em Elementos de Fundações por Problemas de Reação Álcali Agregado – Estudos de Casos.** Recife, 2019. 117 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife.

RESUMO

A Reação Álcali Agregado (RAA) é uma reação química que ocorre entre os álcalis, normalmente provenientes do cimento e o agregado reativo, que na presença da água expande causando uma deterioração progressiva no elemento do concreto podendo levá-lo a perda de sua estabilidade. Essa Reação é bastante conhecida pelo meio técnico e na Região Metropolitana do Recife (RMR), com vários casos de fundações que foram atingidas e recuperadas. Assim, observou-se a importância e necessidade de realizar um levantamento nos procedimentos de recuperações em elementos das fundações por problemas da Reação, compreendendo os estudos de casos em cinquenta fundações reabilitadas. Aplicou-se metodologicamente um questionário semi estruturado com dezessete perguntas, com objetivo de traçar um perfil dos processos de recuperações utilizados nas fundações dos edifícios acometidos pela RAA, bem como uma consulta e análise ao acervo técnico de algumas empresas fiscalizadoras ou executoras de recuperações nas fundações de edificações da RMR. Esses resultados possibilitaram traçar um perfil das fundações, estabelecendo as semelhanças das fundações afetadas e determinando fatores influenciadores. Também conhecendo os avanços acerca dos materiais e processos aplicados na recuperação dos elementos e os fatores condicionantes para utilização da armadura de contenção. Ainda identificaram-se as fundações que após serem recuperadas deixaram uma janela de inspeção para posteriores verificações. Detalhe de extrema importância para o acompanhamento destas fundações.

Palavras chave: Reação Álcali Agregado, Levantamento, Fundações, Recuperadas.

ABSTRACT

The Aggregate Alkali Reaction (RAA), a chemical reaction that occurs between alkalis, usually coming from cement and the reactive aggregate, which in the presence of water expands causing a progressive deterioration in the concrete element which may lead to its loss of stability. This reaction is well known in the technical field and in the Metropolitan Region of Recife (RMR), with several cases of foundations that were reached and recovered. Thus, it was observed the importance and necessity to carry out a survey in the recovery procedures in elements of the foundations due to Reaction problems, including the case studies in fifty rehabilitated foundations. A semi-structured questionnaire with seventeen questions was applied methodologically to draw a profile of the recovery processes used in the foundations of buildings affected by the RAA, as well as to consult and analyze the technical collection of some supervisory companies or performers of recoveries in the foundations of RMR buildings. These results allowed us to draw a profile of the foundations, establishing the similarities of the foundations affected and determining influencing factors. Also knowing the advances about the materials and processes applied in the recovery of the elements and the conditioning factors for the use of the containment reinforcement. Also found were foundations that, after being restored, left an inspection window for further verification. This detail is extremely important for the monitoring of these foundations.

Keywords: Alkali Aggregate Reaction, Survey, Foundations, Recovered.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – BLOCO FISSURADO PELA RAA.....	15
FIGURA 02 – PONTE PAULO GUERRA.....	22
FIGURA 03 – PONTE PAULO GUERRA DURANTE A RECUPERAÇÃO.....	22
FIGURA 04 – ELEMENTOS CONSTITUÍNTES DA REAÇÃO.....	26
FIGURA 05 – CINÉTICA DA REAÇÃO DO Na.....	29
FIGURA 06 – CINÉTICA DA REAÇÃO DO K.....	30
FIGURA 07 – BLOCO EM PROCESSO DE RECUPERAÇÃO.....	50
FIGURA 08 – PERCENTUAIS DE FALHAS.....	51
FIGURA 09 – PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO.....	53
FIGURA 10 – DETALHAMENTO DAS CAUSAS INTRÍNSECAS.....	53
FIGURA 11 – CAUSAS INTRÍNSECAS POR FALTA DE MANUTENÇÃO.....	54
FIGURA 12 – DETALHAMENTO DAS CAUSAS EXTRÍNSECAS.....	55
FIGURA 13 – LEI DE SITTER.....	56
FIGURA 14 – BLOCO COM FISSURAS DA RAA.....	58
FIGURA 15 – METODOLOGIA APLICADA.....	60
FIGURA 16 – BLOCO COM PURGADORES.....	64
FIGURA 17 – COMPOSIÇÃO DO QUESTIONÁRIO.....	66
FIGURA 18 – FINALIDADE DO EMPEENDIMENTO.....	67
FIGURA 19 – NÚMERO DE PAVIMENTOS.....	68
FIGURA 20 – NÍVEIS DOS LENÇÓIS ENCONTRADOS NA Z ENGENHARIA.....	70
FIGURA 21 – NÍVEIS DOS LENÇÓIS ENCONTRADOS NA X ENGENHARIA.....	70
FIGURA 22 – SAPATA SENDO RECUPERADA COM ARMADURA.....	71

FIGURA 23 – NÍVEIS DOS LENÇÓIS ENCONTRADOS NA A ENGENHARIA	72
FIGURA 24 – NÍVEIS DOS LENÇÓIS ENCONTRADOS NA Y ENGENHARIA	72
FIGURA 25 – NÍVEIS DOS LENÇÓIS ENCONTRADOS NA T ENGENHARIA	73
FIGURA 26 – IDADES DAS CONSTRUÇÕES PRESENTES NA PESQUISA.....	75
FIGURA 27 – CLASSIFICAÇÃO DAS FISSURAS	76
FIGURA 28 – BLOCO AFETADO PELA RAA	77
FIGURA 29 – TIPOS DE FUNDAÇÕES.....	79
FIGURA 30 – AFERIÇÃO DAS ESPESSURAS DAS FISSURAS.....	80
FIGURA 31 – FISSURAÇÃO DO BLOCO.....	80
FIGURA 32 – FISSURAS EM MAPA	82
FIGURA 33 – DIAGNÓSTICO.....	85
FIGURA 34 e 35 – DEMOLIÇÃO DE PISO E ESCAVAÇÃO	88
FIGURA 36 – BLOCO COM IDENTIFICAÇÃO DAS FISSURAS	89
FIGURA 37 – BLOCO APICADO	90
FIGURA 38 – BLOCO COLMATADO COM PURGADORES PLÁSTICOS.....	91
FIGURA 39 – PURGADOR METÁLICO.....	92
FIGURA 40 – PREPARAÇÃO PARA INJEÇÃO	93
FIGURA 41 – ARMAÇÃO DO BLOCO	94
FIGURA 42 – CONCRETAGEM DO BLOCO.....	95
FIGURA 43 – FCK'S DOS CONCRETOS	96
FIGURA 44 – MATERIAIS DAS INJEÇÕES	98
FIGURA 45 – PROCESSO DE INJEÇÃO	99
FIGURA 46 – USO DE ARMADURA - ENCAMISAMENTO	100
FIGURA 47 – BLOCO IMPERMEABILIZADO	101

FIGURA 48 – INTERIOR DA JANELA DE INSPEÇÃO.....	104
FIGURA 49 – JANELA DE INSPEÇÃO.....	104

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 – ESTRUTURAS HIDRAÚLICAS AFETADAS PELA RAA	20
QUADRO 02 – MINERAIS REATIVOS E SEUS CONSTITUINTES	33
QUADRO 03 – COMPOSIÇÕES DO CIMENTO PORTLAND	40
QUADRO 04 – CLASSE DE RESISTÊNCIA E NORMAS DO CIMENTO	41
QUADRO 05 – EMPRESAS PARTICIPANTES DA PESQUISA	63
QUADRO 06 – QUESTIONÁRIO UTILIZADO NA PESQUISA	65
QUADRO 07 – NÍVEIS DOS LENÇÓIS ENCONTRADOS.....	74
QUADRO 08 – CUSTOS DAS RECUPERAÇÕES.	103

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA	14
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	18

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICOS DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO	19
2.2 CONCEITOS BÁSICOS	25
2.2.1 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO	27
2.2.1.1 REAÇÃO ÁLCALI SÍLICA (RAS)	27
2.2.1.2 REAÇÃO ÁLCALI SÍLICATO (RASS)	27
2.2.1.3 REAÇÃO ÁLCALI CARBONATO (RAC)	28
2.3 MECANISMOS DA REAÇÃO	28
2.4 FATORES INDUTORES DA REAÇÃO	30
2.4.1 ÁLCALIS DO CIMENTO	30
2.4.2 AGREGADO POTENCIALMENTE REATIVO	31
2.4.3 TEOR DE UMIDADE SUFICIENTE	33
2.4.4 TEMPERATURA	35
2.4.5 UMIDADE RELATIVA.....	35

2.4.6 TEMPO	35
2.5 COMPORTAMENTOS DAS ESTRUTURAS AFETADAS	36
2.5.1 TENSÃO DE CONFINAMENTO	37
2.6 MEDIDAS MITIGADORAS	37
2.6.1 MEDIDAS PREVENTIVAS	37
2.6.2 AVALIAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO E MIÚDO	38
2.6.3 ADIÇÕES AO CIMENTO.....	39
2.6.3.1 TIPOS DE CIMENTOS NO BRASIL	40
2.6.3.1.1 CIMENTO PORTLAND CP I E CP I –S	41
2.6.3.1.2 CIMENTO PORTLAND CP II E – Z – F	42
2.6.3.1.3 CIMENTO PORTLAND CP III	43
2.6.3.1.4 CIMENTO PORTLAND CP IV	44
2.6.3.1.5 CIMENTO PORTLAND CP V – ARI	44
2.6.4 ADIÇÕES MINERAIS	45
2.6.4.1 ESCÓRIA DE ALTO FORNO	46
2.6.4.2 CINZAS VOLANTES	46
2.6.4.3 POZOLANAS	47
2.6.4.3.1 METACAULIM	48
2.6.4.3.2 SÍLICA ATIVA	48
2.7 MEDIDAS ADOTADAS NAS RECUPERAÇÕES DAS FUNDAÇÕES	49
2.8 RECUPERAÇÕES E REPAROS	50
2.8.1 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS.....	50
2.8.2 CAUSAS.....	52
2.8.2.1 CAUSAS INTRÍNSECAS.....	53

2.8.2.2 CAUSAS EXTRÍNSECAS	54
2.8.3 CONSEQUÊNCIAS	55
2.8.3.1 PROJETOS	57
2.8.3.2 EXECUÇÃO	57
2.8.3.3 MANUTENÇÃO PREVENTIVA	57
2.8.3.4 MANUTENÇÃO CORRETIVA.....	57

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	59
3.2 METODOLOGIA	60
3.2.1 TRANSCRIÇÃO DAS ENTREVISTAS	61
3.2.2 COLETAS DE DADOS	61
3.2.3 APLICAÇÃO DO QUESTIONÁRIO	63
3.2.4 VERIFICAÇÃO DOS DADOS	63
3.2.5 DISCURSÕES	64

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISES DE DADOS	66
4.1.2 CARACTERÍSTICAS DAS EDIFICAÇÕES	66
4.1.2.1 FINALIDADE DO EMPREENDIMENTO	67
4.1.2.2 NÚMERO DE PAVIMENTOS	67
4.1.2.3 ALTURA DO LENÇOL FREÁTICO	68
4.1.2.4 IDADE DA EDIFICAÇÃO	74
4.1.2.5 DESCOBERTA DA MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA E OS SINTOMAS	

ENCONTRADOS	75
4.1.2.6 DISTÂNCIA DO MAR PARA A EDIFICAÇÃO	77
4.1.2.7 TIPO DE FUNDAÇÃO	78
4.2 DIAGNÓSTICO	81
4.2.1 LOCAL DA INCIDÊNCIA DAS FISSURAS NA EDIFICAÇÃO	83
4.2.2 COMO FOI DIAGNOSTICA A PATOLOGIA.....	83
4.2.3 ENSAIOS EXECUTADOS NA DETERMINAÇÃO DA PATOLOGIA	86
4.3 PROCEDIMENTOS DAS RECUPERAÇÕES	86
4.3.1 ETAPAS SEGUIDAS NO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO	87
4.3.2 PREENCHIMENTOS DAS FISSURAS E MATERIAIS UTILIZADOS	96
4.3.3 ENCAMISAMENTO E O CÁLCULO DO REFORÇO	99
4.4 IMPERMEABILIZAÇÃO	101
4.5 CUSTOS DAS RECUPERAÇÕES	102
4.5.1 JANELA DE INSPEÇÃO	104

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES	105
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109

REFERÊNCIAS

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA

O concreto é um dos materiais mais utilizados na cadeia construtiva. No Brasil a sua utilização inicia-se em 1909, quando o primeiro edifício em concreto armado foi construído em São Paulo. No século XX, nas primeiras décadas, as obras de Saturnino de Brito relativas ao saneamento básico despontaram na cidade de Santos/SP e, com o passar dos anos, projetaram-se pontes, como a Maurício de Nassau, em Recife/PE, e em todo o país foram sendo construídos vários edifícios, rodovias e diversas edificações, consolidando o uso do concreto.

Inúmeras características conferem ao concreto o título de material de construção mais usado na engenharia Civil, desde a facilidade com que os elementos podem ser executados, a variedade de formas e tamanhos, seu baixo custo e maior disponibilidade no canteiro, comparativamente a outros materiais. O concreto é tão indubitavelmente versátil, que há muito tempo vem sendo chamado de "material universal" (VALDUGA, 2002).

No início da década de quarenta a comunidade científica deparou-se com uma "doença" que acometeu as grandes estruturas de concreto, uma reação lenta e progressiva que se desenvolvia através de um processo químico entre os hidróxidos alcalinos, presentes nas soluções existentes nos poros da pasta do concreto e alguns minerais reativos encontrados em certos tipos de agregados, em presença da água. A Reação Álcali Agregado, mais conhecida com RAA, é uma reação química de longa duração e deletéria, que podia resultar na formação de um gel expansivo, induzindo o elemento de concreto à formação de fissuras e lascas, e como consequência a perda de sua durabilidade e outras propriedades.

Segundo Neville (2016), a perda de durabilidade do concreto se manifesta pela sua deterioração, que pode acontecer tanto de fatores externos quanto internos, sendo essas reações de origem física, química ou mecânica. Segundo o autor, danos mecânicos são os resultantes de impactos, erosão, abrasão entre outros, já as causas químicas são relacionadas a reações cimento/agregado, como as reações Álcali-Sílica e Álcali-Carbonato, e relacionadas a ataques químicos

externos em meios agressivos, como cloretos e sulfatos. Estas ações deletérias podem ser diretas ou indiretas. As causas físicas são os efeitos das altas temperaturas, e os diferentes coeficientes de dilatação térmica dos agregados e da pasta de cimento endurecida. É importante ressaltar que os processos de deterioração química e física podem acontecer em conjunto.

No Brasil os pioneiros estudiosos acerca da reação foram Heraldo de Souza Gitahy e Murilo Dondici Ruiz, em 1963, através do instituto de Pesquisas Tecnológicas em São Paulo (IPT), relataram as reações da RAA, seu comportamento, os materiais envolvidos e ações mitigadoras, destinadas as Centrais Elétricas de Urupungá.

Apesar de todas as descobertas científicas e o firme propósito de aprimorar e consolidar os estudos sobre o concreto, os problemas relacionados ao envelhecimento das estruturas, atrelados à falta de manutenção e ao incipiente conhecimento de algumas patologias, a exemplo da Reação Álcali Agregado (RAA), responsáveis por vultuosas somas em suas recuperações, vêm trazendo muitas incertezas sobre os resultados e a durabilidade destas intervenções. A Figura 01 demonstra o efeito causado pela reação mencionada em um bloco de fundação.

Figura 01: Bloco fissurado pela RAA



Fonte: Autora, 2019.

A constatação da Reação Álcali Agregado em obras de edifícios foi verificada pela primeira vez na Região Metropolitana do Recife (RMR), estado de Pernambuco, devido ao interesse gerado na inspeção das fundações de diversos edifícios habitacionais, após a queda do Areia Branca em 2004. Cumpre esclarecer que as causas do desabamento do Edifício Areia Branca foram devidamente apuradas e nada se constatou que pudesse apontar a RAA como causa do episódio. No entanto, a inspeção das fundações de diversos edifícios naquela região, permitiu a verificação e constatação da existência de muitos casos onde houve fissuração dos blocos de coroamento de estacas ou de sapatas. A análise apurada dessas ocorrências por especialistas, a partir de testemunhos de concreto extraídos dos elementos de fundação, mostrou realmente tratar-se de Reação Álcali Agregado, tendo, por exemplo, os laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) estudado mais de 60 casos (BATTAGIN, 2016).

A química da Reação Álcali Agregado não é completamente conhecida. Suas consequências, sim! A grande lacuna no conhecimento é não ser possível determinar o estágio no qual se encontra a expansão e quando ela terminará. Se conhecêssemos a fundo a reação, talvez, conseguiríamos determinar o estágio atual da expansão e quando ela terminaria. Por outro lado, conhecemos perfeitamente como evitar a RAA e como detectar se um concreto tem ou não RAA. Do ponto de vista da engenharia, o importante é saber como evitar. Basta adicionar uma certa quantidade de escória ou de pozolana, materiais que inibem a reação. Para saber a quantidade necessária para inibir a expansão é preciso fazer testes (PAULON, 2016).

Diante deste cenário o presente trabalho, apresenta o resultado da pesquisa de coleta de dados executada nas principais empresas de recuperação de estrutura na Região Metropolitana do Recife (RMR) com o propósito de traçar um perfil historiando as características construtivas do empreendimento, os procedimentos utilizados na intervenção e materiais aplicados nas recuperações.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Como objetivo geral tem-se a necessidade de traçar um perfil dos processos de recuperação utilizados nas 50 fundações dos edifícios acometidos pela RAA, assim como discutir as técnicas utilizadas para os procedimentos de reabilitação de elementos das referidas fundações. Através da consulta e análise ao acervo técnico de algumas empresas fiscalizadoras ou executoras de recuperações das fundações de edificações da Região Metropolitana do Recife (RMR).

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Traçar um perfil das fundações afetadas;
- b. Estabelecer as semelhanças das fundações afetadas e determinar fatores influenciadores;
- c. Demonstrar os avanços acerca dos materiais e processos aplicados na recuperação dos elementos afetados;
- d. Demonstrar os fatores condicionantes para utilização da armadura de contenção;
- e. Identificar as fundações que passaram por recuperações e possui uma janela de inspeção para possíveis verificações posteriores.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, ordenado da seguinte forma:

O segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica e os subitens, um breve histórico da RAA, conceitos básicos, tipos da reação e seus mecanismos. Contemplando o processo e os fatores indutores da Reação, demonstrando quais os principais elementos responsáveis para o aparecimento da reação e comportamento das estruturas afetadas. Conjuntamente foram apresentados as recuperações e

reparos, as causas das manifestações patológicas intrínsecas e extrínsecas, suas consequências, as manutenções preventivas e corretivas.

No terceiro capítulo, intitulado de Metodologia descreve-se as considerações iniciais. Apresenta-se o questionário com 17 perguntas aplicadas nas entrevistas, mencionando como foi realizada a coleta de dados e as empresas que participaram da pesquisa.

O quarto capítulo descreve o estudo de caso, apresentando o resultado e as conclusões em empresas que executaram as recuperações em edificações comerciais e residências, na Região Metropolitana do Recife e circunvizinhanças, afetados pela RAA.

O quinto capítulo com a sintetização do material proposto e observações da autora com sugestões para futuros trabalhos.

1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Essa pesquisa limita-se a expor os resultados de estudos de casos em fundações acometidas pela Reação Álcali Agregado, informando os avanços, fatores condicionantes e os custos relacionados. Não estando em julgamento os procedimentos e técnicas executados, assim como os materiais utilizados nos processos de recuperações. O objetivo principal é constatar como estão as recuperações executadas desde 2004 até os dias atuais.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICOS DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO

Na década de 30 Thomas Edson Stanton pesquisou sobre os primeiros relatos concernentes a reação Álcali Agregado (RAA), eram anomalias em pavimentos de concretos numa rodovia na Califórnia (USA). O processo fissuratório em algumas estruturas rodoviárias passou a ser acompanhando pela Seção de Laboratório de Materiais, chefiada por Thomas, conferindo-lhe o conhecimento pioneiro sobre as causas das expansões à reação Álcali-sílica, conforme publicado no artigo “Influence of Cement and Aggregate on Concrete Expansion” em fevereiro de 1940.

No Brasil os primeiros estudos foram iniciados em 1963 por Heraldo Souza Githay sobre a reação Álcali Agregado, há 56 anos, sob orientação de Roy Carlson, um engenheiro consultor californiano, participante da equipe de pesquisas brasileira. Foram divulgados relatórios sobre a reação, seu comportamento e medidas mitigadoras, destinados às Centrais Elétricas de Urupungá, posteriormente Companhia Energética de São Paulo (CESP), e referentes aos trabalhos de construção da Usina Hidrelétrica de Jupia no rio Paraná, no estado do Paraná.

Na época achava-se que a reação era predominante em construções com grandes massas de concreto, em contato permanente com a água, tais como barragens e demais obras hidráulicas. Relatos de casos sobre a RAA em fundações e superestruturas de pontes e viadutos, pavimentos de concreto e construções de diversos tamanhos, foram diagnosticados em vários países ao redor do mundo como: Argentina, Canadá, China, Dinamarca, Índia, Islândia, Japão, Nova Zelândia, entre outros.

Com o passar dos anos várias recuperações foram executadas, em diferentes partes do Brasil, com intensidades de reações variáveis e um quadro com elevada taxa de expansão no concreto. No Quadro 01 relatam-se 29 estruturas hidráulicas de usinas e barragens recuperadas com a patologia, informando o ano de sua construção, o ano da descoberta da RAA e o mineral reativo, encontrado na composição de seus concretos.

Quadro 01: Estruturas hidráulicas afetadas pela RAA

ESTRUTURAS HIDRÁULICAS AFETADAS PELA REAÇÃO			
ESTRUTURA	ANO DA CONSTRUÇÃO	ANO DA DESCOBERTA DA RAA	LITOLOGIA
Barragem Atibainha	1973	1992	Bitotita gnaiss cataclástico
Barragem Cascata	1976	1992	Granito - gnaiss
Barragem Pedras	1970	1990	Quartzito
Barragem Pirapora	1956	1998	-
Barragem Joanes II	1971	1994	Gnaiss
Barragem Paiva de Castro	1972	1992	Bitotita Granito - gnaiss
Barragem Reguladora Billings - Pedra	1926	1995	Granito
Barragem Reguladora Pedro Beicht	1932	1995	Granito - gnaiss
Barragem Ribeirão do Campo	1962	1992	Bitotita Granito - gnaiss
Barragem Rio das Pedras	1970	1996	Gnaiss
Barragem Tapacurá	1975	1990	-
Usina Hidrelétrica de Furnas	1964	1976	Quartzito
Usina Hidrelétrica Ilha dos Pombos	1930	1990	Gnaiss
Usina Hidrelétrica Jagara	1971	1996	Quartzito
Usina Hidrelétrica Jaguri	1982	1992	Gnaiss milonizado
Usina Hidrelétrica Jurupá	1970	1995	Gnaiss
Usina Hidrelétrica Luiz Carlos B. e Carvalho	-	-	Quartzito
Usina Hidrelétrica Mascarenhas de Morais	1957	-	Quartzito
Usina Hidrelétrica Moxotó	1977	1985	Granito - gnaiss
Usina Hidrelétrica Paulo Afonso I	1954	1978	Granito - gnaiss
Usina Hidrelétrica Paulo Afonso II	1960	1978	Granito - gnaiss
Usina Hidrelétrica Paulo Afonso III	1973	1978	Granito - gnaiss
Usina Hidrelétrica Paulo Afonso IV	1979	1985	Granito - gnaiss

Usina Hidrelétrica Peti	1960	1978	Gnaisse
Usina Hidrelétrica Porto Colômbia	1973	1978	Cascalho e Basalto
Usina Hidrelétrica Sá Carvalho	1975	1985	Gnaisse
Usina Hidrelétrica Santa Branca	1960	1990	Gnaisse
Usina Elevatória de Tradição	1940	1985	Milionito
UTE Piratininga	1962	2002	-

Fonte: Adaptado de apud Couto, 2008.

Segundo Gomes (2008), no Brasil os primeiros relatos da reação Álcali Agregado foram constatados entre as décadas de 1960 e 1970 em três barragens, em Peti em Minas Gerais; em Apolônio Sales, mais conhecida como Moxotó, entre os estados da Bahia e Alagoas; e Pedras no estado de São Paulo. No Nordeste, foram encontrados cinco relatos de barragens do sistema hidrelétrico do Rio São Francisco com a patologia (Moxotó, Paulo Afonso I, II, III e IV) e barragens do sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana do Recife (Tapacurá) e de Salvador (Joanes II).

No Recife, no ano de 1999 verificou-se um quadro fissuratório nos 16 blocos de fundação da ponte Paulo Guerra, construída em 1977, que liga o Bairro do Recife a zona Sul. As fissuras eram visualizadas com as variações das marés, conforme a Figura 02, e no ano de 2000, a Prefeitura da Cidade do Recife contratou uma empresa especializada em tecnologia de concreto para diagnóstico das causas do processo de deterioração dos blocos. Com a investigação, foram executados diversos ensaios em testemunhos extraídos dos blocos, entre eles o ensaio petrográfico, pois havia um intenso quadro de fissuração, que possivelmente seria a Reação Álcali Agregado. Nos resultados dos ensaios constataram-se a reação e, no mesmo ano, a recuperação foi executada. Na Figura 03 visualizam-se as fissuras colmatadas e com a preparação dos purgadores para o processo de injeção.

Na época, questões foram suscitadas pelo Prof. Tibério Andrade da UFPE e o Prof. Paulo Helene da USP, coordenador da equipe de investigação, sobre a possibilidade da existência de outros casos em estruturas de concreto enterradas na RMR, pois era impossível que os agregados utilizados na fundação da ponte tivessem sido exclusivos apenas da construção da ponte. Todavia essas suspeitas

não foram suficientes para que novos estudos investigativos fossem continuados (ANDRADE, SILVA 2006).

Figura 02: Ponte Paulo Guerra



Fonte: Concrepoxi, 2000.

Figura 03: Ponte Paulo Guerra durante a recuperação.



Fonte: Concrepoxi, 2000.

Em 14 de outubro de 2004 houve o colapso do edifício Areia Branca, localizado no Bairro de Piedade, município de Jaboatão dos Guararapes. Empreendimento

construído em 1978, com 26 anos na época de seu desabamento, com 12 pavimentos, num total de 24 apartamentos e a 50 m de distância da praia. Em julho de 2005, o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA) apresentou o laudo técnico, feito por cinco renomados Engenheiros Civis, que relataram as causas do desabamento, conforme as referências citadas a seguir:

- ✚ O desabamento do edifício Areia Branca teve como principal causa a má execução da sua estrutura;
- ✚ A degradação dos materiais pelo contato com agentes agressivos presentes no solo e na água subterrânea;
- ✚ A ausência de uma cultura de manutenção preventiva (e até corretiva) faz com que as edificações se tornem mais vulneráveis à ação do tempo pelos agentes químicos e às falhas de construção, em especial aquelas ocultas.

Apesar do laudo deixar claro que o colapso não teve como responsável a ocorrência da RAA, após este acontecimento, a apreensão foi generalizada, e uma corrida foi evidenciada em busca de verificações no sentido de elucidar possíveis manifestações patológicas nas fundações de outras edificações na RMR e cidades vizinhas.

A LEI nº 13.032, de 14 de junho de 2006, (Regulamentada pelo Decreto nº 33.747, de 6 de agosto de 2009) pela Assembleia Legislativa e sancionada pelo governador em exercício, na cidade do Recife/PE, dispõe sobre a obrigatoriedade de vistorias periciais e manutenções periódicas, em edifícios de apartamentos e salas comerciais, no âmbito do Estado de Pernambuco, e dá outras providências.

Em seu Art. 1º trata: Esta Lei, para complementação do sistema de alerta e de defesa civil referido no art. 146, § 2º, da Constituição do Estado, estabelece as regras básicas para a realização obrigatória de vistorias periciais e respectivas manutenções periódicas, quando recomendadas, nas edificações constituídas por unidades autônomas no Estado de Pernambuco, sejam públicas ou privadas, assim como estabelece regras de manutenção preventiva e/ou corretiva de danos aos consumidores adquirentes e usuários de imóveis, nos termos do art. 5º, XXXII e art. 24, VIII, ambos da Constituição Federal. (Redação alterada pelo art. 2º da Lei nº 13.341, de 27 de novembro de 2007.)

§ 1º A vistoria técnica de que trata esta Lei, para análise pericial de todos os aspectos relacionados à solidez e segurança da edificação, dará ênfase aos seguintes itens:

- I - Fundações, pilares, lajes e fachadas;
- II - Instalações elétricas e hidráulicas de uso comum da edificação;

III - Estado de conservação do sistema de combate a incêndio;
IV - Estado de conservação dos reservatórios de água e casa de máquinas;
V - Estado de conservação do sistema de esgotamento sanitário;
VI - Estado de conservação dos sistemas mecânicos e de potência (elevadores, escadas rolantes, grupos geradores, subestações, climatizadores, etc.) quanto à segurança e funcionalidade.

Paralelamente com o aumento das ocorrências em estruturas correntes no Brasil, no ano de 2006 foram iniciados, através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os estudos para o desenvolvimento de normas específicas sobre RAA. Em 14 de maio de 2008, a NBR 15577 foi promulgada, com foco voltado para a prevenção, através da eliminação de pelo menos um dos fatores condicionantes para o aparecimento da reação.

Nesta norma foi estabelecido um guia para avaliação da reatividade potencial e o emprego de medidas preventivas para o uso de agregados reativos. Verificou-se que a recuperação das estruturas tinha um alto custo e determinou-se uma avaliação do grau de risco da ocorrência da reação, considerando três fatores:

- ✚ Condições de exposição da estrutura de concreto no ambiente;
- ✚ Dimensões da estrutura ou do elemento do concreto;
- ✚ Responsabilidade estrutural (estruturas provisórias, correntes ou especiais).

Com estas determinações a NBR 15577: (2013) preconiza sobre o grau de risco e quais as ações preventivas necessárias para o tipo de estrutura a ser construída. Os seus requisitos e orientações descrevem-se a seguir:

a. NBR- 15577- parte 1 (2013):

Estabelece os requisitos para o uso de agregado em concreto, tendo em vista as medidas necessárias para evitar a ocorrência de reações deletérias, devidas à reação Álcali-Agregado. Prescreve a amostragem e os métodos de ensaios necessários à verificação desses requisitos.

b. NBR- 15577- parte 2 (2013):

Estabelece como deve ser realizada a coleta de amostras de agregados destinados à preparação de concreto, considerando a verificação de seu potencial reativo com os álcalis. E prescreve como realizar a redução das amostras de campo para ensaios de laboratório.

c. NBR- 15577- parte 3 (2013):

Especifica um método para execução de análise petrográfica de amostras representativas de rochas para uso como agregados em concreto, com ênfase nos fatores condicionantes para a ocorrência da reação álcali- agregado (RAA).

d. NBR- 15577- parte 4 (2013):

Estabelece o método de ensaio acelerado para determinar, por meio de 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).

e. NBR- 15577- parte 5 (2013):

Estabelece o método de ensaio acelerado para determinar a suscetibilidade de cimentos Portland em combinação ou não com adições em mitigar a reação álcali agregado. Esse ensaio é idêntico ao ensaio da parte 4.

f. NBR- 15577- parte 6 (2013):

Estabelece um método de ensaio para avaliar, por meio da variação de comprimento de prismas de concreto, a suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva álcali-sílica (RAS) na presença dos íons hidroxila associados aos álcalis (sódio e potássio), fazendo-se uso de um cimento-padrão, com adição suplementar de hidróxido de sódio.

2.2 CONCEITOS BÁSICOS

Segundo Hasparyk (2005), a reação Álcali Agregado pode ser definida como o termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em

uma estrutura de concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado, visualizados na Figura 04. Como resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos podendo levar ao comprometimento das estruturas de concreto.

Para Andrade e Figuerôa (2007), a reação química se processa numa argamassa ou concreto, entre os íons de hidroxilas (OH^-) associados aos álcalis óxido de sódio (Na_2O) e o óxido de potássio (K_2O), provenientes do cimento ou de outras fontes, e certos tipos de agregados (graúdo ou miúdo).

A reação Álcali Agregado (RAA) é um processo químico em que alguns constituintes minerais do agregado reagem com hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, materiais pozolânicas, agentes externos, etc.) que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. Como produto desta reação, forma-se um gel higroscópico expansivo. A manifestação da reação Álcali Agregado pode se dar de várias formas, desde expansões, movimentações diferenciais na estrutura e fissurações até pipocamentos, exsudação de gel e redução das resistências à tração e compressão (PRISZKULNIK, 2005).

Figura 04: Elementos Constituintes da Reação



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2008.

A reação manifesta-se no concreto por um padrão de fissuração (em mapa), expansão e conseqüente deslocamento dos elementos estruturais, acompanhada de degradação de fragmentos da superfície. Em alguns casos, ocorre a exsudação de gel sílico-alcálico resultante da reação, que se deposita na superfície do concreto. O padrão de manifestação descrito anteriormente nem sempre ocorre, pois, as estruturas de concreto armado podem estar submetidas a diferentes formas de solicitação. Além disto, a geometria da peça e a presença de armadura podem modificar do modelo de fissuração (PAULON, 1981).

2.2.1 TIPOS DE REAÇÕES ÁLCALI AGREGADO

Existem dois tipos de reação álcali agregado, classificadas de acordo com a sua composição mineralógica reativa do agregado e com mecanismos de expansão específicos. A reação recebe as seguintes denominações: reação Álcali Sílica (RAS) ou Álcali Silicato (RASS) e Álcali Carbonato (RAC).

2.2.1.1 REAÇÃO ÁLCALI SÍLICA (RAS)

Segundo Hasparyk (2005), a reação Álcali-Sílica é o tipo de RAA mais conhecida e relatada no meio técnico, como sendo a que normalmente ocorre mais rapidamente, em função das formas minerais de sílica reativas envolvidas. Entre as formas minerais mais comuns destacam-se: a opala ou sílica amorfa, a calcedônia, a cristobalita, a tridimita, os vidros naturais e artificiais e o quartzo microcristalino/criptocristalino e deformado.

Esta reação é mais comum e a que mais rápido se desenvolve. Caracteriza-se pela formação de um gel higroscópico e instável. Ao se formar o gel, inicia-se a absorção da água e um processo de expansão, ocasionando fissuras no concreto quando essas forças de expansão forem superiores as forças de tração da pasta de cimento (ANDRADE, SILVA 2006).

2.2.1.2 REAÇÃO ÁLCALI SILICATO (RASS)

Um tipo específico da reação Álcali Sílica, denominada de reação Álcali Silicato, se processa entre álcalis e silicatos reativos presentes em rochas

sedimentares, metamórficas e ígneas. Apresenta o mesmo mecanismo que a reação álcali-silica, porém ocorre mais lentamente (ANDRADE, SILVA 2006).

A reação Álcali Silicato é o tipo específico em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas. Os Silicatos reativos mais comuns são quartzo tensionado por processos tectônicos e minerais da classe dos filossilicatos presentes em ardósias, fílitos, xistos, milonitos, granulitos, quartzitos, entre outros. Geralmente, essa reação é mais lenta do que a reação Álcali Sílica (MUNHOZ, 2007).

2.2.1.3 REAÇÃO ÁLCALI CARBONATO (RAC)

É uma reação mais rara e não há a formação do gel. Caracteriza-se pela expansão das rochas carbonáticas, em consequência da reação entre álcalis, proveniente principalmente da pasta do cimento e o calcário dolomítico, gerando compostos cristalizados como brucita, carbonatos alcalinos, carbonato de cálcio e silicato magnésiano. Atribui-se a esta expansão, denominada de desdolomitização, a causa das fissuras que surgem no concreto em consequência do enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Nesta reação ocorre novamente a formação de álcalis, possibilitando a continuidade da desdolomitização, até que a dolomita tenha reagido por completo ou até que a concentração de álcalis seja suficientemente reduzida (ANDRADE, SILVA 2006).

2.3 MECANISMOS DE REAÇÃO

Os agregados naturais têm suas propriedades físicas e químicas geridas por sua composição mineralógica, textura e estruturas internas, pelo grau de alteração das rochas das quais foram obtidos e pela sua alterabilidade em serviço. E em grande parte a granulometria dos agregados deletérios e as características de britagem das rochas dependem desses fatores.

Para manter este equilíbrio os íons alcalinos se espalham sobre os íons de hidroxila, e a reação entre eles resulta na produção de gel. Ainda segundo o autor, a RAA é uma reação espontânea. Os produtos desta reação são mais estáveis que os

reagentes da mesma, este fato justifica a razão de que depois de iniciado o processo químico não há mais como pará-lo (VALDUGA, 2002).

A reatividade química dos agregados depende simultaneamente, da solubilidade ou instabilidade química intrínsecas dos minerais constituintes, e da porosidade, da permeabilidade e do tamanho das partículas. Analogamente, a massa específica dos agregados depende da massa específica dos minerais constituintes e do seu empacotamento. A resistência mecânica também depende da resistência intrínseca dos constituintes granulares das rochas e da maneira como estão entrelaçados ou cimentados (PRISZKULNIK, 2005).

A reação química entre íons hidroxila (OH^-) dos álcalis e sílica reativa é uma reação de dissolução que acontece pela solubilidade da sílica na solução alcalina (alto ph), característica dos produtos de hidratação do cimento, existentes no interior do concreto. A concentração de íons hidroxila no fluido dos poros é alta devido à grande quantidade de hidróxido de cálcio no cimento hidratado. O mecanismo da reação inicia-se por um processo físico caracterizado pela migração de íons Na^+ , K^+ , OH^- da fase líquida intersticial para as partículas de sílica reativa existentes no agregado. Em seguida vem o processo químico, quando os íons hidroxila (OH^-) atacam a chamada ponte siloxana ($\text{SiO} - \text{O} - \text{SiO}$) perto da superfície dos componentes da sílica reativa, rompendo a cadeia cristalina (ANDRADE, FIGUERÔA, 2007).

O ataque será superficial se as partículas reativas da sílica do agregado tiverem baixa permeabilidade. Quando essa permeabilidade é elevada, o gel pode ser identificado no interior do agregado, nos planos de clivagem. A carga negativa criada pela ruptura da cadeia é balanceada pela carga positiva dos íons alcalinos, tais como Na^+ ou K^+ , conforme observado no processo da reação representado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5: Cinética da Reação do Na



Fonte: Adaptado de Andrade e Figuerôa, 2007.

ou

Figura 6: Cinética da Reação do K



Fonte: Adaptado de Andrade e Figuerôa, 2007.

O produto da reação trata-se de um gel, mais conhecido como gel de sílica. Este material se constitui como material viscoso, de cor esbranquiçada, composto essencialmente de sílica, álcalis (sódio e potássio), cálcio e água. Esse gel produzido é higroscópico, ou seja, possui afeição por água, absorvendo-a por osmose, tornando-se um material expansivo. Devido à porosidade do concreto, esse gel irá preencher os espaços vazios do concreto.

2.4 FATORES INDUTORES DA REAÇÃO

Para Paulon (1981), apud Nogueira (2010), vários fatores influenciam na RAA, pois o concreto é uma miscelânea muito complexa de diferentes materiais, com diversidade de características químicas, nas quais geram um produto final (concreto) que possui condições ideais para a reação, mesmo utilizando cimentos com baixos teores de álcalis e agregado não reativo.

Os principais fatores preponderantes para o desencadeamento desta patologia são o cimento, os agregados (materiais constituintes da dosagem do concreto), a presença de umidade, as variações de temperatura, as influências externas e o tempo (HASPARYK, 2005).

Ainda fatores distintos interagem influenciando no mecanismo da reação Álcali Agregado no concreto e estão diretamente relacionados à presença de três fatores condicionantes: álcalis do cimento, agregado reativo e umidade.

2.4.1 ÁLCALIS DO CIMENTO

O teor de álcalis no concreto deve ser suficiente para desencadear a RAA. No concreto os álcalis são provenientes principalmente do cimento Portland, porém pode haver outras fontes de álcalis, a exemplo os aditivos, as adições minerais, ou mesmo outros agregados.

Segundo Hasparyk (2005), quanto maior o teor de álcalis de cimento no concreto, maiores as expansões. Os álcalis envolvidos provêm das argilas ou de compostos silicosos presentes na matéria prima do cimento. Os álcalis (potássio e sódio) encontram-se presentes no cimento na forma de sulfatos ou incorporados nas fases silicatos e aluminatos no clínquer, porém, também podem ser fornecidas por fontes externas, como soluções de sulfato de sódio, cloreto de sódio, adições minerais e agregados.

Os álcalis do cimento podem se encontrar em duas formas, solúveis e insolúveis. Os álcalis solúveis encontram-se presentes nos sulfatos e enquanto os insolúveis, em estado sólido, estão presentes no clínquer (HASPARYK, 2005).

Após a fase inicial, o gel passará a exercer pressões contra a massa ao seu redor, e quando esta pressão atinge uma força superior à resistência de tração do concreto ocorrem as fissuras. Quando toda a sílica reagir, num processo que poderá durar anos, segundo os registros até 60 anos, ocorrendo uma deterioração progressiva e irreversível no concreto devido à reação.

2.4.2 AGREGADO POTENCIALMENTE REATIVO

A composição mineralógica do agregado define seu potencial de reatividade com os álcalis do concreto.

Segundo Munhoz (2007), para ocorrer a RAA o agregado deve conter formas de sílica capazes de reagir quimicamente com o íon hidroxila e os álcalis presentes na solução dos poros. A Sílica é encontrada na maioria dos depósitos geológicos do planeta e apresenta-se com diversas estruturas cristalinas e em tamanhos de grãos.

Em um concreto, os agregados utilizados são normalmente provenientes de rochas, formadas por aglomerados minerais que diferem uns dos outros. Sua mineralogia e textura são determinadas por intermédio da sua origem mineralógica.

Para as rochas com estruturas deformadas resultam de um metamorfismo dinâmico (chamado cataclástico), caracterizado por uma fragmentação fina do material original, gerada por atrito em zonas de falha geológica (ANDRADE, FIGUERÔA, 2007).

Segundo Kihara (1993), a reatividade entre os minerais e os álcalis depende dos seguintes fatores:

- a. Da Granulação: quanto mais fino o agregado, maior a superfície de reação, sendo, portanto, mais reativo;
- b. Da estrutura cristalina: quanto mais desordenada e instável a estrutura, mais reativa é a fase; as reatividades dos vidros (amorfa), da opala (amorfa), da calcedônia (metaestável), do quartzo tensionado (deformado), são maiores que a do quartzo bem cristalizado;
- c. Do conteúdo de água de cristalização e dos grupos silanol (SiOH), que conferem maior reatividade às fases, como por exemplo, as opalas e os filossilicatos sintemperizados (argilominerais como a illita, a vermiculita e a montmorilonita).

Mehta e Monteiro (2014) ressaltam que todos os silicatos e minerais de sílica, bem como sílica hidratada (opala) ou amorfa (obsidiana, vidro de sílica), podem reagir com soluções alcalinas, dependendo do tempo, temperatura e tamanho da partícula. Em condições não muito severas a maior parte dele reage apenas em um grau insignificante.

Os agregados reativos aos álcalis, dependendo (tempo, temperatura e da dimensão da partícula), todos os silicatos ou minerais da sílica, bem como a sílica hidratada (opala) ou formas amorfas (obsidiana, vidro de sílica) podem reagir com as soluções alcalinas, embora muitos minerais reajam em grau insignificante. Feldspatos, piroxênios, anfibólios e micas, que são minerais constituintes do granito, gnaisse, xisto, arenito e basalto, são classificados como minerais inócuos. Opala, obsidiana, cristobalita, tridimita, calcedônia, chert, andesita, riolito e quartzo tensionado ou metamórfico tem sido considerados reativos em ordem decrescente de reatividade. O Quadro 02 listam-se alguns minerais reativos, sua composição química e as características físicas.

Quadro 02: Minerais reativos e seus constituintes.

ROCHAS, MINERAIS E CONSTITUINTES REATIVOS DELETÉRIOS.		
CONSTITUINTES REATIVOS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS
Opala	SiO ₂ nH ₂ O	Amorfa
Calcedônia	SiO ₂	Microcristalina a criptocristalina; normalmente fibrosa.
Certas formas de Quartzo	SiO ₂	Microcristalina a criptocristalina; Cristalina, mas intensamente fraturada, deformada e/ou preenchidas com inclusões.
Cristobalita	SiO ₂	Cristalina
Tridimita	SiO ₂	Cristalina
Vidro presente em riolitos, dacitos, latitos ou andesitos ou produtos de devitrificação criptocristalinos	Silicosos com proporções menores de Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ alcalinos terrosos.	Vidro ou material criptocristalino como a matriz de rochas vulcânica, ou fragmentos em tufos.
Vidros silicosos sintéticos	Silicosos, com proporções menores de álcalis, alumina, e/ou outras substâncias.	Vidro
AS MAIS IMPORTANTES ROCHAS ÁLCALI-REATIVA DELETÉRIAS		
Chert Opalino	Andesitas e tufos	
ChertCalcedônico	Folhelhos silicosos	
ChertQuartzoso	Filitos	
CálcariosSilicosos	Concreções de opala	
Dolomitos Silicosos	Quartzitos e quartzos fraturados, tensionados e preenchidos por inclusões.	
Riolitos e tufos		
Dacitos e tufos		

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2008.

2.4.3 TEOR DE UMIDADE SUFICIENTE

Os íons hidroxilas são necessários para solubilizar os íons alcalinos. Esta solubilização pode ocorrer rapidamente ou ao longo do tempo. Então para que ocorra a reação de forma deletéria, faz-se necessário que tenha nos poros do concreto, água diluída, proveniente de alguma fonte, tais como parte da água não

absorvida durante o processo de hidratação, ou água existente no local em contato com o concreto, ou água de chuva, ou mesmo água condensada da umidade do ar.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a água é o agente principal de deterioração física e química do concreto, pois além de ter grande facilidade em se mover através dos poros do concreto, devido ao tamanho de suas moléculas, é um excelente solvente, com capacidade de dissolver muitas espécies químicas, tornando-a rica em íons e gases capazes de causar a deterioração.

Para Neville (2016), a maior ou menor facilidade com que os fluidos podem ingressar e se deslocar no interior do concreto depende de sua permeabilidade, a qual está relacionada ao volume, tamanho, distribuição e continuidade dos poros da pasta de cimento endurecida. Como a água é essencial para a continuidade das reações cimento-agregado, por outro modo os ciclos de molhagem e secagem alternados agravam a migração dos íons alcalinos que se movem das partes úmidas para as partes secas.

Dois fatores estão diretamente ligados à relação água/cimento, a permeabilidade e a compacidade do concreto. Ao diminuir a relação água/cimento, o concreto ganha mais resistência, torna-se menos permeável e baixa os teores de água livre interna. Esses fatores são de extrema importância para reduzir a velocidade de penetração de agentes agressivos e a movimentação da umidade interna do concreto.

Segundo Munhoz (2007), a relação água/cimento utilizada no preparo dos cimentos Portland varia entre 0,35 e 0,55. Estudos desenvolvidos indicam que a quantidade de água necessária para toda a hidratação é de aproximadamente 0,24, conseqüentemente haverá um excesso de água no concreto, que o manterá com umidade interna alta, possibilitando o aparecimento da RAA.

As estruturas de concreto que estão em contato direto com a água, tais como em lençóis freáticos, águas de rios ou mares, estão bastante susceptíveis a desenvolver a reação, possibilitando potencialmente a expansão do gel.

Com relação à velocidade e a magnitude com que ocorre a expansão estão associados os seguintes fatores complementares:

- a. A temperatura, com influência no sentido direto;
- b. Área da superfície específica do material;

- c. Tensões confinantes;
- d. Contribuição de álcalis externos.

2.4.4 TEMPERATURA

Segundo Hasparyk (2005), quanto maior a temperatura ambiente, mais rapidamente ocorrerá a reação. Isto pode ser explicado em decorrência do fato da maioria das reações químicas serem ativadas ou aceleradas por temperaturas elevadas.

As reações cimento-agregado só ocorrem na presença de água. Sendo a mínima umidade relativa no interior do concreto para ocorrer a reação é de 85% a uma temperatura de 20 °C, sendo que quando a temperatura é mais elevada, a reação pode ocorrer com umidade um pouco menor. Em geral, uma temperatura mais elevada acelera o progresso da RAA, mas não aumenta a sua expansão total causada pela reação. O efeito da temperatura pode ser decorrente do fato que o seu aumento diminui a solubilidade do Ca(OH)_2 e eleva o da sílica. Este efeito acelerador que a temperatura fornece, pode ser aproveitado para a realização de ensaios acelerados para a verificação da potencialidade reativa de agregados (NEVILLE, 2016).

2.4.5 UMIDADE RELATIVA

Segundo Andrade e Figuerôa (2007), conclui-se que a umidade relativa necessária para ocorrer a RAA é superior a 80%. Assim, estruturas que estejam em contato direto com a umidade, como barragens ou mesmo aquelas que tenham uma drenagem insuficiente, existem uma maior probabilidade da ocorrência da reação.

2.4.6 TEMPO

O fator tempo é um condicionante para a RAA, assim como toda reação química. Na RMR houve relatos desta reação que ocorreram em momentos distintos na estrutura, podendo levar mais ou menos tempo. Os sintomas irão depender de

fatores como: dimensões da peça, exposição do concreto a umidade e a reatividade do agregado. Blocos de fundação possuem uma fragilidade maior, em função do seu estado de tensão e do detalhamento de armadura, mas fator tempo é uma condicionante (ANDRADE, 2006).

2.5 COMPORTAMENTOS DAS ESTRUTURAS AFETADAS

Os sintomas de uma estrutura com a RAA se apresentam através do aparecimento da exsudação do gel na superfície do concreto, bordas ao redor dos agregados, preenchimento de poros com material branco ou vítreo, fissuração e descoloração do concreto. As fissuras que tiverem sua configuração em mapa ocorrem com maior frequência em pavimentos rodoviários, pistas de aeroportos, muros e faces de elementos estruturais, que apresentam baixa restrição à expansão nas três direções.

Segundo Hasparyk (2005), os principais efeitos deletérios provocados pela RAA em uma estrutura, são os seguintes:

- ✚ Fissuração na superfície do concreto e entre camadas de concretagem;
- ✚ Desplacamento na superfície do concreto;
- ✚ Perda de estanqueidade;
- ✚ Deslocamento (perda de aderência) da argamassa junto à superfície dos agregados;
- ✚ Movimentação (abertura ou deslocamento relativo) de juntas de contração;
- ✚ Abertura de juntas de construção, com fissuras horizontais;
- ✚ Movimentação/desalinhamento das superfícies livres (alteamento da crista da barragem e soleiras de vertedouros, deflexões para o montante nas estruturas de barragens e outros);
- ✚ Travamento ou deslocamento de equipamentos e peças móveis (comportas, turbinas, eixos, pistões, entre outros).

2.5.1 TENSÃO DE CONFINAMENTO

Faz-se importante analisar o comportamento das estruturas, no sentido de identificar a patologia numa peça afetada, verificando a relação entre a expansão e as tensões geradas pela reação. Muitos estudos foram desenvolvidos e resultados semelhantes foram encontrados e devem ser consideradas as informações descritas a seguir:

- ✚ Nas direções onde as tensões de compressão são atuantes, configura uma região de confinamento que inibe a expansão da RAA, assim uma peça mesmo afetada pela reação terá um comportamento diferenciado, dificultando ou impedindo assim o aparecimento de fissuras na direção perpendicular ao esforço de compressão;
- ✚ Nas direções com maior densidade de armaduras, verificou-se o aparecimento de fissuras por expansão no mesmo sentido das armaduras.

2.6 MEDIDAS MITIGADORAS

2.6.1 MEDIDAS PREVENTIVAS

A reação Álcali Agregado trata-se de uma patologia que ao instaurar-se no concreto, ocorrerá até que todos os álcalis presentes nos poros dos concretos e/ou as fases reativas dos agregados tenham reagido, pois é muito difícil eliminar a água do processo.

Ainda segundo Munhoz (2007), estudos mostram quatro teorias que explicam a eficiência nas utilizações de adições ativas para reduzirem as expansões:

- ✚ Diluição dos álcalis através da substituição do clínquer por adições;
- ✚ Retenção dos álcalis deixando-os indisponíveis para reagirem com o agregado, impedido o aparecimento da reação;
- ✚ Redução da permeabilidade em função do modulo de finura dos poros, tornando-o impermeável e impedindo o aparecimento da umidade e a difusão dos álcalis para reagirem com os agregados;

- ✚ Redução do pH através da redução do hidróxido de cálcio.

De acordo com Gomes (2008), nos últimos anos relatos de casos têm aumentado principalmente em estruturas de médio e pequeno porte, como pontes, fundações de edifícios e rodovias. Em todo o mundo, constatou-se que a recuperação solicita vultosas somas de recursos, concluindo-se, portanto, que medidas preventivas seriam a melhor maneira para evitar os problemas.

A seguir serão demonstrados os cuidados a serem tomados para prevenção da RAA, enfatizando-se sobre a necessidade do conhecimento quanto à reatividade dos agregados graúdos e miúdos, o tipo do cimento utilizado e os tipos de adições.

2.6.2 AVALIAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO E MIÚDO

Os agregados graúdos e miúdos são materiais amplamente utilizados no concreto com importantes papéis no processo de produção. Considerados inertes, possuem características físicas e químicas que intervêm no comportamento da mistura. E sob o ponto de vista técnico exercem influência sobre a redução da retração e do aumento da resistência aos esforços mecânicos.

Sua composição granulométrica tem influência direta sobre a qualidade e a compacidade e é especialmente determinante na trabalhabilidade e na uniformidade do concreto.

Com o propósito de prevenir e mitigar possíveis reações expansivas que possam vir a deteriorar o concreto, como a RAA que resulta na interação entre certos componentes de alguns tipos de agregados (sílica reativa) e os hidróxidos alcalinos (sódio e potássio) liberados pelo cimento, durante sua hidratação, faz-se necessários alguns cuidados na escolha dos agregados graúdos e miúdos, procedendo com uma análise quanto à reatividade dos mesmos.

Os agregados reativos possuem em sua composição fases mineralógicas silicosas suscetíveis à reação como os álcalis solúveis no concreto.

2.6.3 ADIÇÕES AO CIMENTO

A execução de trabalhos seja de construção, recuperação ou reforço de estruturas requer um conhecimento adequado do tipo de cimento, suas características, e o domínio das normas que ditam as informações acerca da aplicabilidade, recebimento e suas composições.

A estabilidade dimensional do concreto, ou seja, os fenômenos de expansão, retração e fissuração, e a resistência química do concreto, isto é, sua capacidade de resistir aos diversos agentes químicos (água do mar, salinidade do ar, poluição atmosférica, e outras) está intimamente ligada às características físicas e químicas do cimento, tais como finura, expansibilidade, composição potencial, presença de cal livre, de óxido de magnésio, etc. (SOUZA, RIPPER, 2009).

Segundo a NBR 16697:2018 o cimento tipo Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer ao qual se adiciona, durante a operação de fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores especificados.

O cimento tipo Portland é produzido a partir da calcinação, a uma temperatura de 1500 °C da mistura do calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos de alumínio e ferro), acrescidos da gipsita em menor quantidade e de substâncias ricas em sílica, alumina e ferro. Deste processo dar-se origem ao clínquer, cujas proporções são obtidas a partir de análises químicas e seus principais compostos são Silicato Tricálcico (C_3S), Silicato Bicálcico (C_2S), Aluminato Tricálcico (C_3A), Ferro-Aluminato Tetracálcico (C_4AF) e a Gipsita ($Ca(SO_4) \cdot 2H_2O$). Além destes compostos principais do cimento, estão presentes em quantidades menores os álcalis (Na_2O , K_2O), os sulfatos, os óxidos de magnésio (MgO) e a Cal livre, entre outros.

O cimento é a principal fonte fornecedora de álcalis. Porém outros fatores devem ser considerados, como águas superficiais ou subterrâneas e a dissolução dos componentes alcalinos nos agregados, pozolanas e escórias. Estudos indicam que cimentos com baixo teor de álcalis são aqueles com menos de 0,60% de equivalente alcalino. A RAA pode ser reduzida ou prevenida utilizando cimento com

baixo teor de álcalis ou limitando o teor de álcalis total por m³ de concreto. Um limite recomendável 3,0 kg/m³ de Na₂O no concreto (SILVA, 2013).

2.6.3.1 TIPOS DE CIMENTO NO BRASIL

No Brasil são fabricados diversos tipos de cimento, utilizados conforme suas propriedades principais resultando no desenvolvimento de variadas características mecânicas, físicas e químicas.

Atualmente no País são produzidos os seguintes tipos de cimentos Portland: o cimento comum, o cimento comum com adições, o cimento de alto-forno, o cimento composto, o cimento pozolânico e de alta resistência inicial e o cimento resistente a sulfatos. O Quadro 03 mostra os tipos de cimentos disponíveis no mercado, especificando suas classes de resistência, composição e as NBR's respectivas.

Quadro 03: Composições do Cimento Portland (Percentagem em massa)

DESIGNAÇÃO NORMALIZADA	SIGLA	SUFIJO	CLÍNQUER + SULFATOS DE CÁLCIO	ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO	MATERIAL POZOLÂNICO	MATERIAL CARBONÁTICO
Cimento Portland Comum	CPI	RS ou BC	95-100	0-5		
	CP I-S		90-94	0	0	6-10
Cimento Portland Composto com Escória de Alto Forno	CP II-E		51-94	6-34	0	0-15
Cimento Portland Composto com Material Pozolânico	CP II-Z		71-94	0	6-14	0-15
Cimento Portland Composto com Material Carbonático	CP II-F		75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de Alto Forno ^b	CP III		25-65	35-75	0	0-10
Cimento Portland Pozolânico ^c	CP IV		45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland com Alta Resistência Inicial	CP V ^a		90-100	0	0	0-10
Cimento Portland Branco	Estrutural		CPB	75-100	–	–
	Não estrutural	–		50-74	–	–

Fonte: ABCP, 2019

Quadro 04: Classe de Resistência e Normas do Cimento Portland

DESIGNAÇÃO NORMALIZADA		SIGLA	CLASSE DE RESISTÊNCIA	NORMA DA ABNT
Cimento Portland Comum		CP I e CP I-S	25,32 ou 40	NBR – 16697: 2018
Cimento Portland Composto com Escória de Alto Forno		CP II-E		NBR – 16697: 2018
Cimento Portland Composto com Material Pozolânico		CP II-Z		NBR – 16697: 2018
Cimento Portland Composto com Material Carbonático		CP II-F	25,32 ou 40	NBR – 16697: 2018
Cimento Portland de Alto Forno		CP III	25,32 ou 40	NBR – 16697: 2018
Cimento Portland Pozolânico		CP IV		NBR – 16697: 2018
Cimento Portland com Alta Resistência Inicial		CP V	ARI	NBR – 16697: 2018
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB	25,32 ou 40	NBR – 16697: 2018

Fonte: ABCP, 2019.

Os cimentos produzidos a partir da moagem, em conjunto do clínquer do cimento Portland e da pozolana (num percentual de 15% a 50%) são chamados de cimentos pozolânicos.

As pozolanas podem ser artificiais ou naturais, formados de sílica e alumina e quando em contato com hidróxido de cálcio na presença da umidade, formam compostos aglomerantes semelhantes ao cimento Portland.

Para serem eliminados os riscos de deterioração do concreto por reações deletérias como a RAA recomenda-se a utilização do: cimento Portland pozolânico com teor de pozolana de 15% a 50%, cimento Portland de alto forno com teor de escória superior à de 60% e cimento Portland pozolânico com baixo teor de álcalis Na_2O e K_2O (CIMENTO.ORG, 2017).

2.6.3.1.2 CIMENTO PORTLAND CP I e CP I - S

Os cimentos Portland comuns CP I e CP I-S são definidos, para efeito da verificação de conformidade, nas três classes apresentadas 25, 32 e 40 MPa

segundo a resistência à compressão obtida aos 28 dias de idade, conforme método descrito na NBR 7215:2019 e segundo a NBR 16697:2018. Este é um tipo de cimento Portland comum sem quaisquer adições além do gesso (utilizado como retardador da pega).

O cimento Portland comum com adições, o CP I-S, traz em sua composição 5% de material pozolânico em massa, recomendado para construções em geral, o cimento tipo CP I é pouco utilizado no país, apenas 1% de todo o cimento consumido no Brasil, e possui alto custo de produção, pela questão ambiental e por ser um tipo de cimento que utiliza muito clínquer no processo produtivo (CIMENTO.ORG, 2017).

2.6.3.1.3 CIMENTO PORTLAND CP II E – Z – F

Os cimentos CP II são ditos compostos, pois apresentam, além da sua composição básica (clínquer + gesso), a adição de outro material.

Em 1991, a partir dos bons resultados dos estudos dos diversos tipos de cimento e a exemplo de países tecnologicamente mais avançados, como os da União Europeia, surgiram no mercado brasileiro um novo tipo de cimento, o cimento portland composto, cuja composição é intermediária entre os cimentos portland comuns (CP I e CP I S) e os cimentos portland com adições (alto-forno e pozolânico). A aceitação e o uso desse tipo de cimento expandiram-se nos últimos anos e atualmente, 58% de todo o cimento consumido no Brasil é do tipo composto, seja ele E, F ou Z (CIMENTO.ORG, 2017).

✚ O CP II – E

Contém adição de escória granulada de alto-forno, o que lhe confere a propriedade de baixo calor de hidratação. É composto de 94% a 56% de clínquer + gesso e 6% a 34% de escória, podendo ou não ter adição de material carbonático no limite máximo de 10% em massa. Recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento.

O CP II gera calor numa velocidade menor do que o gerado pelo Cimento Portland Comum (CP I), portanto, é mais indicado em lançamentos maciços de

concreto, onde o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Este cimento também apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo (CIMENTO.ORG, 2017).

O CP II – Z

Contém adição de material pozolânico que varia de 6% a 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade, sendo ideal para obras subterrâneas, principalmente com presença de água, inclusive marítimas. Pode conter adição de material carbonático (fíler) no limite máximo de 10% em massa. (CIMENTO.ORG, 2017).

O CP II – F

Composto com fíler tem como característica uma secagem rápida e coloração mais clara, pela adição apenas de fíler calcário e gesso. Ideal para utilização em estruturas de concreto armado, pavimentos de concreto, argamassa de chapisco, assentamento de blocos, revestimento, pisos e contrapisos, grautes, concreto protendido, pré-moldados e artefatos de concreto (CIMENTO.ORG, 2017).

2.6.3.1.4 CIMENTO PORTLAND CP III

O cimento Portland de alto-forno contém adição de escória no teor de 35% a 70% em massa, que lhe confere propriedades como baixo calor de hidratação, maior impermeabilidade e durabilidade, sendo recomendado tanto para obras de grande porte e agressividade como: barragens, fundações de máquinas, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, obras submersas, pavimentação de estradas, pistas de aeroportos, etc (CIMENTO.ORG, 2017).

2.6.3.1.5 CIMENTO PORTLAND CP IV

Os cimentos pozolânicos obtidos da moagem em conjunto, de clínquer e pozolana, numa proporção de 15% a 50%. Quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, originam-se compostos com propriedades aglomerantes.

Os materiais pozolânicos são utilizados conjuntamente com o clínquer, pois o hidróxido de cálcio é resultante de sua hidratação. A adição de escória e materiais pozolânicos modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a difusibilidade iônica e a porosidade capilar; aumentando a estabilidade e a durabilidade do concreto. Tais fatores repercutem diretamente no comportamento do concreto, melhorando seu desempenho ante a ação de sulfatos e da reação Álcali Agregado. Outras propriedades também são alteradas, incluindo a diminuição do calor de hidratação, o aumento da resistência à compressão em idades avançadas, melhor trabalhabilidade e outros. Dado o fato de as escórias granuladas de alto-forno e os materiais pozolânicos terem menor velocidade de hidratação em relação ao clínquer, os cimentos com adição desses materiais podem apresentar, em igualdade de condições, menor desenvolvimento inicial de resistência (CIMENTO.ORG, 2017).

2.6.3.1.6 CIMENTO PORTLAND CP V – ARI

Trata-se de um aglomerante hidráulico e de alta resistência inicial atingida nos primeiros dias. Sua composição química possui um percentual elevado de C_3S , responsável pela resistência inicial dos concretos. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer. Bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade. O cimento continua ganhando resistência até os 28 dias de idade, atingindo valores mais elevados que os demais, proporcionando maior rendimento ao concreto. O CP V - ARI assim como o CP- I não contém adições (porém pode conter até 5% em massa de material carbonático). É largamente utilizado na

produção industrial de artefatos, onde se exige desforma rápida, concreto protendido e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada (CIMENTO.ORG, 2017).

2.6.4 ADIÇÕES MINERAIS

Para Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, e usualmente adicionados no concreto em quantidades consideráveis, que podem variar de 20 a 70% de substituição por massa de material cimentício. Apesar de ainda serem utilizadas pozolanas naturais em estado bruto ou após ativação térmica em todo o mundo, torna-se viável economicamente e ambientalmente a utilização de subprodutos industriais como fonte primária de adições minerais para concreto.

O controle da RAA, assunto complexo, onde se necessita de conhecimento aprofundado sobre os agregados utilizados na dosagem do concreto. Entretanto, devem ser destacados os efeitos benéficos da utilização de cinza-volante (cerca de 30 a 40% em massa) ou de escória de alto-forno (cerca de 40 a 50%) nos cimentos compostos. Estes materiais possuem uma pequena parcela de álcalis solúveis em água, de modo a reduzir o teor de álcalis mesmo utilizando um cimento com elevado teor de álcalis na mistura (NEVILLE, 2016).

Para Carmo e Portella (2008), pesquisas experimentais têm sido desenvolvidas para as adições químicas minerais e orgânicas nas dosagens de concretos convencionais, tais como pozolanas naturais, cinza de casca de arroz, a cinza volante e escórias de alto forno. A utilização destes produtos ao concreto tem como objetivo a preservação das propriedades, bem como o aumento de sua durabilidade, a diminuição dos aglomerantes hidráulicos, buscando reduzir os impactos ambientais e a produção de resíduos que veem gradativamente saturando os aterros dos grandes centros. As adições minerais podem ser classificadas em função de sua composição química e mineralógica em:

- ✚ Escória granulada de alto-forno (pertencente ao grupo dos silicatos vítreos contendo principalmente, Cálcio, Magnésio, Alumínio e Sílica);
- ✚ Cinzas volantes (com um alto teor de Óxido de Cálcio, maior que 10%);

- ✚ Pozolanas comuns (constituídas normalmente por cinzas volantes com baixo teor de Cálcio).

2.6.4.1 ESCÓRIA DE ALTO FORNO

A escória de alto forno é um subproduto da indústria siderúrgica, resultante da produção de ferro fundido ou ferro gusa. Pode ser considerada uma mistura de óxidos metálicos, mas também podem conter sulfetos metálicos e átomos de metais na sua forma elementar. O material é resfriado lentamente ao ar e quando moído em partículas minúsculas apresenta-se com características cimentantes e de pozolanas.

Estudos comprovam que quanto maior o teor de escória inserido ao concreto, menor será a incidência de expansão relacionada à RAA.

2.6.4.2 CINZAS VOLANTES

Segundo Mehta e Monteiro (2008) e Neville (2016), a cinza volante, também conhecida como cinza volante pulverizada é a cinza precipitada mecanicamente ou eletricamente, a partir dos gases de combustão de usinas termoelétricas a carvão mineral. As partículas de cinza volante são esféricas, o que já é benéfico no ponto de vista de utilização de água e tem finura bastante elevada. A maioria das partículas tem diâmetros muito pequenos e a sua superfície específica pelo método de Blaine varia de 250 a 600 m²/kg. Estes valores têm grande influência para a reação com o hidróxido de cálcio.

As cinzas volantes podem ser classificadas em dois tipos, que se distinguem em função do teor de cálcio. A cinza da primeira categoria distingue-se por conter 10% de CaO, a segunda por conter entre 15 a 40% de CaO.

A utilização deste material como componente do concreto reduz a sua permeabilidade, conferido mais resistência em meios agressivos.

2.6.4.3 POZOLANAS

Na RMR as adições mais utilizadas são as pozolanas e sua utilização transmite benefícios tecnológicos, econômicos e ecológicos ao concreto. Existem dois tipos de Pozolanas: as naturais e as artificiais.

- ✚ Pozolanas Naturais: são aquelas de origem ígnea sedimentar. Elas são normalmente ácidas, ou seja, rica em materiais silicosos. São resultantes de atividades vulcânicas, uma vez que sua fase vítrea é formada por resfriamento brusco do material fundido;
- ✚ Pozolanas Artificiais: são provenientes do tratamento térmico de determinadas argilas ou subprodutos industriais, com atividade pozolânica. Tem-se como exemplo, a cinza volante, sílica ativa, cinza de casca de arroz, argila calcinada.

A adição de Pozolanas tende a trazer benefícios ao concreto, levando-se em consideração os seguintes aspectos:

- ✚ Tecnológico: tende a aumentar a trabalhabilidade, ampliar sua durabilidade e propriedades mecânicas e a reduzir o consumo da água para um mesmo abatimento;
- ✚ Econômico: tende a diminuir seus custos em função da diminuição do consumo de aglomerantes hidráulicos, que possui um alto valor;
- ✚ Ecológico: pois grande parte das pozolanas provém de resíduos industriais, e cujo destino seria os aterros.

Hasparyk (2005) descreve que o teor ideal de adição varia em função do tipo de agregado e o seu grau de reatividade, tornando-se imprescindível a investigação experimental do cimento e das adições. Atualmente tem-se apresentado alguns teores de adições utilizados na prática: a sílica ativa 5% a 10%, cinza de casca de arroz amorfa acima de 12%, metacaulim de 8% a 15%, todos em substituição ao cimento. Na RMR as adições mais utilizadas nos concretos são o Metacaulim e a Sílica Ativa.

2.6.4.3.1 METACAULIM

O Metacaulim é uma pozolana de alta eficiência, obtida por meio de moagem e calcinação de matérias-primas constituídas essencialmente por argilas especiais (caulim de alta pureza). Após ativação térmica entre 650-800° C, perdem os íons hidroxilos de sua estrutura cristalina transformando-se em metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$), composto amorfo com elevada desordem cristalina, sendo um material com alta atividade pozolânica (MCAR) (SILVA, 2013).

Conforme Malhotra e Metha (1996) as características físicas do metacaulim, como tamanho das partículas e área específica são um dos fatores essenciais que podem propiciar a alta atividade pozolânica, sendo chamado por alguns autores de metacaulim de alta reatividade (MCAR). Entretanto durante a calcinação das argilas ocorre a aglomeração das partículas resultando em uma maior granulometria. Com isso é necessário realização de moagem para que o metacaulim e o MCAR atinjam todo o potencial de suas atividades pozolânicas. O MCAR também pode ser obtido da indústria produtora de cobertura de papel o qual consiste em um caulim de extrema finura, brancura e pureza.

Estudos indicam um aumento da resistência mecânica do concreto a tração e na durabilidade, redução na porosidade e capilaridade, tornando o concreto menos permeável e inibindo a penetração e ação de agentes agressivos que podem reagir com a pasta do cimento.

2.6.4.3.2 SÍLICA ATIVA

A Sílica Ativa, é um tipo especial de pozolana, é normalmente proveniente do processo de produção das indústrias de ferrosilício e silício-metálico. O Silício é produzido em grandes fornos elétricos de fusão, do tipo arco-voltaico, e o quartzo é reduzido pelo carbono em altas temperaturas. O resultado é a produção a altas temperaturas do monóxido de silício (SiO), que se condensa às temperaturas mais baixas formando o dióxido de carbono (SiO₂). O teor de SiO₂, presente nesta pozolana fica em torno de 80% (SILVA, 2013).

Nos materiais cimentícios a sílica ativa pode ser utilizada para aumentar a resistência mecânica e compacidade, em virtude das reações pozolânicas e do

efeito microfíler que acontece em função da diminuição da porosidade total devido ao preenchimento dos vazios de gel e de poros capilares. Com isso a sílica ativa é proposta como um produto alternativo para aperfeiçoar as propriedades de concretos e argamassas. Quando utilizada no concreto fresco colabora com a diminuição da segregação e da exsudação, porém é necessário a utilização de plastificantes e superplastificantes para garantir a trabalhabilidade da mistura (MARIA, 2011).

2.7 MEDIDAS ADOTADAS NAS RECUPERAÇÕES DAS FUNDAÇÕES

Após vários estudos diretrizes diferentes são traçadas com o propósito de interromper a reação e controlar seus danos. No entanto as medidas ainda são incertas, pois até o presente momento não se sabe da eficiência destes tratamentos e nem o tempo de sua durabilidade.

Diante dos vários aparecimentos de estruturas apresentando expansões, por causa da reação Álcali Agregado, principalmente em obras que utilizaram agregados reativos sem a adoção de medidas preventivas, é imprescindível que seja adotada uma rotina de manutenção e acompanhamento dessas obras, a fim de se evitar que o estado limite de utilização ou de ruptura possa ser atingido. Dessa forma, as medidas mitigadoras passam a ter um papel fundamental no acréscimo da vida útil das estruturas existentes (SILVA, 2007).

Andriolo (1997) relata, em seu trabalho sobre conservação de estruturas afetadas pela RAA, uma série de medidas que podem ser adotadas para inibir ou diminuir os efeitos provocados pela ação deletéria do gel. Entre essas medidas estão:

- ✚ Aplicação de impregnantes, penetrante, selantes e membranas;
- ✚ Reforços estruturais;
- ✚ Liberação de deformações;
- ✚ Demolição e reconstrução.

As medidas corretivas descritas têm sido largamente utilizadas nos processos de recuperações, e têm se mostrado bastante eficientes. Na Figura 07 visualiza-se

um bloco de fundação com as fissuras laterais recuperadas. Porém as recuperações de peças afetadas pela reação Álcali Agregado precisam ser acompanhadas e monitoradas para certificar-se sobre sua completa reabilitação.

Figura 07: Bloco em Processo de Recuperação



Fonte: Autora, 2019.

2.8 RECUPERAÇÕES E REPAROS

2.8.1 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

O concreto de cimento Portland é o material tradicionalmente usado em reparos e reforços. Na grande maioria das vezes requer um traço especialmente formulado que altere para melhor algumas de suas características naturais. Pode ser necessário obter altas resistências iniciais, ausência de retração de secagem, leves e controladas expansões, elevada aderência ao substrato, baixa permeabilidade e outras propriedades obtidas à custa do emprego de aditivos e adições tais como plastificantes, redutores de água, impermeabilizantes, escória de alto forno, cinza volante, microsílica e via de regra, baixa relação água/cimento (HELENE, 1992).

No caso dos preparos de concretos dosados no próprio canteiro para utilização em recuperações e reforços passam a ser inviáveis para obtenção de resultados com elevado desempenho, a não ser que haja o acompanhamento de técnicos e de pessoal especializado em tecnologia de concreto.

Embora se pense erroneamente que o concreto poderá durar eternamente, desde que recebe as manutenções necessárias, ocorrem manifestações patológicas com intensidades e incidências significativas, resultando em custos onerosos em sua recuperação. Trata-se de um quadro que compromete no tocante aos aspectos estéticos e, na maioria das vezes, redução da capacidade resistente, podendo chegar, em certas situações, ao colapso parcial ou total da estrutura.

Frente a essas manifestações patológicas observa-se, em geral, um descaso inconsequente que leva a simples reparos superficiais ou, inversamente, a demolições ou reforços injustificados. Os dois extremos são desaconselháveis uma vez que há, hoje em dia, uma elevada gama de técnicas e produtos desenvolvidos especificamente para solucionar esses problemas (HELENE, 1992).

Segundo estudos, uma elevada percentagem de manifestações patológicas tem origem na etapa de planejamento e projeto. Na Figura 08 demonstram-se os percentuais relacionados as manifestações patológicas e os respectivos percentuais. As falhas ocorridas durante o planejamento conforme a figura representa 28% e a etapa de projeto com 40%, estas normalmente mais graves do que as falhas relacionadas a qualidade. As falhas ocorridas com os materiais representam 18%, com o uso 10% e o planejamento apenas 4%.

Figura 08: Percentuais das Falhas



Fonte: Adaptado de Paulo Helene, 1992.

O emprego de metodologias de inspeções e diagnóstico, baseados em técnicas, equipamentos e recuperações vigentes, é necessário para o entendimento dos mecanismos de ocorrência de tais manifestações patológicas, de forma a possibilitar a especificação das técnicas e dos materiais de reparo mais adequados para cada caso (FIGUEIREDO, 2005).

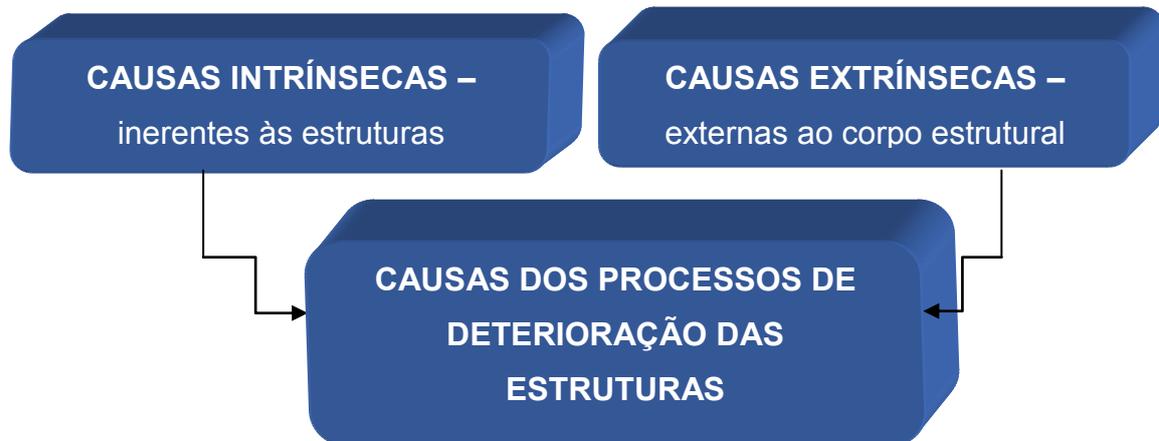
As manifestações patológicas são problemas frequentes e representam uma das maiores perturbações de uma edificação durante sua vida útil. E as ocorrências desses problemas estão ligadas à idade da construção, ao clima, aos materiais, técnicas construtivas aplicadas e ao nível de controle de qualidade realizado nas construções (JONOV, NASCIMENTO, SILVA, 2013).

2.8.2 CAUSAS

Ao se analisar uma estrutura de concreto “doente” é absolutamente necessário entender-se o porquê do surgimento e do desenvolvimento da doença, buscando esclarecer as causas, antes da prescrição e consequente aplicação do remédio necessário. O conhecimento das origens da deterioração é indispensável, não apenas para que se possa proceder aos reparos exigidos, mas também para se garantir que, após reparada, a estrutura não volte a se deteriorar (SOUZA, RIPPER, 2009).

Vários agentes podem ser causadores de problemas patológicos como: umidade, cargas, variações térmicas intrínsecas e extrínsecas ao concreto, agentes biológicos, incompatibilidade de materiais, agentes atmosféricos e outros. Segundo estudos recentes responsáveis por implantações, determinaram que as causas nos processos de deterioração das estruturas de concreto, foram classificadas conforme a Figura 09 a seguir:

Figura 09: Processos de Deterioração

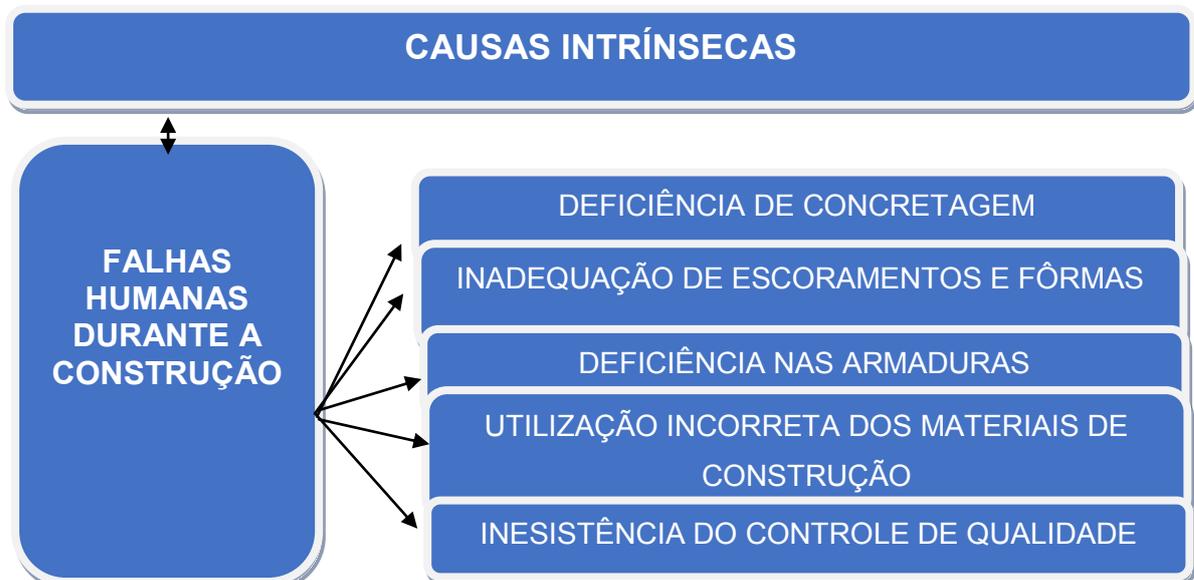


Fonte: Adaptado de Souza e Ripper, 2009.

2.8.2.1 CAUSAS INTRÍNSECAS

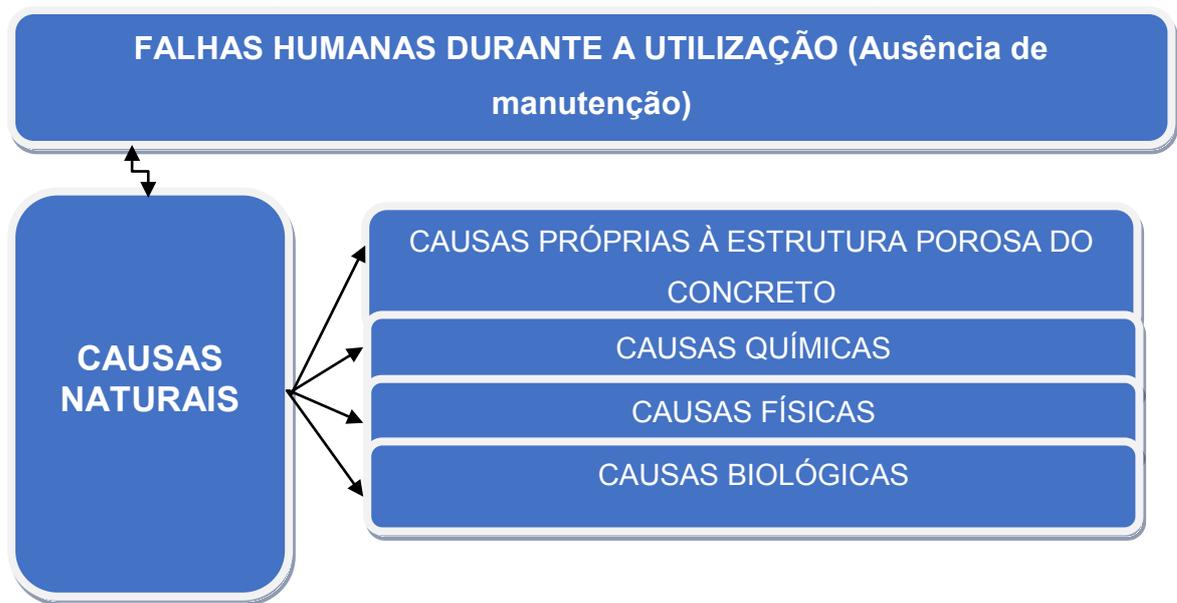
São causas inerentes às próprias estruturas, entendidas como elementos físicos. Significa dizer que tem origem nos materiais e peças estruturais durante as fases de execução e ou utilização das obras, por falhas humanas, por questões próprias ao material concreto e por ações externas, incluindo acidentes. A Figura 10 demonstra falhas humanas durante o processo construtivo que poderiam ser evitadas através de medidas efetivas de acompanhamento e fiscalização. E a Figura 11 falhas humanas em função da ausência de um planejamento de manutenção.

Figura 10: Detalhamento das Causas Intrínsecas



Fonte: Adaptado de Souza e Ripper, 2009.

Figura 11: Causas Intrínsecas por Falta de Manutenção



Fonte: Adaptado de Souza e Ripper, 2009.

Nas causas Químicas relacionam-se:

- ✚ **Reações internas ao concreto;**
- ✚ Expansibilidade de certos constituintes do cimento;
- ✚ Presença de cloretos;
- ✚ Presença de ácidos e sais;
- ✚ Presença de anidro carbônico;
- ✚ Presença de água;
- ✚ Elevação da temperatura.

A reação Álcali Agregado resulta das reações internas do concreto e da aderência entre o cimento e os agregados, desenvolvem-se combinações químicas entre os últimos componentes citados e os componentes hidratados do cimento.

2.8.2.2 CAUSAS EXTRÍNSECAS

Aquelas causas que independem do corpo estrutural em si, como por exemplo, a composição interna do concreto, ou de falhas inerentes ao processo de execução, podem ser vistas como fatores que atacam a estrutura “de fora para dentro”, durante as fases de concepção ou ao longo de sua vida útil, visualizadas na Figura 12.

Figura 12: Detalhamento das Causas Extrínsecas



Fonte: Adaptado de Souza e Ripper, 2009.

2.8.3 CONSEQUÊNCIAS

A consequência da atuação dos agentes intrínsecos e extrínsecos será a deterioração dos elementos de concreto e serão “sentidos” nas partes mais frágeis da estrutura. Normalmente os problemas poderiam ter sido resolvidos em outras etapas do processo, como, a escolha dos materiais, utilização de medidas preventivas no momento da construção, métodos de execução, pela elaboração de um projeto detalhado e um projeto com manutenções programadas.

Todavia alguns defeitos provocados por causas mecânicas, por sobrecargas e impactos para os quais a estrutura não foi dimensionada, ou a acidentes, como sismos e incêndios, não são facilmente evitáveis. E esses agentes podem causar danos consideráveis podendo leva-la até a ruína.

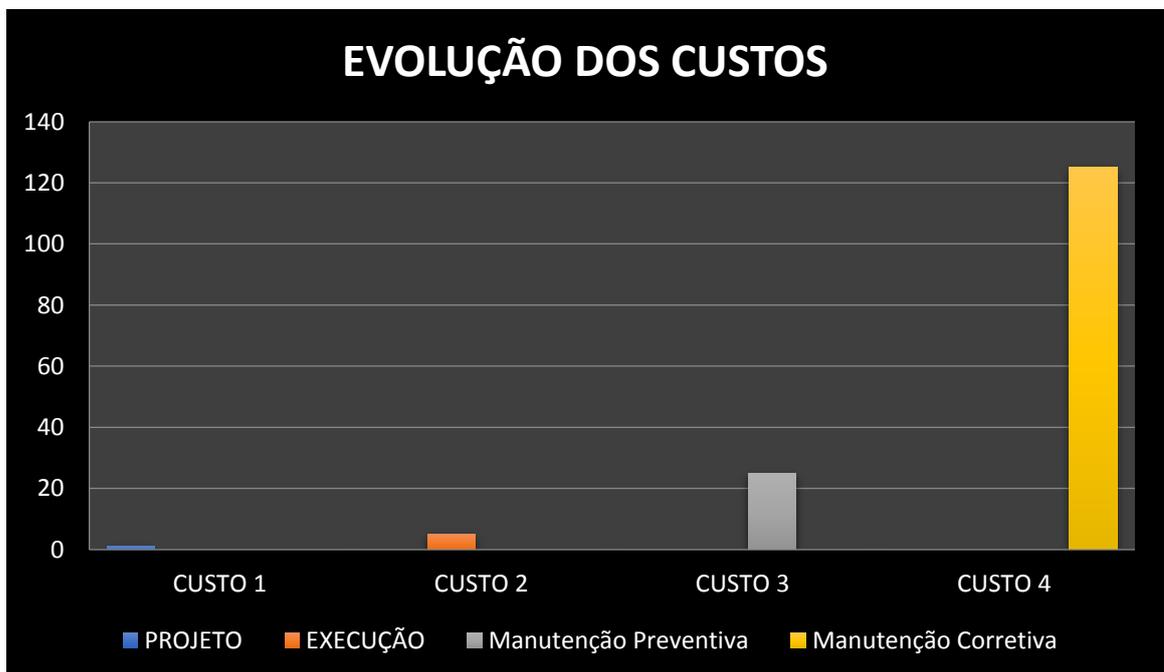
No caso dos problemas patológicos, com o passar do tempo evoluem e tendem a agravar a “saúde” da estrutura, além de acarretarem outros problemas associados ao inicial.

Segundo Helene, (1992) pode-se afirmar que as correções serão mais duráveis, mais efetivas, mais fáceis de executar e muito baratas quanto mais cedo forem executadas. A demonstração mais expressiva está na “Lei de Sitter” que mostra os custos crescendo segundo uma progressão geométrica. Dividindo as etapas construtivas e de uso em quatro períodos correspondentes ao projeto, à

execução propriamente dita, à manutenção preventiva efetuada antes dos primeiros três anos e à manutenção corretiva efetuada após o surgimento dos problemas, a cada uma corresponderá em custos, que se segue em progressão geométrica de razão cinco.

Interpretando a Figura 13, as informações sobre os custos, tem-se as seguintes considerações: o custo 1 é infimo, correspondente ao custo dos projetos executados com critérios e segundo o planejamento construtivo. Diferentemente temos o custo 2, que eleva-se significativamente em função de problemas causados durante a construção. O custo 3 referente a manutenção, tem-se obrigatoriedade na sua execução e se torna menos oneroso, quando executado conforme a necessidade da edificação, ou seja, seguindo um plano de manutenção. O custo 4, certamente o custo mais alto, demonstrado com clareza na figura, tornam-se mais dispendiosos em função da patologia que estará instaurada e devido ao tardio tempo de intervenção.

Figura 13: Lei de Sitter



Fonte: Adaptado de Paulo Helene, 1992.

2.8.3.1 PROJETOS

Medidas executadas durante a fase de projeto com o intuito de aumentar as proteções e a durabilidade da estrutura, como aumentar o recobrimento da armadura, reduzir o fator água/cimento do concreto, especificar tratamentos protetores superficiais, escolher detalhes construtivos adequados, especificar cimentos, aditivos e adições com características especiais, implica em itens que podem ser associados ao número 1, correspondente ao Custo 1.

2.8.3.2 EXECUÇÃO

Medidas como extraprojeto, executada e discutida durante a execução, incluindo nesse período a obra recém construída, implica num custo cinco vezes superior (Custo 2) ao custo que teria sido acarretado se esta decisão tivesse sido feita no momento do desenvolvimento do projeto, para obter resultados satisfatórios na proteção e durabilidade da estrutura.

2.8.3.3 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

A decisão de tomar medidas com antecedência e previsão durante o período de uso e manutenção necessária a estrutura, pode ser associado a um custo vinte e cinco vezes menor (Custo 3) que aquele gasto com a correção dos problemas gerados a partir de intervenções preventivas geradas com antecedência à manifestação de uma doença patológica. Caso essa manutenção ocorra com o problema instaurado, haverá um custo vinte e cinco vezes superior aquele anteriormente citado, se as medidas cabíveis houvesse sido tomadas em tempo hábil.

2.8.3.4 MANUTENÇÃO CORRETIVA

Na maioria das estruturas recuperadas e citadas nesta pesquisa, as manutenções foram corretivas em 100% dos casos relacionados, aquelas correspondentes aos trabalhos de diagnóstico, recuperação, reparo e proteção das

estruturas que se apresentam com enfermidades (doenças) que deverão ser tratadas para a “saúde” da estrutura ser restaurada.

A esta etapa pode-se associar um custo de cento e vinte e cinco por cento superior ao custo das medidas que poderiam ter sido tomadas a nível de projeto (Custo 4). A Figura 14 a seguir mostra o bloco de fundação com um quadro fissuratório decorrente da reação Álcali Agregado.

No Brasil o hábito de se fazer as manutenções preventivas não se trata de uma realidade. Normalmente o que se presencia são gastos de somas vultuosas em função da degradação das estruturas com problemas que se agravam ao longo do tempo, causando perdas, que poderiam ter sido diminuídas ou mesmo evitadas. Com base nestes dados fica evidenciado a importância da qualidade e do planejamento nas fases iniciais do projeto e execução, assim como a necessidade de planos de manutenções que sejam desenvolvidos e aplicados sistematicamente visando a durabilidade das estruturas.

Figura 14: Bloco com fissuras da RAA



Fonte: Autora, 2019.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A pesquisa desenvolvida para essa dissertação reporta-se a estudo de caso, desenvolvido nas cidades de Recife e Jaboatão dos Guararapes, locais onde ocorreu a maior quantidade de fundações assoladas pela reação Álcali Agregado, descritas nesta pesquisa. No Brasil até a presente data, todos os casos relatados da reação são exclusivamente do tipo Álcali Sílica (RAS), como será apresentada nas etapas que se seguem.

Neste trabalho serão expostas as características das edificações, diagnósticos, procedimentos e os resultados de uma coleta de dados obtidos através de consultas dos arquivos de empresas, assim como entrevistas que foram feitas junto aos engenheiros com atuação na área de recuperações, em cinquenta casos de fundações afetadas pela reação.

Vale ressaltar que não houve problemas e nem restrições por parte das empresas envolvidas no fornecimento das informações, mas se constatou um número pequeno do histórico de empreendimentos com fundações recuperadas. O que se remete ao fato de os condomínios fazerem seus orçamentos com empresas com experiências comprovadas e estas, ao emitirem seus pareceres com os materiais necessários para sanar os danos impostos pela reação deletéria, são dispensadas. Com o passar do tempo verifica-se que estas recuperações foram executadas por pessoas sem as habilidades necessárias que comprovem a eficiência dos serviços prestados. Partindo-se desse princípio essas fundações deixam de ser analisadas e por consequência os resultados destas recuperações possivelmente podem terminar em insucessos, em função de processos mal executados.

Apesar da reação ser conhecida há mais de 85 anos pelo meio técnico e suas formas de prevenção serem também bem difundidas, a deterioração do concreto resultante da reação ainda é considerada relevante, notadamente pela sua grave

repercussão nas fundações e pelos grandes transtornos trazidos às obras de infraestrutura e de edificação.

Baseado neste contexto e como Recife é a cidade com o maior número de casos da reação registrados na literatura Brasileira fez-se uma investigação para coleta de dados sobre o tema, iniciada em dezembro de 2018 e finalizada em julho 2019.

3.2 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida foi baseada em entrevistas no maior número possível de empresas que executaram recuperações em fundações afetadas pela Reação Álcali Agregado, através da aplicação de um questionário com 17 perguntas. A metodologia usada dividiu-se em quatro etapas conforme a Figura 15:

Figura 15: Metodologia Aplicada



Fonte: Autora, 2019.

3.2.1 TRANSCRIÇÃO DAS ENTREVISTAS

A primeira etapa desenvolvida fora as entrevistas com as empresas da cadeia construtiva, informando sobre o propósito da pesquisa e sobre a necessidade de dados atualizados quanto às fundações que foram recuperadas.

3.2.2 COLETA DE DADOS

Para esta pesquisa foram cadastradas informações de cinquenta edificações, comerciais e residenciais com fundações recuperadas.

Na cidade de Recife as recuperações foram em edifícios localizados nos Bairros das Graças, Casa Forte, Espinheiro, Derby, Boa Vista, Madalena, Boa Viagem, Setúbal, com ênfase para o Bairro de Boa Viagem.

Na cidade de Jaboatão dos Guararapes as recuperações foram em edifício localizado no Bairro de Piedade.

As empresas que participaram desde universo de informações foram bastante receptivas e forneceram os elementos necessários, partindo-se do princípio que a identidade dos edifícios elencados ficaria sob sigilo da pesquisa, assim como a identidade das empresas. Desta forma, cada empresa foi nomeada por uma letra, aleatória a seu nome.

A primeira empresa entrevistada A. Engenharia Ltda.

Fundada em 1995, empresa A é uma empresa que atua no campo da construção civil, especializada na área de recuperação e reforço de estruturas em concreto armado e protendido. Com um acervo de mais de 600 obras concluídas, 24 anos no mercado, conferindo em seu portfólio a excelência em construções de estruturas em ambientes marinhos, tratamento de concretos aparentes, recuperação e reforço de adutoras, reforço estrutural, entre outros.

Nesta empresa catalogou-se no período de dezembro 2018 e maio de 2019 trinta edificações, com quadro da reação identificado.

A segunda empresa a X Engenharia.

Criada em 1981, possui em seu portfólio de construção uma variada gama de edificações modernas, passando por estruturas portuárias, empreendimentos

imobiliários, obras de arte especiais, recuperação e reforço estrutural em edifícios e obras de arte e conservação e restauração de Patrimônio Histórico.

Nesta empresa catalogaram-se três edificações, com quadro da reação identificado, incluindo a recuperação de um edifício comercial. Porém as demais recuperações executadas pela empresa em questão fogem da proposta deste trabalho, que apesar de tratar-se da recuperação de fundações com RAS, não se trata de construções residenciais ou comerciais.

A terceira empresa foi Y Engenharia.

Constituída em abril de 2000, tendo como objetivo a prestação de serviços técnicos especializados no setor da construção civil, englobando restauração e reforços em elementos estruturais de concreto armado, sendo este o destaque de suas atividades. Os serviços especializados de restauração e reforço estrutural tornam delicada a divulgação nominal das obras que constituem seu acervo técnico, que consta aproximadamente 350 trabalhos executados. Nesta empresa catalogaram-se sete edificações que passaram pelo processo de recuperação.

A quarta empresa foi a Z. Engenharia.

Com mais de 12 anos de existência e experiência, exercendo atividades de prestação de serviços técnicos de engenharia civil nas áreas de recuperação e manutenção de edificações. Nesta empresa catalogaram-se três edificações, com quadro da reação identificado.

A quinta empresa T Engenharia.

Fundada em janeiro de 2003 na cidade do Recife, hoje possui atuação nacional e em sua carteira mais de 500 clientes atendidos. Os serviços oferecidos na área de assistência técnica pericial, consultorias, gerenciamento e fiscalização das obras, laudos periciais, monitoramento e acompanhamento técnico, entre outros. Nesta empresa catalogaram-se sete edificações, com quadro da reação identificado.

Foram verificados nos acervos os trabalhos de recuperações executados após 2004, período pelo qual as recuperações se intensificaram, o Quadro 05 tem o levantamento geral das empresas consultadas, demonstrando sua atuação e o total de fundações detectadas.

Quadro 05: Empresas Participantes da Pesquisa

EMPRESA	ATUAÇÃO	EXPERIÊNCIA	TEMPO EXPERIÊNCIA	NÚMERO DE CASOS
A	Recuperação de estrutura	Estruturas marinhas, tratamentos de concretos, recuperação e reforço.	24 anos	30
X	Recuperação de estrutura	Estruturas portuárias, obras de arte especiais, recuperação e reforço e restaurações.	38 anos	03
Y	Recuperação de estrutura	Recuperação e reforço de fundações.	19 anos	07
Z	Recuperação de estrutura	Recuperação e reforço de fundações e manutenções prediais.	12 anos	03
T	Acompanhamento da recuperação	Assistência técnica pericial, consultorias, laudos e monitoramento e acompanhamento técnico.	16 anos	07
TOTAL				50

Fonte: Autora, 2019.

3.2.3 APLICAÇÃO DO QUESTIONÁRIO

A terceira etapa correspondeu à aplicação de um questionário de quinze perguntas relativas a edificações comerciais e residenciais onde a patologia da RAS estava comprovada e recuperada. Na aplicação do questionário, demonstrado no Quadro 06 buscaram-se informações sobre a manifestação patológica, historiando as características do empreendimento, como foi determinado o diagnóstico, o processo de recuperação e os custos.

3.2.4 VERIFICAÇÃO DOS DADOS

Com os dados coletados iniciou-se a quarta etapa referente à análise de todo material adquirido na pesquisa, buscando-se fotos, relatos e resultados de ensaios para contribuição do material pesquisado.

3.2.5 DISCURSSÕES

Por fim com a verificação de todo o material colhido, têm-se os subsídios para analisar as características do empreendimento, procedimento aplicado na determinação da manifestação patológica e o processo de recuperação utilizado.

Constatou-se que as intervenções nas fundações ocorreram em função da necessidade de verificar qual o estado em que se encontravam. Acredita-se que essas investigações ocorreram devido a dois fatores preponderantes. O primeiro em função do colapso do edifício Areia Branca que colocou os condôminos em estado de alerta para verificações de suas estruturas e o segundo da obrigatoriedade impostas pela Lei Nº 13341, que tornou obrigatória as inspeções periódicas, identificando assim, um maior número de fundações recuperações e outras patologias antes desprezados em função do pouco hábito de manutenção. Na Figura 16 visualiza-se um bloco de fundação sendo recuperado com a colocação dos purgadores plásticos.

Figura 16: Bloco com Purgadores.



Fonte: Autora, 2019.

Quadro 06: Questionário Utilizado na Pesquisa.

 PESQUISA PARA COLETA DE DADOS PARA DISSERTAÇÃO DO MESTRADO	
Empreendimento:	
1.0	Características da Edificação:
1.1	Qual a finalidade do empreendimento ?
	Residencial <input type="checkbox"/> Comercial <input type="checkbox"/>
1.2	Quantos pavimentos ?
1.3	Qual altura do nível do lençol freático ?
1.4	Qual a idade da edificação ?
1.5	Como descobriu o problema ? Quais os sintomas encontrados ?
1.6	Qual a distância do mar para a edificação ?
1.7	Qual o tipo de fundação da edificação ?
2.0	Como foi feito o Diagnóstico?
2.1	Local da incidência das fissuras na edificação:
2.2	Como foi diagnosticada a patologia ?
2.3	Quais os ensaios que foram executados para determinar a patologia ?
3.0	Como foi feita a recuperação ?
3.1	Quais as etapas que foram seguidas ?
3.2	Como foi feito o preenchimento das fissuras ? Quais os equipamentos utilizados na recuperação ?
3.3	O Projeto de reforço foi elaborado pelo Caculista?
3.4	Foi feito Encamisamento ?
	Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
3.5	Foi feita Impermeabilização ?
4.0	Quem foram os responsáveis pelos custos da recuperação?
4.1	Quem foi o responsável pelo pagamento ?
4.2	Foi deixada uma janela de inspeção após a recuperação?
5.0	Observações:

Fonte: Autora, 2019.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISES DOS DADOS

Para análises dos dados dividiu-se o questionário em quatro partes. A primeira onde se historiaram as características da edificação, a segunda dissertou-se sobre o diagnóstico, a terceira como foi feita a recuperação e por último os custos dispensados na recuperação, demonstrado na Figura 17.

Figura 17: Composição do Questionário



Fonte: Autora, 2019.

4.1.2 CARACTERÍSTICAS DAS EDIFICAÇÕES

As primeiras informações coletadas foram apresentadas as características das edificações compondo-se de sete perguntas, pelas quais se pode ter uma ideia relevante de algumas situações relacionadas a fatores preponderantes para o aparecimento da reação. As perguntas seguiram-se com a seguinte ordenação: a finalidade do empreendimento, o número de pavimentos, a altura do lençol freático, a idade da edificação, como se descobriu o problema e quais os sintomas encontrados, distância do mar para a edificação e o tipo de fundação.

4.1.2.1 FINALIDADE DO EMPREENDIMENTO

Basicamente, dos 50 empreendimentos verificados, apenas 4% são edificações comerciais e 96% são edifícios residenciais. Neste caso, a maioria das edificações verificadas atualmente compõe-se efetivamente de edifícios residenciais, conforme registrado pelos pesquisadores, demonstrado na Figura 18 a seguir:

Figura 18: Finalidade do Empreendimento



Fonte: Autora, 2019.

4.1.2.2 NÚMERO DE PAVIMENTOS

O universo da pesquisa situa-se em edifícios que variavam a quantidade de pavimentos. A contagem foi elaborada levando-se em consideração os pavimentos comuns como subsolo, térreo, vazado(s), pavimentos tipos e a cobertura.

A Figura 19 demonstra os percentuais referentes aos números de pavimentos para edifícios com até 15 pavimentos, em seguida para edifícios de 16 a 25 pavimentos e por último para edifícios com mais de 25 pavimentos, chegando até 41 pavimentos, perfazendo um total de 50 empreendimentos catalogados.

Figura 19: Número de Pavimentos



Fonte: Autora, 2019.

4.1.2.3 ALTURA DO LENÇOL FREÁTICO

Como a ocorrência da RAS está diretamente ligada a três fatores: álcalis normalmente provenientes do cimento, agregado reativo e água. Nesta pesquisa buscou-se identificar se ao longo do processo da recuperação foi encontrada água que pudesse favorecer no aparecimento da reação.

No momento em que a fundação foi escavada procurou-se identificar se havia água proveniente de alguma fonte, seja ela do lençol freático ou mesmo de alguma outra condição.

Em parte das fundações onde o nível do lençol freático foi identificado, os elementos estavam parcialmente ou apenas com água no nível inferior do elemento. Em se tratando desta reação, é equivocado pensar que o fenômeno se desenvolve apenas em elementos de concretos em contato direto com água, pois aqueles que estejam apenas com o nível inferior do bloco em contato com água estão susceptíveis à reação.

Durante as entrevistas, em algumas empresas a informação estava disponibilizada, em outros casos foi possível identificar através dos acervos das

fotos, outras situações na verificação da composição dos custos do orçamento que trazia o dado de rebaixamento do lençol freático, ou seja, os trabalhos de recuperação só poderiam ser executados através do rebaixamento do lençol, e por ser desconhecido o nível em que a água estava estabelecida naquela fundação, considerou-se neste caso, água na parte inferior do bloco. Em outros casos não havia qualquer informação a respeito da presença da água, então se considerou nível do lençol freático não encontrado.

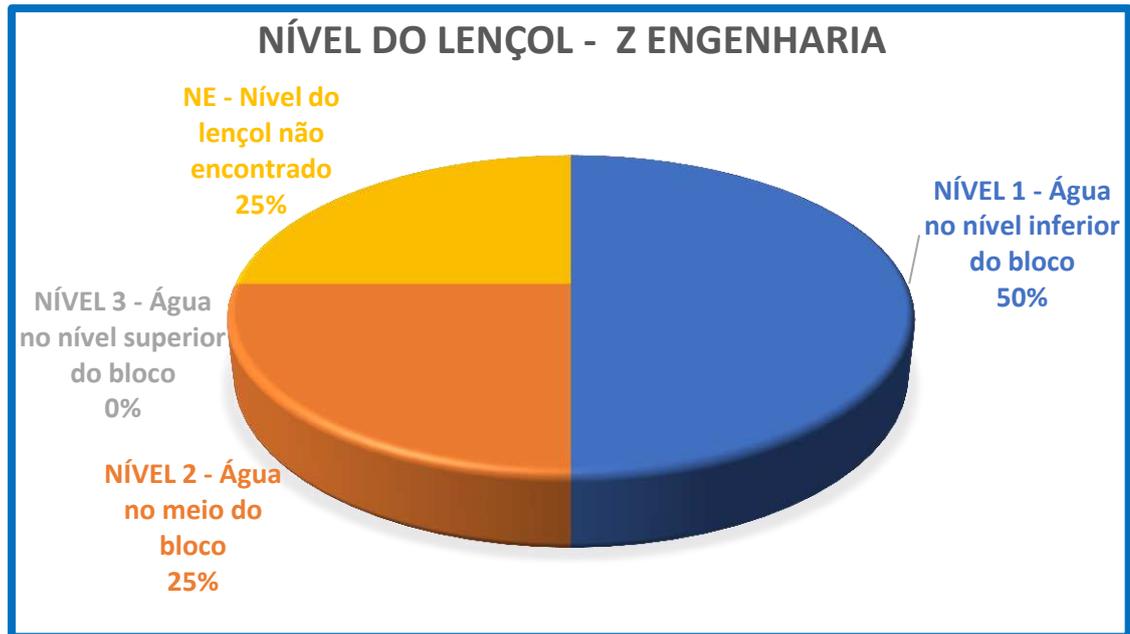
Partindo-se dessas premissas, este tópico dividiu-se em quatro estágios, onde se encontrava o nível do lençol freático em relação à cota do elemento da fundação: Nível 1, Nível 2, Nível 3 e NE, descritos abaixo:

- ✚ Nível 1: água no nível inferior do bloco;
- ✚ Nível 2: água no meio do bloco;
- ✚ Nível 3: água no topo do bloco;
- ✚ NE: nível do lençol freático não encontrado.

As figuras demonstradas a seguir foram colocadas em função dos resultados coletados por cada empresa entrevistada. Devido à importância dessa informação, saber se as fundações estavam inseridas em ambientes úmidos, um dos fatores condicionantes para o desencadeamento da reação, cada resultado específico desta informação foi exposto por empresa.

Nos resultados coletados na pesquisa com a empresa Z Engenharia, demonstrado na Figura 20, verificou-se que o nível 1 ocorreu em 50% das fundações com a presença da água na parte inferior do bloco e nível 2 em 25% dos casos com a água no meio do bloco. Em ambas as situações a presença da água teve seu papel decisivo no aparecimento da reação. O nível 3, com nível do lençol no topo do bloco, não foi identificado e em 25% das fundações não se obteve resposta com relação ao nível do lençol freático.

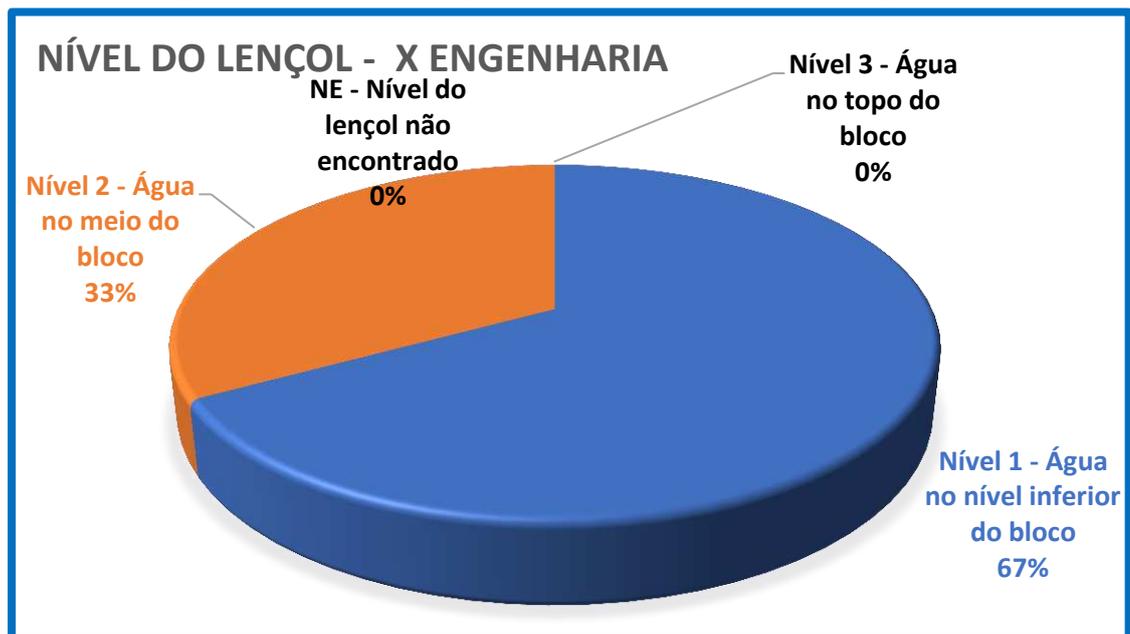
Figura 20: Níveis dos Lençóis encontrados na empresa Z Engenharia



Fonte: Autora, 2019.

Nos materiais coletados da empresa X Engenharia o nível 1, nível de água no nível inferior do bloco foi encontrado em 67% das fundações, o nível 2, água no meio do bloco esteve em 33% das fundações e o nível 3 não foi identificado, apresentado na Figura 21.

Figura 21: Níveis dos Lençóis encontrados na empresa X Engenharia



Fonte: Autora, 2019.

Levando-se em consideração as afirmações sobre a participação da água na reação, estas fundações pesquisadas encontram-se com parte ou metade de suas peças estruturais com a presença da água. E neste caso um dos edifícios citados, com 21 sapatas isoladas, se encontrava, na época da recuperação com 30 anos de idade e com quadro fissuratório bastante elevado. A solução encontrada pelo Engenheiro calculista foi criar 21 novos blocos de fundação sobre as antigas sapatas, com armaduras de encamisamento e um Fck superior ao do projeto inicial, conforme a Figura 22.

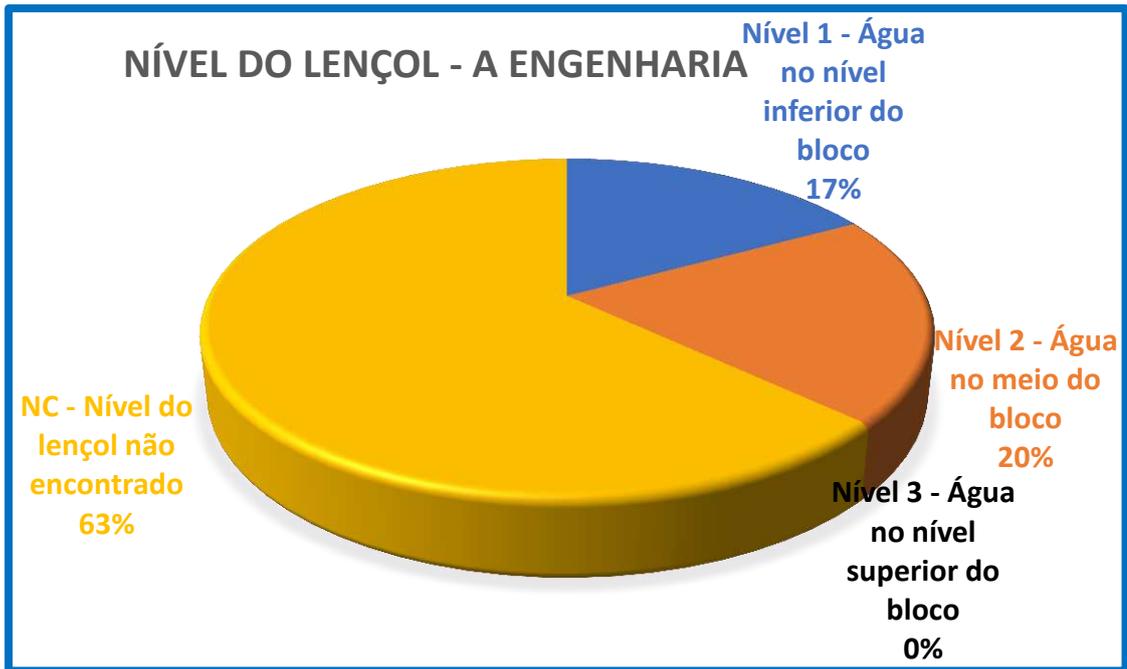
Figura 22: Sapata sendo Recuperada com Armadura



Fonte: Autora, 2019.

Nas entrevistas com a empresa A Engenharia onde se coletou informações de 30 fundações recuperadas as respostas analisadas formularam as seguintes informações: para o nível 1 verificou-se que 17% das fundações tinham água na parte inferior do bloco, para o nível 2, 20% das fundações a altura do lençol freático estava no meio do bloco; o nível 3 foi inexistente. Apesar da relevância desta informação, infelizmente neste universo em 63% das fundações verificadas não foi possível identificar onde se encontrava o nível do lençol freático, demonstrado na Figura 23. Em alguns casos como as recuperações foram executadas no início da descoberta da reação, alguns dados ficaram perdidos ou não foram registrados na época da recuperação.

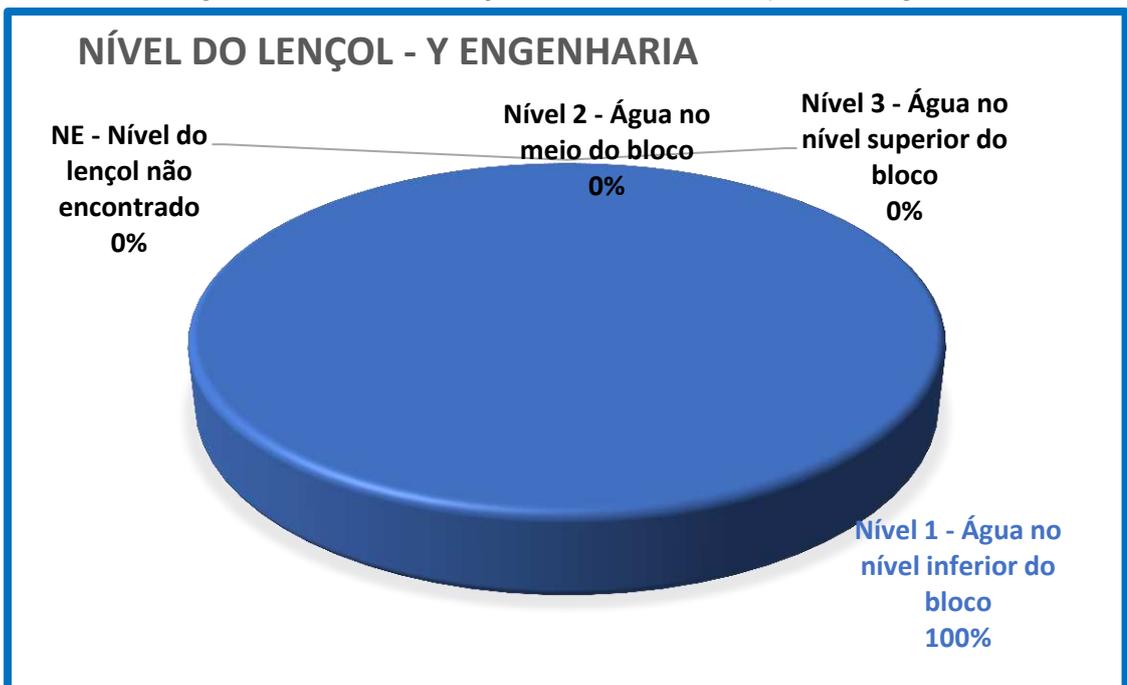
Figura 23: Níveis dos Lençóis encontrados na empresa A Engenharia



Fonte: Autora, 2019.

Nos dados recolhidos da empresa Y Engenharia, todas as fundações tiveram o nível do lençol freático identificados e foram catalogados como nível 1, ou seja, água abaixo do nível do bloco, conforme demonstrado na Figura 24.

Figura 24: Níveis dos Lençóis encontrados na empresa Y Engenharia



Fonte: Autora, 2019.

A última empresa pesquisada foi a T Engenharia e os resultados foram apresentados na Figura 25. Das fundações pesquisadas 66% enquadraram-se no nível 1, água no nível inferior do bloco. Encontrou-se 17% fundações com o nível do lençol com água no meio do bloco, correspondendo ao nível 2, o nível 3 não foi identificado e nível do lençol não encontrado representando 17% das fundações pesquisadas.

Figura 25: Níveis dos Lençóis encontrados da empresa T Engenharia



Fonte: Autora, 2019.

Depois de todas as análises por empresa, desenvolveu-se o Quadro 06 onde os resultados do levantamento dos lençóis freáticos foram resumidos e abordados de forma geral em relação às cinquenta fundações. Como resultado obteve-se 40% com água no nível inferior do bloco, nível 1; para o nível 2 encontrou-se 18% das fundações com água no meio dos blocos; o nível 3 não identificado. Não foram encontradas as informações do nível do lençol freático em 42% das fundações pesquisadas.

Quadro 07: Níveis dos Lençóis encontrados.

RESUMO DOS NÍVEIS DOS LENÇÓIS				
EMPRESAS	NÍVEL 1 - Água no nível inferior do bloco	NÍVEL 2 - Água no meio do bloco	NÍVEL 3 - Água no topo do bloco	NE – Nível não encontrado
Z ENGENHARIA	50%	25%	0	25%
X ENGENHARIA	67%	33%	0	0
A ENGENHARIA	17%	20%	0	63%
Y ENGENHARIA	100%	0	0	0
T ENGENHARIA	61%	17%	0	17%
TOTAIS	40%	18%	0	42%

Fonte: Autora, 2019.

4.1.2.4 IDADE DA EDIFICAÇÃO

Outro esforço da pesquisa foi tentar identificar as idades de cada edificação, ou seja, a partir do ano 1, após a conclusão da construção até o momento que foi catalogada pela empresa responsável por sua recuperação. Porém não é uma informação que as empresas tenham disponibilizado em todos os casos estudados. Verificaram-se edificações que apresentaram idades distintas no momento de sua recuperação por RAS.

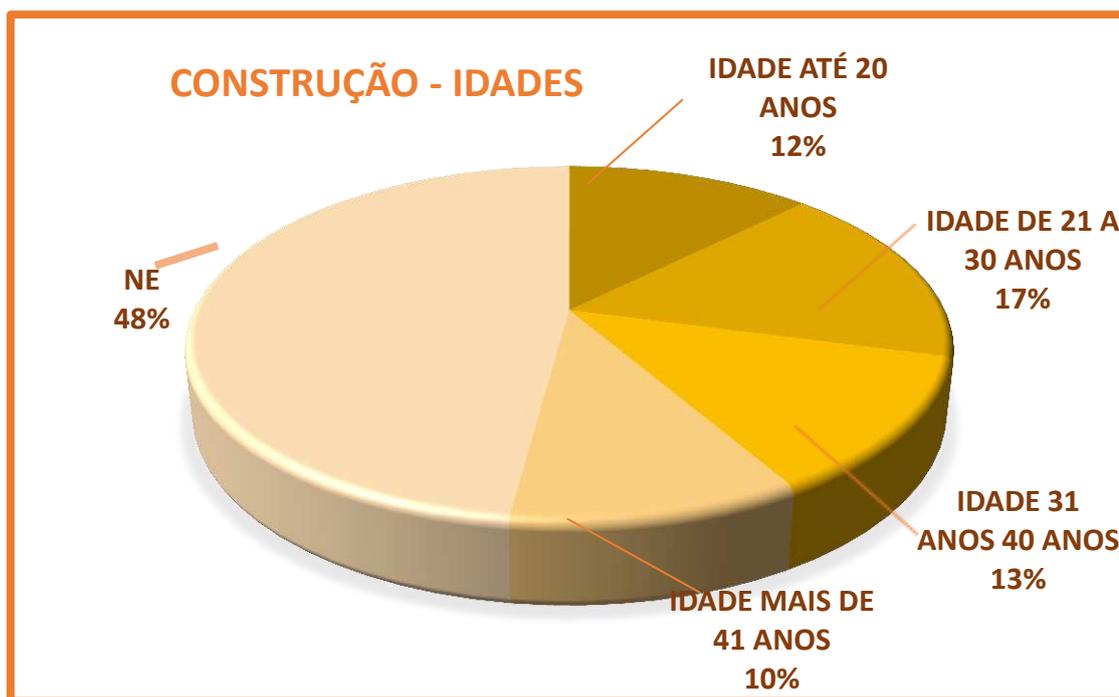
Encontraram-se edificações com treze anos no momento de sua recuperação, com fundação em sapatas, outras edificações referem-se a fundações em blocos sobre estacas e sapatas com idades de 16, 19, 20, 30 até 45 anos. Na Figura 26 as informações foram citadas considerando-se as idades construtivas da edificação até 20 anos, depois dos 21 aos 30 anos, em seguida dos 31 aos 40 anos e por fim 41 anos em diante e seus respectivos percentuais para essas abrangências de idades.

As descobertas dessas fundações atingidas pela reação ocorreram em função das situações adversas citadas anteriormente, como o colapso do edifício Areia Branca e por consequência o surgimento da Lei que obrigava os condomínios a fazerem inspeções. A partir daí as descobertas, com idades construtivas diferenciadas, e quadros agravados ou não da reação, foram determinantes, após as constatações da reação através de ensaios, como o ensaio Petrográfico, identificando o grau de agressividade instaurado naquele elemento de fundação, que

poderia servir de parâmetro quanto à necessidade de uma intervenção urgente ou não.

Ainda se registraram que os anos em que as recuperações ocorreram foram em períodos variados, mas principalmente em 2005, 2008, 2009, 2011, 2012, e se estendem até os dias de hoje.

Figura 26: Idades das Construções Presentes na Pesquisa



Fonte: Autora 2019.

4.1.2.5 DESCOBERTA DA MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA E OS SINTOMAS ENCONTRADOS

Normalmente dificuldades associadas às interpretações sobre ocorrências de fissuras ou danos de estruturas, ultimamente tem sido recorrente. Os problemas podem ter sido ocasionados por vários fatores como falhas ocorridas durante a fase de concepção de projeto, utilização de materiais incorretos, processo construtivo deficiente e ou devido à falta de manutenção.

As fissuras podem ser consideradas manifestações patológicas características das estruturas de concreto, sendo mesmo o dano de ocorrência mais comum e aquele que, a par das deformações muito acentuadas, mais chama a

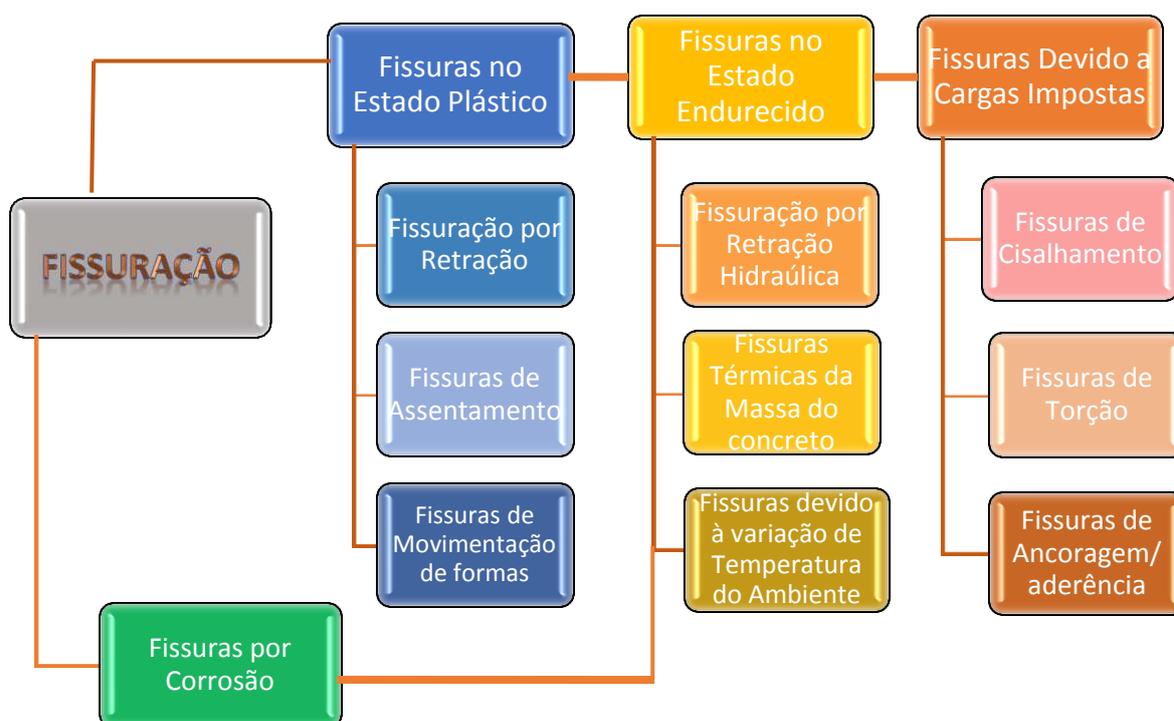
atenção de leigos, proprietários e usuários aí incluídos, para o fato de que algo de anormal está a acontecer (SOUZA, RIPPER, 2009).

Segundo Castro (2004) a presença de fissuras em estruturas de concreto armado não é, necessariamente, indicação de deficiências de resistência ou funcionamento e não deve ser, em geral, causa para alarme, considerando que o concreto estrutural é projetado considerando a possibilidade de fissuração.

Variados são os mecanismos responsáveis pelo aparecimento das fissuras, que podem ocorrer durante o período de sua construção no concreto em seu estado plástico, no estado endurecido, durante o processo de uso por suas cargas impostas e devido à corrosão de armaduras.

Classificar as fissuras através de seu comportamento, ou seja, determinar suas causas, de forma que se possam estabelecer metodologias e proceder com os reparos de recuperação é necessário para que o método a ser executado seja responsável por eliminar as causas e sanar os problemas apresentados. A seguir na Figura 27 descrevem-se alguns dos principais mecanismos de deterioração que podem ocorrer durante a vida útil de uma estrutura de concreto através das fissuras.

Figura 27: Classificação das Fissuras



Fonte: Autora 2019.

Os sintomas são problemas patológicos que apresentam manifestações externas características, a partir das quais se pode deduzir qual a natureza, a origem e os mecanismos dos fenômenos envolvidos, bem como se podem estimar suas prováveis consequências. Esses sintomas, também denominados lesões, danos, defeitos ou manifestações patológicas, podem ser descritos e classificados, orientando um primeiro diagnóstico, a partir de minuciosas e experientes observações visuais (HELENE, 1992).

Nesta pesquisa os sintomas encontrados quase que se confundem com a descoberta da patologia, pois em 80% dos casos identificados as causas citadas foram às fissuras. Estas que normalmente propagam-se sobre o piso, e em alguns casos foram encontrados pelos pilares do subsolo, térreo ou pilotis, são identificadas por tornar o aspecto do ambiente anormal, em função da patologia inserida sobre os blocos ou sapatas, que demonstram suas evidências no piso imediatamente superior, como observado na Figura 28, a imagem do bloco de fundação com RAS.

Figura 28: Bloco Afetado por RAA.



Fonte: Autora, 2019

4.1.2.6 DISTÂNCIA DO MAR PARA A EDIFICAÇÃO

Analisou-se este item em função da proximidade com área marinha, que segundo a NBR 6118: (2014), considera-se com o Grau de Agressividade III, considerado forte.

Verificou-se que a maior parte das fundações recuperadas 54% se situam na zona Sul, no Bairro de Boa Viagem. As demais fundações encontram-se na zona Norte, em áreas mais afastadas. Normalmente, a zona Sul, nesta área, o nível do lençol freático é alto o que poderia possivelmente ter possibilitado um ambiente propício para o desencadeamento da reação nas fundações.

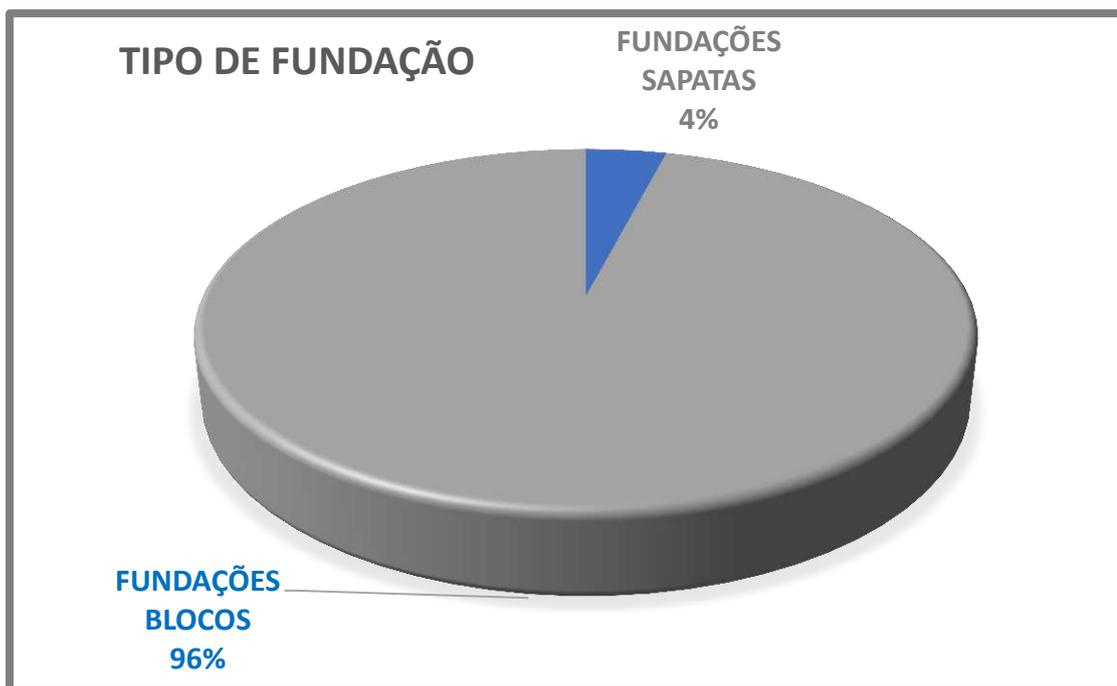
4.1.2.7 TIPO DE FUNDAÇÃO

Nas fundações um dos sintomas mais comuns encontrados foi relatado como fissuras. São inúmeras dificuldades em interpretar as patologias causadas pela Álcali Sílica (RAS). Porém é correto afirmar que uma estrutura afetada por essa reação, terá a presença do gel exudado, resultante da reação. Inicialmente, nos primeiros estágios, ou sob condições onde pequenas quantidades foram formadas, a RAS não pode ser visualizada a olho nu, necessitando de especialistas e ensaios executados em amostras retiradas do elemento afetado, para detectá-la.

Segundo Silva (2013) em sua pesquisa verificou-se junto a renomados calculistas, atuantes no mercado imobiliário da construção civil, que algumas mudanças foram inseridas nos projetos de fundações com o propósito de mitigar os efeitos deletérios da reação. Houve a alteração no detalhamento das armaduras dos elementos de fundação, principalmente nos blocos de coroamento das estacas por terem elevados volumes de concreto, dispondo de armaduras com maiores espessuras nas laterais e na parte superior (através de malhas formando uma gaiola), a fim de evitar ou minimizar possíveis fissuras devido a alguma expansão do concreto.

No caso dessa pesquisa como as edificações em questão tinham idades superiores aos 15 anos, os projetos não tinham passado por mudanças no tocante à reação. Na Figura 29 visualiza-se que, dos cinquenta empreendimentos citados, apenas dois possuíam fundações em sapatas como elemento de fundação, ou seja, apenas 4%, os outros 96% eram de fundações em blocos.

Figura 29: Tipos de Fundações



Fonte: Autora, 2019.

Nos blocos de fundação encontrou-se variadas formas e dimensões sobre estacas metálicas, pré-moldadas ou hélice contínua.

Um relato importante foi da recuperação da fundação de uma edificação com 27 pavimentos tipos, um térreo e um vazado como pavimento de garagem, aporticada em concreto armado e vedações em alvenaria. A fundação composta por 30 blocos, apoiados sobre estacas tipo Franki estava em estado avançado da reação RAS, após constatações através do ensaio Petrográfico, elaborado pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Através de um projetista, determinou-se que as tensões provocadas pela reação não seriam suficientes para provocar ruína nas bielas de compressão, sendo absorvidas por estas. Porém a zona de tração necessitava de reforço decorrente das tensões de massa de expansão do concreto. Partes dos blocos foram recuperadas com um reforço de armadura ativa (barras de Dywidag), os demais blocos com armadura convencional. Em um dos blocos a espessura das fissuras estava na ordem de 70 mm e havia ruptura de estribos. Na Figura 30 traz uma fissura de 4,5 mm no bloco sendo aferida.

Figura 30: Aferição das Espessuras das Fissuras



Fonte: Autora, 2019

Em alguns dos casos, durante as inspeções visuais, o quadro fissuratório encontrado era tão evidente, que segundo as informações relatadas, não restavam alternativa aos condomínios, apenas as recuperações, como a Figura 31. Esta, bastante onerosa, levou algumas vezes, os gestores responsáveis pela administração dos edifícios a dividirem em algumas etapas os processos de recuperações, levando as empresas a parcelarem a execução dos serviços ou em outras situações mais de uma empresa participariam, em momentos diferentes, das recuperações.

Figura 31: Fissuração do Bloco



Fonte: Autora, 2019.

Estas constatações levaram algumas empresas a declinarem da execução da recuperação de elementos de fundações. Segundo depoimentos houve situações em que a execução foi estendida por cerca de um ano inviabilizando sua participação.

4.2 DIAGNÓSTICO

O diagnóstico de estruturas de concretos afetados pela reação Álcali Agregado envolve as etapas de coleta de informações, inspeção visual, ensaios em amostras dos materiais componentes do concreto e de testemunhos extraídos da estrutura, a auscultação por meio de instrumentação e acompanhamento de sua evolução por modelagem matemática (PRISZKULNIK, 2005).

As informações coletadas dizem respeito às condições ambientais do local onde está inserido a estrutura, temperatura, umidade e ventos. Primeiramente fez-se necessário a verificação dos projetos e registros relacionados à construção.

Com a primeira etapa executada, a retirada dos pisos inseridos sobre a fundação, iniciou-se o processo de investigação. A investigação visual da estrutura teve como principal objetivo mapear o quadro fissuratório, identificando a presença do gel pelas fissuras ou o preenchimento de vazios no concreto, abertura de juntas, deslocamentos, travamentos ou mesmo a mudança de equipamentos em função de possíveis deslocamentos.

O diagnóstico das fundações afetadas foi construído através das informações visuais, e das respostas concretas dos resultados dos ensaios executados nos testemunhos que concluíram a existência da reação Álcali Sílica. Situações detalhadas foram relatadas sobre o estado em que se encontravam as fundações afetadas pela reação, como a formação das fissuras visualizadas conforme a Figura 32, o aparecimento do gel e outras evidências descritas a seguir:

- ✚ Fissuras em forma de mapa nas peças não armadas ou com baixa densidade de armação;
- ✚ Preenchimento dos poros do concreto com gel resultante da reação;
- ✚ A existência de uma borda de reação em torno do agregado;
- ✚ Presença de gel resultante da reação na superfície das peças;

- ✚ Existência de microfissuras na pasta de cimento e agregados.

A extração de testemunhos foi uma importante ferramenta que permitiu a identificação de fissuras internas, perda de aderência da argamassa na interface com os agregados, ocorrência de bordas de reação ao redor dos agregados que tenham reagido com os álcalis, presença do gel nos vazios e a profundidade de carbonatação. Assim como possibilitou a realização de ensaios acelerados de expansão, para verificação da resistência à compressão, à tração e o módulo de deformação do concreto.

Figura 32: Fissuras em Mapa



Fonte: Autora, 2019.

O ensaio Petrográfico determinado pelo Standard Practice for Petrographic Examination Ofhardened Concrete ASTM C 856:(2004) descreve os procedimentos, que foi utilizado para identificação das estruturas de concreto estudadas nesta pesquisa. Os objetivos da utilização deste ensaio, segundo Prizskulnik (2005) trata de um breve diagnóstico das condições do elemento da fundação, descritos a seguir:

- ✚ Condições do concreto na estrutura;
- ✚ Causas de qualidades inferiores, anomalias ou deterioração;
- ✚ Ocorrência de reações Álcali Sílica ou Álcali Carbonato ou outras reações entre contaminantes e a matriz do aglomerante;

- ✚ Desempenho dos agregados no concreto ou confirmação de tipos empregados relativamente aos especificados;
- ✚ Entre outros.

4.2.1 LOCAL DA INCIDÊNCIA DAS FISSURAS NA EDIFICAÇÃO

As respostas encontradas para o local da incidência de fissuras foram respondidas com informações bem similares.

As fissuras foram evidenciadas através de vistorias, em sua maioria de rotina, e ou em função de indícios encontrados sobre os pisos. Os elementos de fundações estavam com fissuras no topo e nas laterais. Executou-se um mapeamento preliminar dos elementos estruturais, onde se verificou o posicionamento das fissuras, seus encaminhamentos, espessuras de sua abertura e onde havia a maior concentração.

As evidências nem sempre são imediatamente perceptíveis, fazendo com que a ocorrência desta reação possa passar despercebida durante anos, até que, visualmente, o surgimento de fissuras resulte em estudo mais detalhado que leve ao seu reconhecimento.

Estes fatos reforçam sobre a necessidade de inspeções regulares e minuciosas, com a retirada de testemunhos para um diagnóstico para eficiente.

4.2.2 COMO FOI DIAGNOSTICADA A PATOLOGIA

A utilização de uma metodologia clara e reconhecida no meio técnico facilita a interpretação dos dados apresentados por profissionais especializados. Também pode acompanhar o crescimento ou instaguinação da manifestação patológica, podendo a partir desses dados optarem por intervenções mais assertivas.

Nesta pesquisa verificou-se que os dados colhidos, desde os primeiros contatos com a estrutura em questão, através da avaliação de sintomas e características do problema, constatados pela realização de possíveis ensaios para provimento de informações, poderia ajudar na elaboração de um diagnóstico de fatores que pudessem estar contribuindo para a ocorrência do problema, bem como

um prognóstico da sua evolução, mas em muitas descobertas relatou-se que os ensaios não foram feitos.

É interessante ressaltar que mesmo após toda a investigação da patologia, podem ocorrer situações concorrentes, ou seja, semelhanças de problemas, de uma ou duas causas que contribuem para o mesmo problema, tornando o resultado conflituoso e só com os ensaios mais conclusivos, pode-se ter uma definição da doença.

No andamento desse estudo confirmaram-se através das entrevistas várias questões associadas à investigação, materiais utilizados, a forma de sua aplicação, quais os seus fornecedores e descreveram-se as características principais dos materiais a seguir:

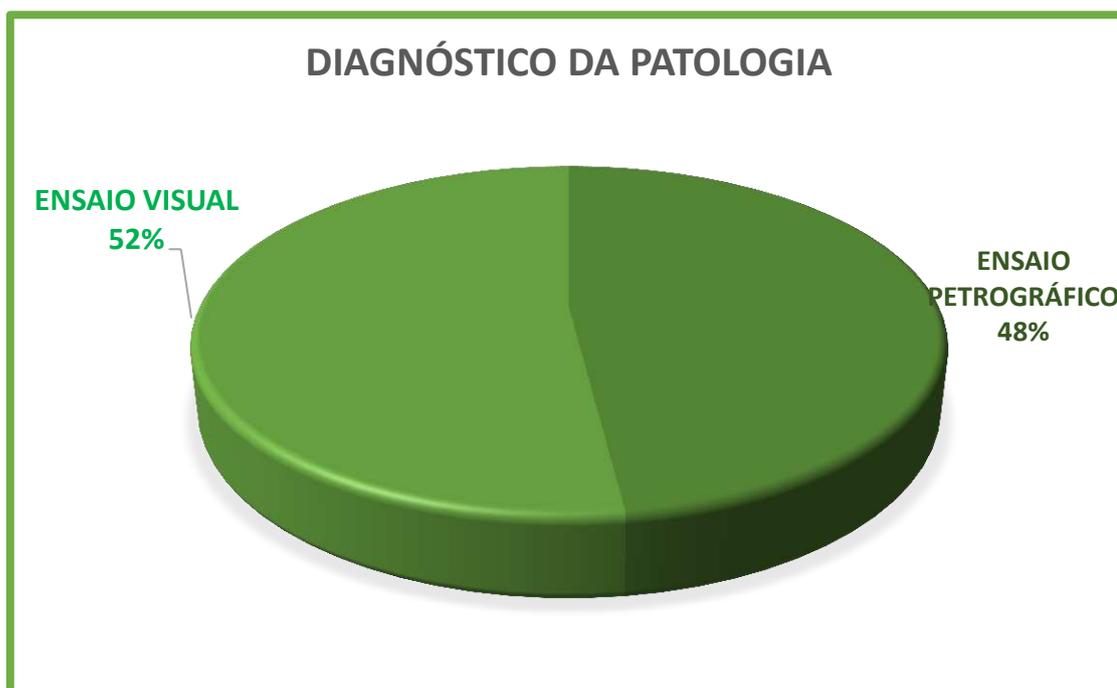
- ✚ Verificou-se o concreto utilizado na fundação, se fabricado manualmente ou produzido em central e quais as concreteiras fornecedoras no momento da construção.
- ✚ Com relação ao agregado utilizado, quais os locais que na época de sua construção, forneciam agregado graúdo e miúdo, para possivelmente determinar sua reatividade ou não.
- ✚ Outro dado importante é a armadura das peças estruturais. Buscado através do conhecimento dos projetos, sobre a densidade de armadura, pois as fissuras tendem a se propagar ao longo da armação, fazendo-se necessário a consultas aos projetos.

Partindo do princípio da junção de todas as informações das inspeções visuais, dos ensaios e das documentações de projeto e da construção da edificação, só assim foi possível analisar e diagnosticar o problema. Portanto ressalta-se a necessidade de ensaios laboratoriais para confirmação da ocorrência da Reação Álcali Sílica.

Também foi relatado pelas empresas envolvidas neste trabalho que as inspeções visuais, assim como as verificações aos projetos são atendidas, porém apenas 48% dos empreendimentos fizeram uso de ensaios laboratoriais. Os outros 52% trataram como resultados a partir das abordagens apenas visuais, como apresentado na Figura 33. Em algumas circunstâncias, em função de questões

financeiras os ensaios são dispensados. Em outros depois da verificação in loco do estado da fundação, a reação deletéria estava avançada que se tornou imperiosa a recuperação, fazendo com que os condôminos acreditem o diagnóstico apenas a experiência da empresa.

Figura 33: Diagnóstico



Fonte: Autora, 2019.

Lembrando que os métodos para definir e controlar com precisão a velocidade da RAS e o sua duração ainda estão para ser solucionados, assim como os métodos para intervir na interrupção imediata da reação. Mas, sabe-se que sua intensidade pode diminuir com o tempo, à medida que os álcalis disponíveis para reação são consumidos, desde que seja impedida a presença da água sobre o concreto. Assim a importância de investigar todas as circunstâncias envolvidas durante o processo da construção e após, através das manutenções preventivas, em busca de soluções que possam impedir a continuidade da reação através de eliminação de um dos fatores condicionantes.

Somando a esses fatos convém destacar a existência de fatores que tendem a restringir a expansão do concreto, tais como: o estado de tensão (tensão de compressão confinante, reduz a compressão na direção da compressão), a densidade e a localização das armaduras nos elementos estruturais. Esses fatores

necessitam ser conhecidos uma vez que tem grande influência na distribuição e intensidade das fissuras oriundas da RAS, podendo levar o diagnóstico a conclusões equivocadas, atribuindo as fissuras causas erradas.

4.2.3 ENSAIOS EXECUTADOS NA DETERMINAÇÃO DA PATOLOGIA

Atualmente vários métodos normatizados são oferecidos no mercado para caracterizar a reatividade potencial expansiva dos agregados minerais no concreto de cimento Portland. A análise petrográfica trata-se de um exame para o diagnóstico da presença de material reativo e também para ocorrência de manifestações associadas à reação, como borda de reação no agregado, microfissuras causadas pela expansão, presença do gel no interior dos poros, dentre outros.

O ensaio utilizado na determinação das patologias desta pesquisa foi o ensaio Petrográfico NBR 15577-3: (2013). Infelizmente como apresentado anteriormente, em função dos custos os ensaios não foram executados. E nos casos investigados, os testemunhos extraídos dos elementos das fundações foram encaminhados para ABCP (Associação Brasileira de Normas Técnicas) ou para o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), ambos em São Paulo. O maior número de ensaios petrográficos, 80% foram imputados à ABCP e os demais ao IPT.

4.3 PROCEDIMENTOS DAS RECUPERAÇÕES

No processo das recuperações de estruturas de concreto a qualidade e o resultado dos serviços aplicados depende primeiramente de um diagnóstico preciso e da escolha adequada, que se inclui a seleção de materiais e equipamentos a serem empregados, necessários para execução do serviço.

Constatou-se que estes serviços de recuperações requerem uma prévia da elaboração dos trabalhos e dependendo do caso, uma avaliação de um calculista, ou seja, um projeto de cálculo estrutural, assim como os ensaios necessários para comprovação das propriedades mecânicas do concreto, como: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Fatos esses que foram evidenciados com a solicitação de projetos para as fundações onde a reação expansiva encontrava-se em grau elevado de deterioração. Somado a essas questões, buscou-se os resultados das propriedades

do concreto exposto à reação, condição imposta pelas empresas, visando constatar as condições em que os concretos anteriores se encontram, com o intuito de garantir os bons resultados na intervenção dos serviços de recuperação.

Diante do exposto de posse desses dados, determina-se o processo de recuperação, as etapas a serem seguidas, os procedimentos de segurança aplicados e quais os materiais que serão utilizados no combate a RAS.

4.3.1 ETAPAS SEGUIDAS NO PROCESSO DA RECUPERAÇÃO

As etapas seguidas no processo de intervenção para recuperação da fundação assemelham-se a uma receita para o tratamento de uma doença. Esse processo foi seguido e executado por todas as cinco empresas entrevistadas nessa pesquisa na maioria das recuperações, mudando apenas os materiais empregados na busca pela monolitização dos elementos.

A formulação desses tratamentos de recuperações foi ajustada as questões referentes à dimensão, encaminhamento e profundidade das fissuras. E em se tratando dos processos de recuperação de RAS a busca é garantir que as peças estruturais voltem a funcionar como um todo, monoliticamente, com o fechamento de suas fissuras, conseguido através da injeção de um material aderente e resistente. As etapas que compõe a recuperação e a ordem de sua execução descrevem-se a seguir:

1. Demolição e escavação dos materiais;
2. Lavagem das Superfícies de Concreto;
3. Apicoamento das superfícies;
4. Furação do concreto;
5. Colmatação e colocação dos purgadores;
6. Injeção nas fissuras;
7. Montagem de armaduras;
8. Concreto estrutural;

1. DEMOLIÇÃO E ESCAVAÇÃO

O primeiro passo da recuperação descrita pelas empresas pesquisadas trata-se da demolição dos pisos e escavação dos elementos estruturais, chegando até descobrir as partes inferiores das peças. Com a identificação das fissuras, todos os pisos são removidos conforme a determinação do condomínio. Todo esse início obedece a NBR 6122: 2019, Item 18.6, referente às recomendações e procedimentos sobre a segurança dos operários nas escavações. A Figura 34 retrata a demolição do piso e na Figura 35 as escavações feitas por bobcat, ambas mecanicamente.

Figuras 34 e 35: Demolição do Piso e Escavação



Fonte: Autora, 2019.

2. LAVAGEM DA SUPERFÍCIE

A segunda etapa trata-se da limpeza através da lavagem dos elementos para identificação das fissuras. A lavagem, feita normalmente através da aplicação de jatos de água sob pressão controlada (hidrojateamento), para identificação e preparação da superfície a ser recuperada. Após limpeza, as fissuras passam a ser demarcadas, de forma a identificar todos os seus contornos para a etapa de apicoamento, visto na Figura 36.

Figura 36: Bloco com identificação das fissuras.



Fonte: Autora, 2019.

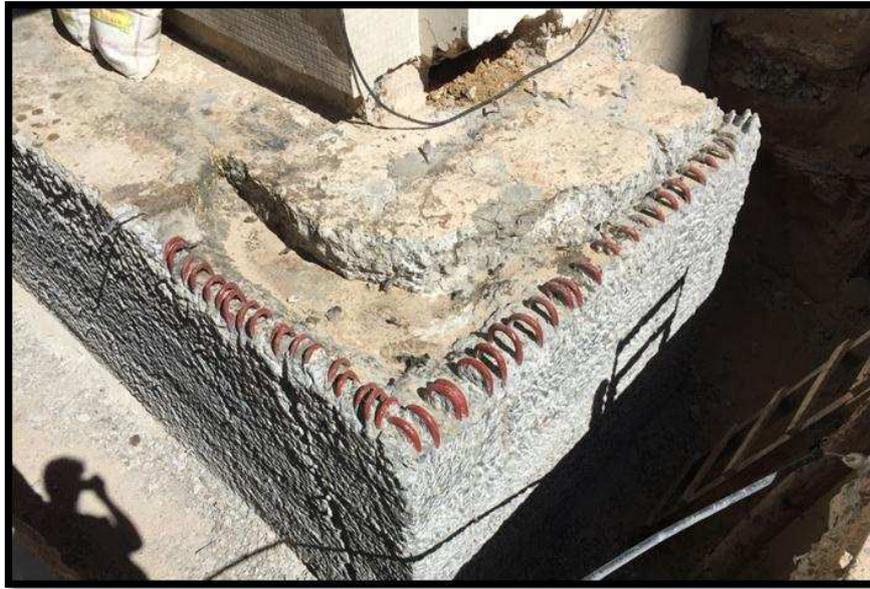
Na pesquisa das 50 fundações identificadas, a maioria das empresas seguiram procedimentos semelhantes nas recuperações, relatado através de vasto relatório fotográfico.

3. APICOAMENTO

Este procedimento objetiva retirar a camada mais externa do concreto, principalmente a camada deteriorada, com o objetivo de potencializá-lo para complementação com uma camada adicional de concreto. Nos estudos verificou-se que as espessuras de concreto praticadas nas recuperações variaram de 5 cm até 10 cm, e em outros casos, dependendo do estágio da expansão, foram desenvolvidas novas peças estruturais por cima da existente, demandando um volume e espessuras superiores as descritas.

O apicoamento foi feito mecanicamente ou manual e variando em função das profundidades de concreto que se deseja remover e do acesso disponibilizado entre as peças, após as escavações. Na Figura 37 as condições que a camada externa do concreto se apresenta após o apicoamento.

Figura 37: Bloco Apicoado.



Fonte: Autora, 2019.

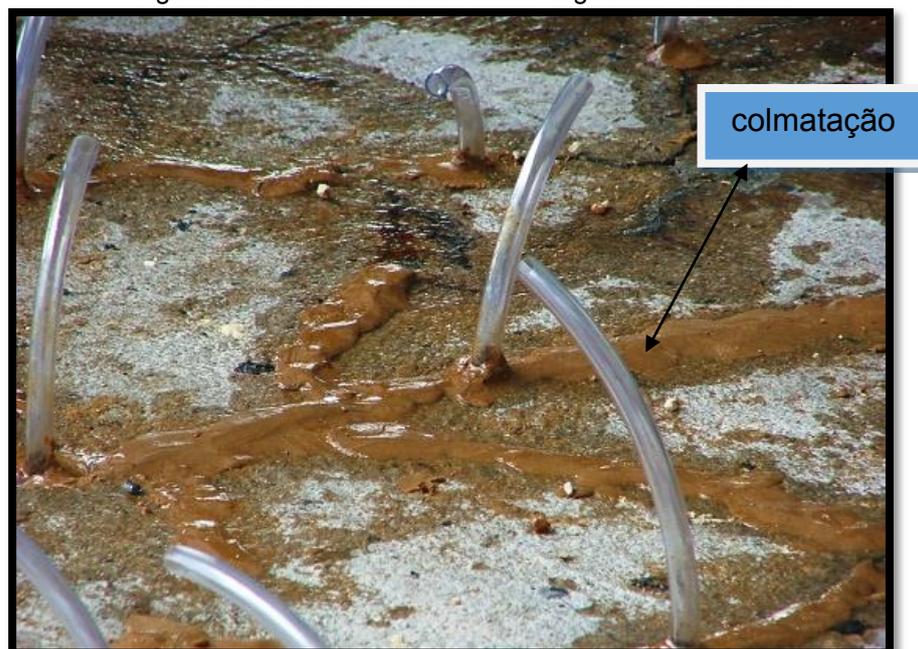
4. FURAÇÃO DO CONCRETO

Nas informações passadas sobre a furação tem-se o propósito de abrir veios aprofundados para garantir a penetração dos materiais e o consequente fechamento das fissuras mais profundas e superficiais, através das injeções. Nas furações levaram-se em consideração os diâmetros necessários para colocação dos purgadores, e o diâmetro da broca utilizada nas aberturas, sempre superiores às espessuras indicadas pelos purgadores.

5. COLMATAÇÃO E COLOCAÇÃO DOS PURGADORES

Nas peças encontradas e ditas afetadas pela reação, o quadro fissuratório tem diversas espessuras, dimensões e encaminhamentos diferenciados. Assim faz-se necessário fazer os fechamentos externos de todas as extremidades iniciais das trincas, antes de executar a injeção. Após a abertura das fissuras superficiais, determinam-se as aberturas mais profundas para inserção dos purgadores plásticos ou metálicos. De acordo com a Figura 38, as fissuras são colmatadas (fechadas), tendo como objetivo impedir que o material da injeção de baixa viscosidade, seja expulso pelas outras fissuras.

Figura 38: Bloco Colmatado com Purgadores Plásticos.



Fonte: Autora, 2019.

Na colocação dos purgadores verificou-se a disponibilidade de outras opções de materiais na preparação desta etapa. Hoje no mercado encontram-se purgadores plásticos e metálicos. As mangueiras transparentes com diâmetros \varnothing de 10 mm como a Figura 38 e na Figura 39 os purgadores metálicos. No caso das mangueiras os comprimentos irão variar em função da profundidade das fissuras ou trincas. Esta é uma importante fase da recuperação, pois através desse processo serão injetados os componentes necessários para o fechamento das fissuras provocadas pela expansão da reação.

Nas trincas onde não se podem colocar os purgadores, é necessária a furação com espaçamento aproximado de 250 mm.

Segundo Silva (2007) ao se fixarem os purgadores, esses devem ter uma atenção especial, pois se trata de um ponto crítico no momento de injeção do material. Para evitar que o purgador saia com a pressão que lhe é imposta, deve-se fazer um reforço em seu entorno, aplicando a argamassa em maior quantidade. Dessa forma, a argamassa que está no entorno do purgador terá uma área de contato maior, dificultando seu desprendimento na parede do bloco. Além de uma área de contato maior, a argamassa deve envolver o purgador para deixá-lo fixo. Para isso, deve-se envolver mangueira com argamassa ao longo de uma distância de aproximadamente 10 mm a partir da face do bloco.

Figura 39: Purgador Metálico



Fonte: Autora, 2019.

No decorrer dessa pesquisa verificou-se que no processo de colmatação a utilização dos purgadores plásticos e metálicos foi executada. Os purgadores metálicos fazem parte dos novos avanços no processo de injeção, aos quais se imputa uma injeção com maior pressão, e conseqüentemente a penetração do material até áreas de maiores profundidades em um curto espaço de tempo. Porém em todos os materiais coletados deste estudo, a colmatação é um procedimento executado para garantir a injeção, e o material mais utilizado são as mangueiras plásticas.

6. INJEÇÃO NAS FISSURAS

Os procedimentos para injeção de fissuras obedecem segundo as informações, aos seguintes critérios: para fissuras com abertura superior a 0,1 mm devem ser injetadas sob-baixa pressão ($\leq 0,1$ Mpa), com exceção dos casos em que as fissuras são superiores a 3,0 mm e não muito profundas, quando é admissível o enchimento por gravidade. Para garantir a efetiva transmissão de esforços, os espaços correspondentes às trincas deverão estar completamente preenchidos. Em função do grau de deteriorização da peça, determina-se um material para preenchimento através da injeção que tenha resistência e que seja equivalente à resistência do bloco de concreto.

Nas fundações dos cinquenta em prendimentos pesquisados as injeções obedecem a critérios semelhantes. Os materiais utilizados são de baixa viscosidade e variavam em função da profundidade das fissuras e dos custos que serão dispensados. A Figura 40 mostra a preparação para injeção e a bomba injetora.

Figura 40: Preparação para Injeção.



Fonte: Autora, 2019.

7. MONTAGEM DAS ARMADURAS DE REFORÇO

Em 70% das fundações pesquisadas, encontrou-se a utilização de projetos e as análises de calculistas com vasta experiência no mercado e nos 30% restante, usou-se armadura sem a utilização de projeto e também não houve colocação de armadura. Nos projetos constataram-se o uso de diâmetros como: Ø 10.0 mm, 12.5 mm, 16.0 mm, com espaçamentos e comprimentos das barras variáveis. As armaduras posicionadas conforme a descrição do projeto e direcionadas para combater os esforços provocados pela reação, visualizados na Figura 41.

Figura 41: Armação de Bloco



Fonte: Autora, 2019.

Segundo Silva (2007) entender do ponto de vista estrutural como a estrutura afetada passou a se comportar após a instalação do quadro fissuratório, vem sendo um dos maiores desafios para estabelecer-se um diagnóstico preciso e para adotar-se uma técnica que seja eficaz para o problema, ou seja, para devolver à peça estrutural sua estabilidade e confiabilidade de projeto. O desafio principal e o mais preocupante é saber como se comportou e como estão se comportando as áreas compressivas e as bielas do bloco diante do fenômeno expansivo da reação Álcali Sílica.

8. CONCRETO ESTRUTURAL

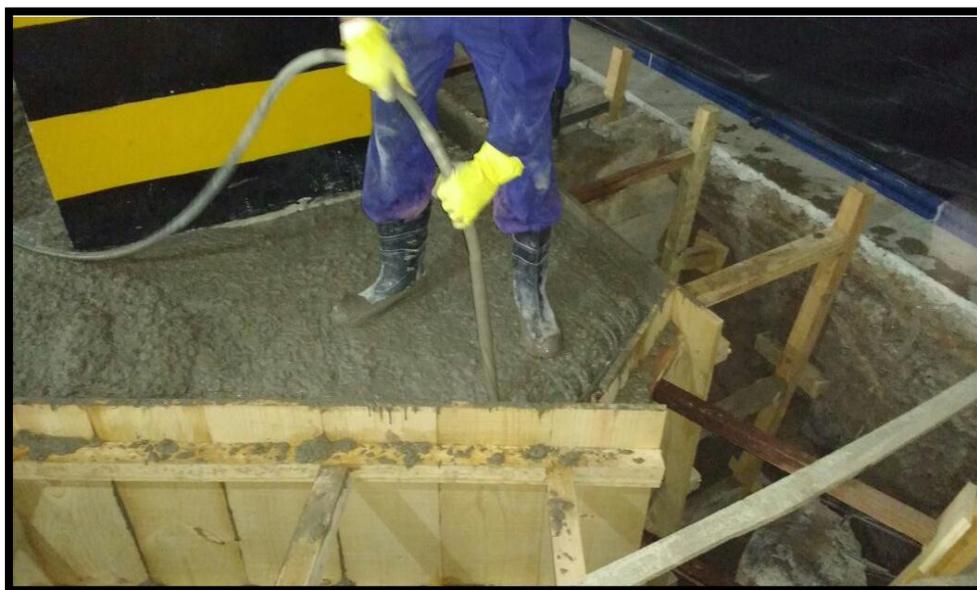
O concreto foi utilizado em 81% dos elementos estruturais recuperados pela reação Álcali Sílica e em 19% não se obteve resposta. Antes de cada intervenção fez-se uma avaliação da dosagem de concreto a ser aplicada levando-se em consideração as diferenças de retração entre o concreto a aplicar e o concreto existente na estrutura danificada.

As diretrizes traçadas sobre o tipo de concreto a ser utilizado seguiram os seguintes parâmetros:

- ✚ Para as peças recuperadas de concreto de pouca idade, o traço novo utilizado aproximou-se das características do traço anterior (o concreto mais antigo), pois o concreto não tinha sofrido a maior parte da retração;
- ✚ Para o concreto mais antigo, (caso desta pesquisa) que já tinha sofrido toda a sua retração, então o traço escolhido foi aquele que reduziu a sua retração ao mínimo.

Verificou-se que a dosagem do concreto utilizado obedecia à consideração quanto à resistência e durabilidade. Outros componentes importantes como a armadura, à especificação do Fck do concreto, sua espessura, e quais as adições necessárias para mitigar a reação foram indicadas no projeto. Para as adições o material mais utilizado foi à sílica ativa, que atua no concreto alterando suas características tanto no estado fresco como no estado endurecido e sua ação está diretamente ligada às características pozolânicas, especificada para combater a RAS. A Figura 42 mostra a concretagem de um bloco sendo executada.

Figura 42: Concretagem de Bloco



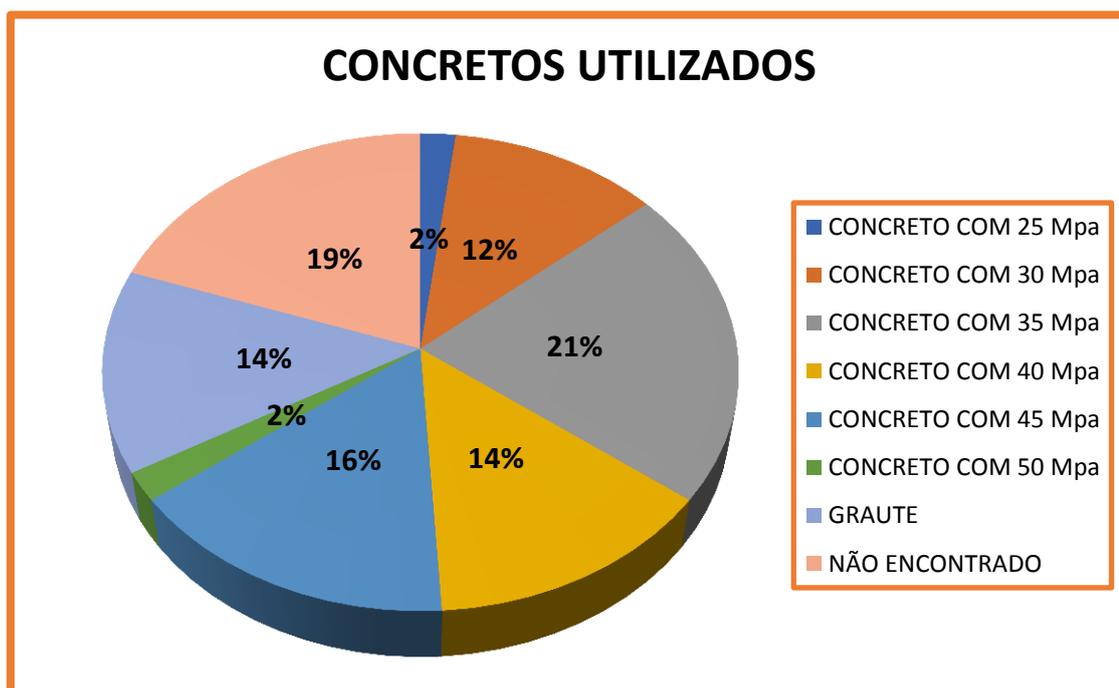
Fonte: Autora, 2019.

Nos concretos estudados nesta pesquisa, verificou-se que os Fck's de projeto utilizados nas recuperações das fundações em sua maioria foram fornecidos por concreteiras, com variadas resistências e respectivas adições, tais como:

- ✚ Concreto estrutural Fck de 30 MPa aditivado com metacaulim;
- ✚ Concreto estrutural Fck de 40 MPa com 10% de metacaulim;
- ✚ Concreto estrutural Fck > 35 MPa aditivado com sílica ativa;
- ✚ Concreto estrutural Fck de 40 MPa aditivado com sílica ativa ou microsíllica;
- ✚ Concreto estrutural Fck > 40 MPa aditivado com sílica ativa ou metacaulim;
- ✚ Concretos com 45 Mpa, com espessura de 15 cm nas laterais e no topo 10 cm;
- ✚ Concretos Fck > 45 Mpa aditivado com sílica ativa ou metacaulim;
- ✚ Concretos Fck ≥ 50 Mpa aditivado com 12% de metacaulim tipo A.

Na Figura 43 mostra o percentual dos concretos utilizados com seus Fck's estabelecidos no projeto.

Figura 43: Fck's dos Concretos



Fonte: Autora, 2019.

4.3.2 PREENCHIMENTO DAS FISSURAS E MATERIAIS UTILIZADOS

A injeção é a última etapa no processo de recuperação e tem por objetivo permitir o perfeito preenchimento do espaço formado entre as bordas de uma fenda recompondo a fundação e promovendo sua monoliticidade. Os procedimentos

executados nos preenchimentos das fissuras tiveram pequenas variações, de uma empresa para outra, em função do estado em que o elemento estrutural foi encontrado e os critérios desenvolvidos na injeção. As etapas seguidas no preenchimento das fissuras foram descritas a seguir:

- ✚ Abertura dos furos ao longo do desenvolvimento da fissura, com diâmetros da ordem de 10 mm e não mais profundos do que 30 mm, sendo delimitado por um espaçamento que varia entre 50 mm e 300 mm;
- ✚ Limpeza efetiva nas fendas e fissuras, com ar comprimido e ou água;
- ✚ Fixação dos purgadores com um adesivo;
- ✚ Selagem através de uma cola epóxica, arrematando a injeção;
- ✚ Injeção.

Na pesquisa verificou-se uma maior utilização das resinas epóxicas em 82% das fundações, seguidos do microcimento em 6% das fundações e em 10% não foi identificado o material utilizado, visualizadas na Figura 44 e o procedimento da injeção demonstrado na Figura 45, onde está sendo executada.

Nos diversos tratamentos estudados foi necessário o uso de materiais com alta resistência mecânica à compressão, à tração e ao cisalhamento e a resina epóxi foi um dos materiais recomendados para o tratamento das trincas e fissuras afetadas pela RAS. Por tratar-se de material rígido após a cura, e importante para restringir o tratamento somente às fissuras e ou trincas passivas, isto é, que não apresentavam movimentação, como foi o caso das fundações citadas neste trabalho.

O segundo material utilizado nas injeções foi o microcimento. Relativamente novo neste procedimento, é um material criado do próprio cimento com uma finura dos grãos com até 8 micrômetros, ou 8 milésimos de milímetro, sendo que 95% das partículas apresentam o mesmo tamanho. Aplicado em recuperações de fissuras passivas é um material rígido, após sua cura e utilizado em áreas secas ou úmidas. Algumas empresas optaram por esse material, pois o mesmo promove à peça estrutural a proteção alcalina das armaduras, a resistência à compressão, tração e cisalhamento e o preenchimento dos vazios, devolvendo o monolitismo e a resistência da estrutura.

Figura 44: Materiais das Injeções



Fonte: Autora, 2019.

Após a conclusão destas etapas, para a garantia do processo de injeção foi informado da necessidade da extração de testemunhos, que compreendessem a totalidade da profundidade da fissura, possibilitando a verificação a olho nu. Porém esta realidade não foi percebida em muitos casos, pelo contrário, em sua maioria esse procedimento não é utilizado, principalmente pelas questões relacionadas à diminuição dos custos.

Encontrou-se uma fundação recuperada com fissuras com aberturas de até 50 mm, onde foi utilizado microcimento de alta resistência a sulfatos de granulometria inferior a 30 μm , associado a um aditivo especial redutor de água de alta performance e relação a/c $\leq 0,50$.

Os equipamentos utilizados eram similares e as fissuras eram preenchidas com o auxílio de compressor de ar e bomba pneumática de injeção.

Figura 45: Processo de Injeção.



Fonte: Autora, 2019.

4.3.3 ENCAMISAMENTO E O CÁLCULO DO REFORÇO

Segundo Silva (2007) para realização do processo construtivo de encapsulamento dos blocos afetados pelo fenômeno expansivo da RAS, primeiramente deve-se ter um entendimento a respeito do comportamento da estrutura a ser recuperada. Com o aparecimento do fenômeno da Reação Álcali Sílica nos blocos de fundação nos edifícios da região Metropolitana do Recife, entender o comportamento dessas estruturas passou a ser um desafio para os técnicos e para os calculistas de estruturas. Como estabelecer um diagnóstico preciso e adotar técnicas que sejam eficazes para o problema, ou seja, devolver à obra sua estabilidade e confiabilidade de projeto.

Com relação aos fatores condicionantes para utilização da armadura de contenção, estudos realizados sobre os efeitos expansivos nas estruturas de concreto com RAS constataram através de ensaios que as tensões de compressão aplicados em corpos de prova sobre efeito da reação comportaram-se restringindo a expansão na direção a qual foi imposta à carga. No caso das fundações atingidas, as áreas com poucas armaduras ficaram susceptíveis as expansões

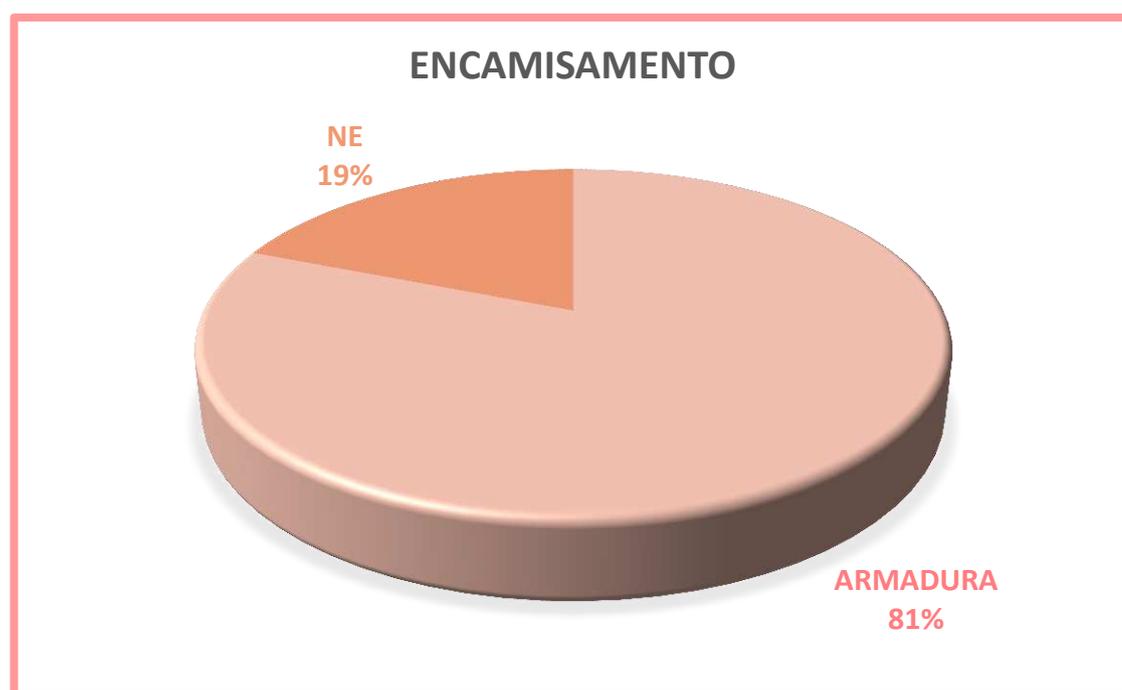
causadas pela reação. Ensaio em laboratório mostraram que no concreto a expansão está restrita à área onde não ocorrem fortes compressões. Ou seja, fundações como as sapatas, que na época tinham armaduras apenas nas áreas inferiores e as áreas superiores (cuscuz) normalmente tinham pouca ou nenhuma armadura, eram susceptíveis à expansão.

O cálculo do reforço foi determinado em alguns casos, através da intervenção de calculistas. A avaliação para o uso do projeto determinou-se em função do quadro de expansão encontrado, nas fundações com a reação deletéria avançada era solicitada a verificação do calculista.

Os encamisamentos responderam por 81% dos elementos de fundação com o uso de armadura e 19 % não foram identificados, visualizado na Figura 46.

Conforme análise e consulta durante as entrevistas não foi possível afirmar a atuação de um engenheiro Calculista e nem a existência de ensaios sobre a confirmação do tipo da manifestação patológica em todas as recuperações. Apenas o que se confirma é que o uso do projeto seguiu as orientações dos responsáveis pela recuperação.

Figura 46: Uso da Armadura



Fonte: Autora, 2019.

4.4 IMPERMEABILIZAÇÃO

Durante a construção das fundações, sejam elas sapatas ou blocos em função da reação foi assegurada a salubridade e a durabilidade das fundações através da impermeabilização, importante etapa em função da exposição desses elementos em contato permanente com a umidade do solo e, que quando não tratados, conduzem a umidade por capilaridade.

Para evitar possíveis problemas patológicos causados pela umidade é imperiosa a utilização de um sistema de impermeabilização compatível com a geometria das peças e com as características de estrutura, como o nível do lençol freático. Verificou-se na pesquisa que em todas as fundações recuperadas utilizou-se a impermeabilização nos topos e laterais dos elementos, e apenas nas solicitações do calculista foram impermeabilizadas as áreas inferiores das peças, exemplificadas na Figura 47.

Figura 47: Bloco Impermeabilizado



Fonte: Autora, 2019.

Nesta pesquisa foram relatados os vários tipos de materiais utilizados para impermeabilizar, partindo do princípio do ambiente onde a fundação estava inserida, com o intuito de proteger a recuperação da presença da água presente no seu entorno. Dos diversos materiais utilizados, a seguir expuseram-se os mais citados:

- ✚ Argamassas poliméricas;
- ✚ Membranas de polímeros;
- ✚ Cristalizantes;
- ✚ Mantas asfálticas aplicadas a quente ou a frio;
- ✚ Emulsões asfálticas;
- ✚ Soluções asfálticas.

4.5 CUSTOS DAS RECUPERAÇÕES

Os recursos dispensados na recuperação dependeram do como seria o tipo de intervenção solicitada e dos valores apresentados. O custo da recuperação foi diretamente proporcional à solução adotada para execução, considerando a metodologia, especificações dos materiais, mão de obra utilizada, trabalhos complementares, como escoramentos e andaimes, bombas de rebaixamentos, entre outras.

Verificou-se ao longo da pesquisa que os custos, bastantes onerosos, são de responsabilidade do condomínio e foram variados e divididos em dois grupos, conforme a disponibilidade econômica de cada condomínio. O primeiro grupo realizou a recuperação completa em 100% da fundação e o segundo grupo as recuperações foram executadas por partes e por extensos períodos.

Dos custos elaborou-se o quadro 07, com os resultados de 25 fundações pesquisadas, descrevendo os valores das reabilitações executadas de 2005 até 2019, contendo os tipos de fundações recuperadas, os custos, os serviços de recuperação e o período de execução. Os valores apresentados foram indexados em dólar e variaram em função do grau de deterioração em que as peças de fundação se encontravam, considerando o volume dos blocos ou sapatas, os materiais utilizados nas injeções e a densidade das armaduras utilizada. Em alguns casos os pagamentos foram parcelados em várias vezes e pelo período de mais de um ano.

Quadro 08: Custos das Recuperações

CONDOMÍNIOS	TIPO DE FUNDAÇÃO	CUSTO US\$	EXECUTADO	PERÍODO EXECUÇÃO
Condomínio 01	06 sapatas	36.445,01	Recuperação por RAA	2019
Condomínio 02	04 blocos	30.491,80	Recuperação por RAA	2018
Condomínio 03	20 blocos	147.962,38	Recuperação por RAA	2017
Condomínio 04	16 blocos	90.909,09	Recuperação por RAA	2017
Condomínio 05	05 blocos	39.184,95	Parte da fundação	2017
Condomínio 06	04 blocos	44.727,79	Recuperação por RAA	2016
Condomínio 07	03 blocos	18.338,11	Recuperação por RAA	2016
Condomínio 08	17 blocos	13.753,58	Recuperação por RAA	2016
		9.627,51		
		6.876,79		
Condomínio 09	07 blocos	24.096,39	Recuperação por RAA	2015
		24.096,39		
		158.858,97		
Condomínio 10	04 blocos	17.004,52	Recuperação por RAA	2015
Condomínio 11	todos os blocos	96.385,54	Recuperação por RAA	2015
Condomínio 12	02 blocos	15.668,67	Recuperação por RAA	2015
Condomínio 13	02 blocos	41.101,69	Recuperação por RAA	2014
Condomínio 14	06 blocos	68.135,59	Recuperação por RAA	2014
Condomínio 15	04 blocos	27.118,64	Recuperação por RAA	2014
Condomínio 16	todos os blocos	445.694,87	Recuperação por RAA	2012
Condomínio 17	20 blocos	1.063.163,07	Recuperação por RAA	2011
Condomínio 18	todos os blocos	243.002,50	Recuperação por RAA	2009
Condomínio 19	36 blocos	52.459,02	Recuperação por RAA	2008
Condomínio 20	20 blocos	11.978,17	Recuperação por RAA	2008 a 2009
Condomínio 21	30 sapatas	109.364,42	Recuperação por RAA	2007
Condomínio 22	02 blocos	7.425,74	Recuperação por RAA	2007
Condomínio 23	30 blocos	79.491,06	Reforço e recuperação	2006 a 2007
Condomínio 24	24 sapatas	160.533,29	Reforço e recuperação	2005 a 2007
Condomínio 25	02 blocos	27.147,54	Recuperação por RAA	2005

Fonte: Autora, 2019.

4.5.6 JANELA DE INSPEÇÃO

Como resultado constatou-se que das 50 fundações pesquisadas apenas duas deixaram as janelas de inspeções. As janelas são pequenas aberturas deixadas nos elementos de fundações, para acompanhamento das recuperações, visíveis nos pisos superiores, visualizadas na Figura 49. Internamente são colocados pequenos pedaços de vidros visualizados na Figura 48, onde anteriormente identificou-se as fissuras, que após sua reabilitação, será acompanhada periodicamente. Caso ocorra alguma nova movimentação do bloco de fundação, a tendência desse vidro será romper, indicando possíveis indícios da continuidade da RAS, ou alguma outra manifestação patológica.

Figuras 48: Interior da janela de Inspeção



Fonte: Autora, 2019.

Figura 49: Janela de inspeção



Fonte: Autora, 2019.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo traçar um perfil dos processos utilizados nas recuperações das fundações atingidas pela reação Álcali Sílica, através da verificação de estudos de casos em 50 fundações que foram reabilitadas. São apresentados os resultados, que foram divididos em quatro partes compreendendo as características, o diagnóstico, a recuperação e custos.

A análise dos primeiros resultados forneceram as seguintes afirmações sobre as características construtivas:

- ✚ Na finalidade dos empreendimentos pesquisados 96% são residenciais e 4% comerciais;
- ✚ Com relação ao número de pavimentos, encontraram-se estruturas de 15, 25, 30 até 41 pavimentos;
- ✚ Determinando os fatores condicionantes que influenciam na Reação estabeleceu-se que várias fundações estavam com seus elementos emergidos parcialmente em água do lençol freático. Dessas constatações verificou-se que 40% das fundações estavam inseridas no nível 1, ou seja, possuía água advinda do lençol freático em contato permanente com a parte inferior do bloco, 18% das fundações com água no meio do bloco, nível 2 e o nível 3 não foi encontrado. Em 42% das fundações não foram identificadas o nível do lençol freático;
- ✚ As idades construtivas, outro dado analisado das edificações, variaram dos 10, 15, 16, 20, 22, 25, 30, 40, 41 chegando até 45 anos;
- ✚ As descobertas das manifestações ocorreram através de verificações de rotinas que indicaram o aparecimento de fissuras nos pisos dos estacionamentos em 80% dos casos pesquisados;
- ✚ Nas distâncias das edificações em relação ao mar, verificou-se que 54% das fundações encontravam-se na zona Sul e 46% na zona Norte;

- ✚ Os tipos de fundações encontrados foram sapatas com apenas 4% e blocos com 96%. Salienta-se que na época da construção a reação era desconhecida, suas armaduras não previam a expansão, assim havia uma pré-disposição para que estas fundações desenvolvessem a Reação.

No segundo material analisado, o diagnóstico concluiu-se as seguintes questões:

- ✚ O local da incidência das fissuras foi identificado nos blocos e sapatas nas laterais e no topo dos blocos;
- ✚ O diagnóstico de 42% dos materiais analisados, fez uso de ensaios em laboratório. E através de estudos com a participação de calculistas e especialistas na área de concreto, e em função do quadro fissuratório, da idade da edificação e do ambiente onde estava inserida a fundação, traçaram uma metodologia de recuperação para RAS baseados em resultados de ensaios advindos de extrações de testemunhos que respaldaram no aparecimento de uma receita para combate a doença da expansão. Todavia os 58% dos materiais analisados buscaram opiniões de empresários, dos quais parte deles possuía bastante experiência nos processos de recuperações e outros eram supostamente da área, e em função de suas experiências em outros trabalhos, sem a presença de calculistas e resultados de ensaios, determinou que a intervenção deveria ser tratada como reação Álcali Sílica seguindo a receita de recuperações usadas em outros casos.
- ✚ Os ensaios utilizados no diagnóstico da reação dos 42% das fundações foi o ensaio Petrográfico e os 58% restante diagnosticaram a reação através de ensaios apenas visuais.

Na terceira análise observou-se as informações sobre as recuperações:

- ✚ As recuperações foram semelhantes na maioria das cinquenta fundações verificadas e seguiram o seguinte procedimento: demolição e escavação das peças estruturais, lavagem da superfície dos elementos, apicoamento e

furação do concreto, colmatação, injeção, montagem da armadura de reforço, concretagem e impermeabilização.

- ✚ A injeção no preenchimento das fissuras os materiais utilizados foram o epóxi em 84% das fundações, o microcimento em 6% das fundações e em 10% das fundações não foi identificado. Preenchidas com auxílio de bomba pneumática de injeção;
- ✚ O encamisamento foi utilizado em 81% das fundações e em 19% não foi identificado. A escolha desse processo foi através do grau de deterioração em que a fundação se encontrava. Nas fundações mais degradadas fez-se o uso de recuperações através a intervenção do projeto do calculista.

O quarto material compilando foram os custos dispensados nas recuperações e as janelas de inspeções:

- ✚ Os custos foram pagos integralmente pelos condomínios, com exceção de duas recuperações. Uma apresentou 50% dos custos pagos foi pela construtora e os outros 50% pelo condomínio. A outra foi à recuperação de apenas quatro sapatas e os custos pagos pela construtora. Constataram-se valores onerosos nas recuperações que variaram em função das dimensões das peças, do grau de degradação da fundação e também do procedimento escolhido para restauração da mesma;
- ✚ O último objetivo desta pesquisa seria identificar as fundações que passaram por recuperações e se foi deixada uma janela de inspeção para possíveis verificações posteriores. Em apenas em 4% das fundações foram deixadas janelas de inspeções.

Com o resultado desta pesquisa pode-se ter um panorama real dos procedimentos utilizados nas recuperações nos anos de 2004 até os dias atuais. Porém sabe-se que nos tratamentos aplicados visualizaram-se a semelhança desses processos, seguidos de pequenas mudanças.

Em entrevista com alguns dos responsáveis pelas empresas, constatou-se que desde as recuperações feitas na ponte Paulo Guerra em 2000, os materiais utilizados e os procedimentos de recuperações obtiveram poucos avanços. A

exemplo, a injeção utilizando os purgadores plásticos e metálicos, muito embora o sistema utilizado com os purgadores plásticos ainda é o mais solicitado. Outra mudança foi nos materiais utilizados na injeção, com o uso do microcimento, porém o epóxi permaneceu como material mais usado.

As recuperações executadas nas fundações precisam de acompanhamento efetivo e sistemático uma vez que a Reação Álcali Sílica poderá se manifestar novamente, pois ainda existem muitas lacunas no tocante aos resultados destas intervenções, revelando-se de extrema importância à aplicação de uma janela de inspeção que possibilite às verificações do acompanhamento. Principalmente nas fundações reabilitadas que não apresentaram acompanhamento técnico de pessoal habilitado e resultados de ensaios, itens preponderantes para a determinação consciente e coerente dos procedimentos a manifestação patológica. Em função disto, tem-se a falta de um diagnóstico concreto que possivelmente levará a utilização de processos equivocados e a continuidade de uma doença não curada. Denotou-se que a busca por menores custos, contrária às boas práticas de execução e garantia de bons resultados. Nas cinquenta fundações pesquisadas, apenas duas deixaram as janelas de inspeções, isso representa 4% das obras pesquisadas que possibilitaram o acompanhamento.

Outro dado obtido através das entrevistas refere-se às garantias. Estas são celebradas em conformidade com: a aplicação dos parâmetros contidos nos projetos, pelo procedimento executado na recuperação e pelos materiais definidos e solicitados pela empresa e o acompanhamento técnico. A empresa responsável pelo serviço de recuperação fornece ao contratante (condomínio) um atestado de conclusão da obra, garantindo e responsabilizando-se pela qualidade dos serviços executados e no caso dos materiais, garantidos pelo fornecedor. Entretanto nas intervenções executadas em desconformidade com as informações acima citadas, possivelmente estará fadada a insucessos, podendo possibilitar um cenário em que os custos poderão alcançar cifras muito superiores.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Inúmeros trabalhos poderão ser elaborados com o tema “Reação Álcali Agregado”, uma vez que as pesquisas não se esgotam e novas tecnologias surgem para possibilitar modificações nos processos e resultados finais.

Estudar com maior profundidade os procedimentos de impermeabilização. Verificando o comportamento de elementos de fundações, executando proteções mais efetivas no topo, nas laterais e principalmente na parte inferior da peça, evitando a penetração da água por capilaridade e fazendo o acompanhamento desse processo para conhecimento da durabilidade da recuperação.

Identificar as fundações que foram recuperadas e deixadas às janelas de inspeções para que fosse feito um acompanhamento mais efetivo dos processos de recuperações para constatação de sua eficiência e a consolidação dos procedimentos executados. E para que a utilização da janela de inspeção fosse efetiva, normatizá-la seria um recurso para garantia dos acompanhamentos. Estabelecer o grau de eficácia das restaurações executadas nas fundações que possuem as janelas de inspeções configura importante caminho a ser pesquisado.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, T.; FIGUEIRÔA, J. P. **O Ataque da Reação Álcali Agregado sobre as Estruturas de Concreto. A descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de pontes e edifícios na Região Metropolitana do Recife.** Recife: Universitária- UFPE, 2007.

ANDRADE, T.; SILVA, J. J. R.; ALMEIDA R.; FIGUEIRÔA, J. P.; KIHARA, Y.; PECCHIO, M. **Diagnóstico de Reação Álcali-Agregado em Blocos de Fundação de um Edifício Público situado na Cidade do Recife/PE.** In: II SIMPÓSIO SOBRE RAA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. IBRACON, 2006.

ANDRADE, T. **Histórico de Casos de RAA Ocorridos Recentemente em Fundações de Edifícios na Região Metropolitana do Recife.** In: II SIMPÓSIO SOBRE RAA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. IBRACON, 2006.

ANDRIOLO, F. R. **Proposição para Conservação de Estruturas Afetadas pela Reação Álcali-Silica.** Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Anais. Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiana, 1997, p.339-345.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – **ASTM C 295/2003:** Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete. Philadelphia, 2005. Section 4, v 04.02, p. 173-180 (Annual Book of ASTM Standards).

_____. **ASTM C 856/2004:** Standard practice for Petrographic examination of hardened concrete. Philadelphia, 2005. Section 4, v. 04.02, p 406-420. (Annual Book of ASTM Standards).

_____. **ASTM C 1260/2005:** Standard test method for potential Alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 2005. Section 4, p 4.

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

_____. **NBR 7215:2019 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1997. 8 p.

_____. **NBR 16697:2018 - Cimento Portland comum: especificação.** Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577/2013:** Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 15577-1: 2013 - Guia para Avaliação da Reatividade Potencial e Medidas Preventivas para Uso de Agregado em Concreto.** Rio de Janeiro, 2008. 11p.

_____. **NBR 15577-2: 2013 - Coleta, Preparação e Periodicidade de Ensaios de Amostras de Agregados para Concreto.** Rio de Janeiro, 2008. 2p.

_____. **NBR 15577-3: 2013 - Análise Petrográfica para Verificação de Potencialidade Reativa de Agregados em Presença de Álcalis do Concreto.** Rio de Janeiro, 2008.8p.

_____. **NBR 15577-4: 2013 - Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado.** Rio de Janeiro, 2008.12p.

_____. **NBR 15577-5: 2013 - Determinação da Mitigação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado.** Rio de Janeiro, 2008.5p.

_____. **NBR 15577-6: 2013 - Determinação da Expansão em Prismas de Concreto.** Rio de Janeiro, 2008.16p.

_____. **NBR 6122:2019 - Projeto e Execução de Fundações.** Rio de Janeiro, 2010. 91p.

BATTAGIN, A.; SILVEIRA, A.L.; MUNHOZ, F.; BATTAGIN, I. **Associação Brasileira de Cimento Portland. A Evolução da Cultura da Prevenção da Reação Álcali-Agregado no Mercado Nacional.** In: Concreto e construções. Ano 44. Ed. Ibracon, Jul-Set 2016.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. **Estudo Comparativo do Desempenho Mecânico da Sílica Ativa e do Metacaulim como Adições Químicas Minererais em Estruturas de Concreto.** Cerâmica, vol. 54, pág. 309-318, 2008. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/ce/v54n331/a0754331.pdf>>. Acesso em: 14 de agosto de 2019.

CASTRO, E. K. **Desenvolvimento de Metodologia para Manutenção de Estruturas de Concreto Armado.** 2004. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2004.

Cimento.org, 2017. Disponível em < <http://www.cimento.org/cp-i.32-cimentoportland> >. Acesso em: 12 de julho de 2019.

COUTO, T. A. **Reação Álcali-Agregado. Estudo do Fenômeno em Rochas Silicosas.** 191p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 2008.

FIGUEIREDO, E. P. **Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto.** Vol. 2. São Paulo: IBRACON, 2005.

GOMES, E.A.O. **Recuperação Estrutural de Blocos de Fundação Afetados pela Reação Álcali Agregado: A Experiência do Recife.** 2008. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em: http://www.unicap.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=161>. Acesso em: 07 Jan 2019.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos Mecanismos da reação Álcali-Agregado – Efeito da Cinza de Casca de Arroz e da Sílica Ativa**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

HASPARYK, N. **Investigação do Concreto Afetados pela Reação Álcali Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6350/0/00528715.pdf?Sequence=1>>. Acesso em: 26 Jul 2019.

HELENE, P. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. 2ª Ed. São Paulo, PINI, 1992.

<https://abcp.org.br/imprensa/a-nova-norma-de-especificacao-de-cimento-abnt-nbr-16697-saiba-o-que-mudou-e-o-que-nao-mudou/>, acesso em 25/10/2019.

<https://cimento.org/cp-i-32-cimento-portland/>, acesso em 25/10/2019.

ISAIA, C. G. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Vol 1,2. São Paulo: IBRACON, 2005.

JONOV, C. M. P.; NASCIMENTO, N. de O.; SILVA, A. de P. **Avaliação de Danos às Edificações Causados por Inundações e Obtenção dos Custos de Recuperação**. Ambiente Construído, Porto Alegre, RS, BRASIL, v.13, n.1, p.75-94, jan. a mar 2013.

KIHARA, Y. **Reação Álcali-Agregado: Mecanismo, Diagnose e Casos Brasileiros**. In: Anais do 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, São Paulo. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1993.

KUPERMAN, S. C.; SALLES, F. M.; PINFARI; CARNEIRO, E. F. **A CESP e a Detecção da Reação Álcali Agregado**. In: XXVI SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, Goiânia. Comitê Brasileiro de Barragens, 2005.

MALHOTRA, V. M.; METHA, P.K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. Advances in Concrete Technology, v. 1, Gordan and Breach Publishers, 1996.

MARIA, S.P. **Estudo da Adição de Cinza da Folha de Bananeira em Argamassas**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus de Curitiba – DACOC. Curitiba, 2011.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, J.M. **Concreto, Propriedades, Estruturas e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 2014.

VEIGA, F. N.; GONÇALVES, I. N.; HASPARYK, N. P. **Microscopia Eletrônica de Varredura de Géis Provenientes de Usinas Hidroelétricas.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE DE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. Anais... Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. p. 69-79.