



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO - UNICAP
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA - PROAC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



RECUPERAÇÃO DE BLOCOS DE COROAMENTO AFETADOS PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

GEOVANI ALMEIDA DA SILVA

RECIFE / PE

2007

GEOVANI ALMEIDA DA SILVA

**RECUPERAÇÃO DE BLOCOS DE COROAMENTO AFETADOS
PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

Dissertação apresentada à 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 Tecnologia das Construções, orientado pelo professor Romilde Almeida de Oliveira.

RECIFE / PE
AGOSTO 2007

- S586r Silva, Geovani Almeida da
Recuperação de Blocos de Coroamento Afetados
pela Reação Álcali-Agregado / Geovani Almeida da
Silva; orientador Romilde Almeida de Oliveira, 2007.
XVI, 130 f. : il.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de
Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil, 2007.
1. Construção Civil. 2. Reação Álcali-Agregado. 3.
Blocos de fundação (Engenharia). I. Título.

CDU 666.972.11

TERMO DE APROVAÇÃO

GEOVANI ALMEIDA DA SILVA

RECUPERAÇÃO DE BLOCOS DE COROAMENTO AFETADOS PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Tecnologia das Construções, Setor de Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco, pela Comissão formada pelos professores:

Avaliado por:

Prof. Romilde Almeida de Oliveira, D.Sc.
(Orientador – Departamento de Engenharia Civil,
UNICAP)

Prof. Antônio Oscar da Fonte, D.Sc.
(Departamento de Engenharia Civil, UNICAP)

Prof. José Inácio de Souza Leão Ávila, Ph. D.
(Departamento de Engenharia Civil, UFPE)

Recife, 15 de agosto de 2007.

Dedico este trabalho a minha noiva Mabel
Luana, pela compreensão e apoio a mim dedicados.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira, por ter aceitado meu projeto, pelo apoio, acompanhamento e pela valiosa revisão do estudo.

À Universidade Católica de Pernambuco, pela disponibilidade de suas dependências e laboratórios bem estruturados e atualizados.

Aos laboratoristas do laboratório de Materiais da Universidade Católica de Pernambuco, pelo apoio para o desenvolvimento dos experimentos, e a todos os funcionários que contribuíram para realização da pesquisa.

À TECOMAT, que forneceu suas prensas para ruptura dos corpos-de-prova, contribuindo no desenvolvimento do estudo, em especial ao Eng^o. Tibério Wanderley Andrade.

Aos professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UNICAP, em especial aos professores, pela dedicação e atenção de nos repassar seus conhecimentos.

Ao PROSUP, pela bolsa de estudo que me foi concedida durante todo o curso.

Aos meus colegas - Antônio Soares, Carlos Marques, Glauber Carvalho, Valfrido Viana, Carlos Jackson - pelo apoio e incentivo para fazer o mestrado.

À ConcrEpoXI, pela troca de informações e experiências estabelecida durante a recuperação dos blocos na obra, em especial ao engenheiro Bruno.

A todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

À Professora Rosário Sá Barreto, pela revisão gramatical dessa dissertação.

A Deus, por me conduzir e me guiar nos momentos difíceis e por me dar forças nas noites mal dormidas.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertence.”

Albert Einstein

RESUMO

A reação álcali-agregado afeta a durabilidade e a resistência mecânica das estruturas de concreto, provocando trincas nos elementos estruturais. Apesar das manifestações patológicas provocadas, não se pode afirmar que, embora a reação seja lenta, o estado limite de ruptura não possa ser atingido. A ocorrência desse fenômeno em blocos de fundação é raramente descrita na literatura. Recentemente foi identificada em fundações de edifícios na Região Metropolitana do Recife, constituindo um problema que vem chamando a atenção da comunidade técnica e do setor produtivo da construção civil. Os blocos de coroamento afetados pela RAA devem sofrer intervenções com técnicas de recuperação adequadas a cada situação. Dentro desse enfoque, este trabalho apresenta os resultados do acompanhamento dos serviços de injeção de microcimento em fissuras nos blocos de uma obra em processo de recuperação. Apresenta ainda a proposta de reforço para as peças de infra-estrutura afetadas pela reação expansiva. Foram realizadas extrações de testemunhos, limpeza e fechamento superficial das fissuras com uma mistura de epóxi e caulim, aplicação do microcimento no interior das trincas e extração de testemunhos após a injeção para verificação da efetividade do preenchimento das fissuras com o material injetado. Os resultados poderão fornecer importantes subsídios para reparo de blocos de coroamento danificados pela ação da RAA.

Palavras – chaves: Reação Álcali-Agregado; RAA; Blocos de fundação; Concreto.

ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction affects the durability and the mechanical resistance of the concrete structures, provoking cracks in the structural elements. Despite of these pathological manifestations, it cannot affirm that, even so the reaction is slow, the ultimate limit state cannot be reached. The occurrence of this phenomenon on blocks foundation is rarely described in literature. Recently was identified in foundations of buildings in the Metropolitan of Recife Region, constituting a problem that comes calling the attention of the community technique and the productive sector of civil construction. The pile caps affected by the AAR must suffer interventions with adequate techniques of recovery to each situation. Inside of that focus, this work presents the results of the attendance of the services of microcement injection in cracks in the blocks of a building in recovery process. It still presents the reinforcement proposal for the pieces of infrastructure affected by expansible reaction. To go accomplished extractions of specimens, cleaning and superficial closing of the cracks with an epoxy mixture and kaolin, application of the microcement inside the cracks and extraction of specimens after the injection for verification of the effectiveness of the fulfillment of the cracks with the injected material. The results can supply important subsidies for repair pile caps damaged for the action of AAR.

Keywords: Alkali-Aggregate Reaction; AAR; Pile caps; Concrete.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	17
1.1 Importância e Relevância da Dissertação.....	17
1.2 Objetivos da Pesquisa.....	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Estrutura da Dissertação.....	19
2. Histórico da RAA.....	21
2.1 Ocorrência da RAA no Mundo.....	21
2.2 Ocorrência da RAA no Brasil.....	24
2.3 Ocorrência da RAA em Recife/PE.....	26
3. A Reação.....	32
3.1 Introdução.....	32
3.1.1 Tipos de reação álcali-agregado.....	33
3.1.2 Reação álcali-sílica.....	33
3.1.3 Reação álcali-silicato.....	34
3.1.4 Reação álcali-carbonato.....	35
3.2 Parâmetros Químicos da RAA.....	35
3.2.1 Parâmetro químico da reação álcali-sílica e álcali-silicato.....	36
3.2.2 Parâmetro químico da reação álcali-carbonato.....	39
3.3 Parâmetros Físicos da RAA.....	41
4. Prevenção, Correção e Monitoramento da RAA.....	46
4.1 Introdução.....	46
4.2 Medidas Preventivas para Ocorrência da RAA.....	47
4.2.1 Utilização de agregado não reativo.....	47
4.2.2 Utilização de cimento Portland com baixo teor de álcalis.....	50
4.2.3 Emprego de adições minerais/pozolânicas.....	53
4.3 Medidas Corretivas adotadas em Estruturas afetadas pela RAA.....	54
4.3.1 Aplicação de impregnantes, penetrantes, selantes e membranas.....	55
4.3.2 Reforços estruturais.....	57
4.3.3 Liberação de deformações.....	57
4.3.4 Demolição e reconstrução.....	57
4.4 Monitoramento de Estruturas afetadas pela RAA.....	57
5. Estudo de Caso.....	61
5.1 Característica da Obra Estudada.....	61
5.2 Dados Sobre a Obra.....	61
5.3 Histórico da RAA na Obra.....	64
5.4 Ensaio Realizados nos Testemunhos dos Blocos.....	65
5.4.1 Análise petrográfica.....	66
5.4.2 Determinação do teor de álcalis solúveis.....	71
5.4.3 Determinação de expansão do agregado graúdo.....	72
5.4.4 Características mecânicas do concreto.....	74
5.5 Plano de recuperação dos blocos - 1º PARTE – Fechamento das trincas.....	80

5.5.1	Escavação do bloco afetado pela RAA.....	80
5.5.2	Limpeza das faces do bloco e extração de testemunhos para análise laboratorial.....	80
5.5.3	Furação das trincas de menor abertura e colocação de purgadores.....	82
5.5.4	Abertura de furos com diâmetro de 2” abaixo da trinca principal.....	84
5.5.5	Sopragem das trincas, fissuras e furos feitos para colocação dos purgadores.	88
5.5.6	Colocação dos purgadores nos furos e trincas.....	90
5.5.7	Colmatação superficial das trincas de maior espessura com graute.....	90
5.5.8	Colmatação superficial de todas as trincas e fissuras.....	91
5.5.9	Lavagem do interior das trincas e fissuras.....	94
5.5.10	Retirada do excesso de água no interior das trincas e fissuras após lavagem.	99
5.5.11	Fechamento dos furos de 2” com graute e epóxi.....	100
5.5.12	Injeção de microcimento nas trincas e fissuras.	102
5.6	2º PARTE – Encapsulamento do bloco afetado pela RAA.....	108
5.6.1	Estudos realizados sobre os efeitos expansivos nas estruturas de concreto	108
5.6.2	Áreas comprimidas no bloco de coroamento	109
5.6.3	Atuação das armaduras no bloco afetado pela RAA.....	114
5.6.4	Procedimento adotado para reforço dos blocos.....	116
6.	<i>Conclusões e Sugestões</i>	122
	<i>Referências</i>	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Número de estruturas de concreto afetadas pela RAA.....	23
Figura 2.2 – Bloco de fundação do Edifício Apolônio Sales	29
Figura 2.3 – Pescoço do pilar do Edifício Solar da Piedade.....	30
Figura 2.4 – Pescoço de outro pilar do Edifício Solar da Piedade.	30
Figura 3.1 – Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas.....	38
Figura 3.2 – Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas	39
Figura 3.3 – Concentração de íons por absorção eletrostática na superfície da partícula, segundo o a teoria de Gouy-Chapman.....	44
Figura 4.1 – Bloco de fundação com fissuras em forma de mapa.....	46
Figura 5.1 – Planta baixa de forma dos blocos.....	63
Figura 5.2 – Escavação preliminar para inspeção visual do bloco.....	64
Figura 5.3 – Extração de testemunhos para análise laboratorial e verificar o comportamento das fissuras.....	65
Figura 5.4 – Aspecto do concreto, onde se vêem bordas de reação (seta), no encontro do agregado (A) e o material esbranquiçado (B). Imagem obtida através de microscópio estereoscópico com ampliação 6X.....	67
Figura 5.5 – Aspecto do gel gretado depositado sobre as superfícies de quebra dos agregados. Imagem obtida através de microscópio estereoscópico com ampliação 9X.....	67
Figura 5.6 – Aspecto do poro (P) preenchido por tufo de material cristalizado e gel de aspecto cerâmico. Imagem obtida através de microscópio estereoscópico com ampliação 6X.....	67
Figura 5.7 – Detalhe do concreto no qual se observa o gel desenvolvendo-se no contorno dos agregados (seta). Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 100X.....	67
Figura 5.8 – Detalhe de um poro na borda do agregado graúdo preenchido por cristais de etringita (Et). Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 100X.....	68
Figura 5.9 – Detalhe de um poro (P) na borda do agregado (A) preenchido por gel típico da RAA. Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 100X.....	68

Figura 5.10 – Fotomicrografia do agregado no qual se observam cristais de quartzo deformado (Q) e massa de quatzo fino (Qm). Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 25X.....	70
Figura 5.11 – Fotomicrografia do concreto mostrando os grãos de agregado miúdo angulosos. Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 25X.....	70
Figura 5.12 – Aspecto de detalhamento do gel gretado resultantes da reação álcali-agregado. Imagem obtida através de Microscópio Eletrônico de varredura. .	71
Figura 5.13 – Aspecto de detalhamento dos cristais lancetados (L) resultantes da reação álcali-agregado desenvolvendo-se sobre o agregado graúdo. Microscópio Eletrônico de varredura - 1500X.	71
Figura 5.14 – Gráfico de EDS no qual se observa a composição aproximada dos cristais hidratados. Notar o elevado conteúdo de potássio (K). Microscópio Eletrônico de varredura/EDS.	71
Figura 5.15 – Aspecto de detalhamento do agregado recoberto com cristais aciculares de etringita. Imagem obtida através de Microscópio Eletrônico de varredura....	71
Figura 5.16 – Gráfico de expansão do agregado graúdo utilizado nos blocos de fundação.	73
Figura 5.17 – Comportamento das fissuras provocadas por carregamento excessivo.	77
Figura 5.18 – Comportamento dos esforços devido ao carregamento.	78
Figura 5.19 – Comportamento dos esforços devido ao carregamento.	79
Figura 5.20 – Comportamento dos esforços devido ao carregamento.	79
Figura 5.21 – Lavagem das faces com a lavadora de alta pressão.	81
Figura 5.22 – Retirada de testemunho para análise laboratorial.....	81
Figura 5.23 – Testemunhos envelopados em papel filme.	82
Figura 5.24 – Furação das trincas com abertura inferior a 100 mm.....	83
Figura 5.25 – Colocação dos purgadores nas trincas e nos furos.....	83
Figura 5.26 – Retirada de testemunho 150mm abaixo da trinca principal.....	84
Figura 5.27 – Face interna da trinca impregnada com areia e argila.....	85
Figura 5.28 – Comportamento da trinca no interior do bloco, vista pelo furo realizado na extração de testemunho.	85
Figura 5.29 – Furos abaixo da trinca principal.....	87
Figura 5.30 – Indicação do final da trinca através do testemunho extraído.	87

Figura 5.31 – Retirada de pó nos furos dos purgadores.	89
Figura 5.32 – Retirada de pó nas trincas e fissuras.	89
Figura 5.33 – Colocação dos purgadores nas trincas, fissuras e furos.	90
Figura 5.34 – Fechamento superficial da trinca com espessura maior que 10 mm.	91
Figura 5.35 – Preparo da argamassa de epóxi e caulim.	92
Figura 5.36 – Aplicação da argamassa de epóxi misturado com caulim.	93
Figura 5.37 – Aplicação da argamassa de epóxi e caulim sobre a trinca grauteada	94
Figura 5.38 – Purgadores fechados antes do início da lavagem.	95
Figura 5.39 – Início de saída d’água que foi utilizada na lavagem.	95
Figura 5.40 – Saída d’água após um período de lavagem das trincas.	96
Figura 5.41 – Areia depositada proveniente do interior das trincas.	97
Figura 5.42 – Saída da água injetada pelos purgadores sem areia.	97
Figura 5.43 – Extração de testemunho antes da de lavagem das trincas.	98
Figura 5.44 – Extração de testemunho depois da lavagem das trincas.	98
Figura 5.45 – Saída de água retida nas trincas pela força do ar injetado.	99
Figura 5.46 – Fechamento do furo de 2” graute.	100
Figura 5.47 – Fechamento do furo de 2” com graute.	101
Figura 5.48 – Colmatação do furo de 2” com argamassa de epóxi.	101
Figura 5.49 – Injeção de microcimento pelo furo de 2”	103
Figura 5.50 – Saída do microcimento pelos purgadores da trinca principal.	103
Figura 5.51 – Fechamento dos purgadores após preenchido com microcimento.	104
Figura 5.52 – Pontos de saída do microcimento pelos purgadores.	105
Figura 5.53 – Bloco afetado pela RAA após a Injeção de microcimento.	106
Figura 5.54 – Corte dos purgadores rente a face do bloco.	106
Figura 5.55 – Testemunho extraído após a injeção do microcimento.	107
Figura 5.56 – Injeção do microcimento nas trincas finas.	107
Figura 5.57 – Representação do bloco sobre estacas.	109
Figura 5.58 – Representação gráfica das tensões internas no bloco.	111
Figura 5.59 – Representação gráfica da formação das bielas.	112
Figura 5.60 – Localização da trinca principal devido a RAA.	113
Figura 5.61 – Localização da trinca principal devido a RAA.	113
Figura 5.62 – Influência da expansão sobre a armadura	115

Figura 5.63 – Distribuição, posicionamento da armadura e localização da trinca horizontal de maior espessura.....	116
Figura 5.64 – Detalhe da espessura das paredes de concreto armado para encapsular os blocos de oito estacas, imagem do fundo do bloco.	118
Figura 5.65 – Detalhe das barras DYWIDAG exercendo tensões de compressão no fundo do bloco.	118
Figura 5.66 – Detalhe da vista lateral do bloco com as barras DYWIDAG ancoradas.....	119
Figura 5.67 – Detalhe da ancoragem das barras DYWIDAG.	119
Figura 5.68 – Detalhes dos trabalhos preliminares na lateral do bloco.....	119
Figura 5.69 – Detalhe do envelopamento do bloco trapézio/retângulo de nove estacas...	120
Figura 5.70 – Detalhe das barras DYWIDAG exercendo tensões de compressão no fundo do bloco trapézio/retângulo de nove estacas.	120
Figura 5.71 – Detalhe da ancoragem das barras DYWIDAG, vista lateral do bloco trapézio/retângulo.	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1 – Estruturas afetadas pela ocorrência da RAA.....	26
Quadro 4-1 – Principais tipos de agregados reativos com os álcalis do cimento Portland.	49
Quadro 4-2 – Tipos, classes, composição e aplicação dos Cimentos Portland fabricados no Brasil.....	52
Quadro 4-3 – Teores de minerais / pozolânicas empregados para inibição da RAA	53
Quadro 5-1 – Característica dos blocos de fundação	62
Quadro 5-2 - Análise Macroscópica do Concreto	66
Quadro 5-3 - Características Gerais do Agregado Graúdo.....	68
Quadro 5-4 – Síntese das Características do Agregado Graúdo.....	69
Quadro 5-5 – Síntese das Características do Agregado Miúdo	69
Quadro 5-6 – Determinação do teor de Álcalis Solúveis no Concreto dos Blocos	72
Quadro 5-7 – Resistência à Compressão do Concreto Utilizado nos Blocos.....	74
Quadro 5-8 – Resistência à Compressão Diametral do Concreto	75
Quadro 5-9 – Módulo de Deformação dos Blocos BP 12 e BP 22.	76

1. Introdução

1.1 Importância e Relevância da Dissertação

Recentemente foi identificado o fenômeno da reação álcali-agregado nos blocos de coroamento em edifícios residenciais e comerciais na Região Metropolitana do Recife/PE. Até então, raramente, o fenômeno havia sido descrito na literatura com ocorrência desta reação em blocos de fundação.

No Brasil, esta é a primeira vez que se tem notícia de sua identificação em fundações de edifícios. Trata-se, portanto, de um novo desafio ao conhecimento e à engenharia nacional.

Após o colapso do Edifício Areia Branca, em 14 de outubro de 2004, em decorrência da ruptura dos pilares na região enterrada, surgiu uma grande preocupação em vistoriar as fundações dos edifícios já construídos. Ao se efetuar estas vistorias, foram observados problemas de fissuração decorrentes da RAA.

Este diagnóstico foi dado a partir de observações do quadro fissuratório em forma de mapa nos blocos e dos resultados laboratoriais de testemunhos extraídos.

Os ensaios laboratoriais mostraram que os agregados utilizados no concreto eram potencialmente reativos com os álcalis do cimento.

Uma vez verificada a existência da RAA nos blocos de fundação dos edifícios, surgiu a preocupação de recuperar as trincas e fissuras, pois essas são caminhos que podem facilitar o ingresso de agentes externos agressivos, provocando a deterioração da estrutura.

Embora alguns pesquisadores afirmem que a RAA isoladamente não leva uma estrutura de concreto a um colapso repentino, por ser um fenômeno que se desenvolve ao longo de anos, não se pode afirmar que o estado limite de ruptura não possa ser atingido, apesar de a reação ser lenta. Portanto, as peças de

concreto afetadas pela RAA devem sofrer intervenções com técnicas de recuperação adequadas a cada situação.

1.2 Objetivos da Pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é reunir informações técnicas sobre a intervenção ocorrida nos blocos de coroamento deteriorados de um importante edifício público, pelo fenômeno da reação álcali-agregado, contribuindo para o fornecimento de subsídios para futuros procedimentos de recuperação nesse tipo de estrutura afetados pela RAA.

1.2.2 Objetivos específicos

- a)** Acompanhar os serviços de escavação e investigação visual nas faces escavadas para identificar a gravidade das fissuras e caracterizar o tipo de fissuração ocorrida nas faces dos blocos.

- b)** Acompanhar a extração de testemunhos para realização de análise laboratorial, deixando que os corpos-de-prova sejam protegidos para evitar a contaminação de agentes externos.

- c)** Mostrar a execução de colmatação superficial das trincas com a utilização de epóxi e caulim; o emprego do graute para fechamento das trincas com espessura maior que um centímetro; a colocação de purgadores para procedimento de lavagem e injeção do microcimento.

- d)** Avaliar a execução da lavagem dos blocos, bem como o interior das fissuras, retirando testemunhos com diâmetro (\emptyset) de 2" abaixo da trinca principal, com o objetivo de verificar se todo o material, areia e argila, foi retirado.
- e)** Mostrar o procedimento utilizado na injeção com microcimento no interior das fissuras, bem como retirar testemunhos para verificar o comportamento do material injetado.
- f)** Caracterizar o tipo de agregado utilizado na obra e o tipo de reação expansiva ocorrida nos blocos de fundação através dos ensaios laboratoriais realizados com os testemunhos extraídos.
- g)** Avaliar os possíveis danos que a reação expansiva possa ter provocado no comportamento da estrutura.
- h)** Apresentar a proposta de reforço dos blocos de fundação e os materiais a serem utilizados.

1.3 Estrutura da Dissertação

Para melhor entendimento do trabalho desenvolvido, a dissertação foi dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo, é apresentada uma introdução, contemplando a importância do tema estudado, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

O segundo capítulo consiste numa revisão da literatura, retratando a ocorrência desse fenômeno no mundo, no Brasil e no Recife/PE.

A revisão bibliográfica sobre a reação álcali-agregado é apresentada no terceiro capítulo, no qual são mostrados os principais aspectos da RAA; tipos de reações e parâmetros químicos e físicos da reação.

No quarto capítulo são abordadas as medidas de prevenção e correção que devem ser adotadas nas estruturas afetadas pela reação álcali-agregado, bem como seu respectivo monitoramento.

O quinto capítulo traz o estudo de caso de uma obra, cuja fundação sofre os efeitos expansivos da RAA. Ainda nesse capítulo é apresentado todo o acompanhamento feito com relação a intervenções ocorridas nos blocos. Está também, nessa parte do trabalho, apresentada a proposta para recuperação dos blocos.

As conclusões são apresentadas no sexto capítulo, juntamente com as considerações finais e sugestões para futuros trabalhos.

2. Histórico da RAA

2.1 Ocorrência da RAA no Mundo

Através dos precursores (E. A. Stephenson em 1916, J. C. Pearlson & G. F. Loughlin em 1923, R. J. Holdem em 1935 e F. M. Lea & C. H. Desch em 1935) é que foi possível obter os primeiros conhecimentos da formação química do gel provocado pela reação entre os álcalis do cimento associado com os agregados (LEPS, 1999).

O fenômeno da RAA só ficou, contudo, conhecido no meio técnico depois que Thomas Elwood Stanton publicou seu primeiro artigo sobre o assunto no *“Engineer News Record”*, em fevereiro de 1940, e o 2º no *“ASCE Proceedings”*, em dezembro de 1940. Mostrou que, no Estado da Califórnia – USA, algumas estruturas de concreto e rodovias, construídas com o uso de cimento Portland, vinham apresentando um quadro fissuratório devido à expansão causada pela reação entre os álcalis do cimento e a sílica do agregado empregado. Denominou esse fenômeno de reação álcali-agregado.

Através dos estudos experimentais realizado por Stanton, a reação era capaz de formar eflorescências brancas, causando fissurações similares àquelas observadas nas estruturas afetadas na Califórnia, entre os anos 1920 e 1930 (STANTON, 1940).

Após a publicação de Stanton, Blanks e Meissner, em 1941, apresentaram um trabalho relatando sobre a deterioração, proveniente da RAA, da barragem Parker Dam, construída entre 1934 e 1938 (POOLE, 1992).

A publicação de seus trabalhos provocou revolta nas indústrias de cimento que defendiam a “pureza” do cimento. Elas responderam às descobertas de Thomas E. Stanton afirmando, através de Duff A. Abrams, que a descoberta da RAA era vaga e sem fundamentos (LEPS, 1999). Após as respostas apresentadas por Duff A. Abrams, em 1946, Blanks e Meissner tornaram a defender as descobertas sobre a RAA com base nas vastas pesquisas realizadas, entre 1942 e 1946, no laboratório do U.S. Bureau of Reclamation.

Pesquisadores de diversos países passaram a investigar o fenômeno da RAA depois que Stanton, em 1940, Blanks e Meissner, em 1941, apresentaram seus estudos associando a ação deletéria da reação às estruturas de concreto deterioradas. Inicialmente, houve uma busca crescente na identificação das formas minerais presentes nos agregados que pudessem ser consideradas reativas.

Segundo (POOLE,1992), há poucos pesquisadores com conhecimento sobre RAA no Brasil e no mundo. O mais importante é que, desde a descoberta da reação, vários pesquisadores se interessaram em estudar o assunto, contribuindo de forma ímpar no entendimento do processo químico e na identificação dos minerais reativos, bem como nas conseqüências e fatores envolvendo casos reais de estruturas afetadas por essa manifestação patológica (HASPARYK, 2005).

Segundo Biczok (1972), Hobbs (1988), Diamond (1989) e Taylor (1997), a principail causa da formação da RAA é a presença de minerais reativos nos agregados que reagem com os álcalis do cimento e que se tornam condicionantes no processo deletério quando sofrem influências externas, como a umidade e temperatura.

A deterioração de uma estrutura de concreto afetada pelo fenômeno da reação álcali-agregado pode ocorrer em questão de dias, ou após anos (TAYLOR, 1997) e até mesmo em décadas até que os álcalis do cimento reajam completamente com os agregados. Estima-se um tempo necessário de aproximadamente 5 a 12 anos para isso se desenvolver, provocando uma ação deletéria na estrutura afetada (POOLE, 1992). Biczok em 1972, apresentou em seu trabalho sobre corrosão e proteção de concreto um caso com fortes expansões e fissuração após sete anos de construção.

Para Biczok (1972), Diamond (1975), Kihara (1986), Hobbs (1988), Bulletin (1979, 1991) e Poole (1992), o tempo necessário para ocorrência dos primeiros indícios da reação deletéria em uma estrutura de concreto está associado ao tipo de agregado, ao teor de álcalis do cimento, à temperatura e à umidade.

Em 1981, Vladimir A. Paulon enumera, em seus estudos de mestrado, várias obras no mundo afetadas pelas reações químicas entre o cimento com os agregados, tais como:

*estado da Geórgia e do Alabama - USA: pontes rodoviárias;

*estado da Califórnia - USA: barragens Matilija e Fontana no rio Little Tennessee;

*cidade do Cabo, África do Sul: pilares da ponte Pirow;

*Canadá - USA: barragem Lady Evelyn Lake, no rio Montreal;

*Reino Unido: Barragem Channel Island.

Segundo Priszkulnik (2005), foi citado na “**Second International Conference on Alkali-aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams**”, realizada em 1995, o número de obras de concreto mundialmente afetado pelo fenômeno da RAA, tomando por base publicações e relatos feitos por diversos autores ao longo do tempo, conforme mostra a (Figura 2.1).

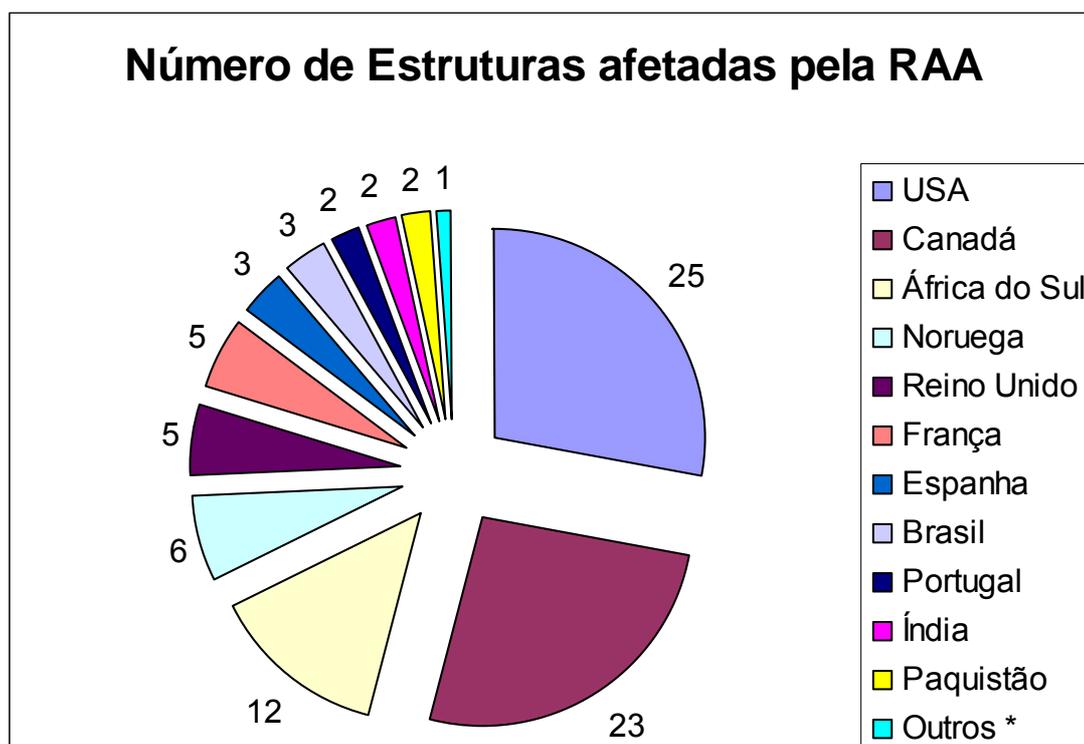


Figura 2.1 – Número de estruturas de concreto afetadas pela RAA

*Nota: “Outros” * correspondem aos países com apenas um caso de estruturas afetadas pela RAA, como é o caso da Argentina, Austrália, Ghana, Ilhas Jersey, Kenya, Moçambique, Nigéria, Suíça e Zâmbia/Zimbawe.*

Apesar de não ter sido citado por Priszkulnik como dado apresentado na “**Second International Conference on Alkali-aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams**” (HEIJNEN *apud* ANDRIOLO, 1997), ele ressalta o grande

aumento nos números de estruturas afetadas pela reação expansiva na Holanda. Nesse país houve um aumento de três casos num período de aproximadamente 50 anos para 35 casos, entre os anos de 1990 e 1995.

No Brasil os números de estruturas afetadas pelo fenômeno expansivo também houve um aumento considerável, onde passou de três casos, anteriormente registrado, para mais de trinta casos devido ao aparecimento nos blocos de fundação dos edifícios na região Metropolitana do Recife estado de Pernambuco.

Em 1997, em Paris, estudos mostraram, através de ensaios laboratoriais, que a expansão do concreto está restrita à área onde não ocorrem fortes compressões, pois a força de compressão aplicada sobre os corpos-de-prova restringe a expansão da reação nesta direção (LARIVE, 1997). Esse estudo foi de fundamental importância para o meio técnico, pois, através desse trabalho, foi possível alcançar um melhor entendimento sobre o comportamento das fissuras nas estruturas afetadas pela RAA.

2.2 Ocorrência da RAA no Brasil

No Brasil, o problema da reação só foi conhecido duas décadas após os primeiros registros publicados nos Estados Unidos. Isso ocorreu quando Gitahy e Ruiz, em 1963, atuando no Convênio do IPT com as Centrais Elétricas de Urubupungá S.A., para construção da barragem de Jupuíá, entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, constataram, na composição dos agregados escolhido para os concretos da barragem, a presença de substâncias sintéticas reativas com os álcalis do cimento, conforme Stanton havia publicado (PRISZKULNIK, 2005).

Na construção da barragem de Jupuíá, foram utilizadas cinzas volantes adicionadas ao concreto para evitar o processo da reação entre os álcalis e os agregados da região (PRISZKULNIK, 2005).

Os três registros de estruturas acometidas pela ação da reação álcali-agregado no Brasil foram apresentados em artigos no “Second International Conference on Alkali-aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams”. Essas correspondem às obras de Peti com evidência comprovada da RAA em

1964; Moxotó, evidenciada em 1978; e Billings-Pedra, evidenciada em 1992 (MAGALHÃES & MOURA, 1997; GUERRA et al., 1997).

Embora tenham sido registrados apenas três casos da ocorrência da RAA em barragens e usinas hidroelétricas (UHE), no Brasil sabe-se que os números reais correspondem a dezenas de casos. Durante o **“Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em estruturas de Concreto”**, realizado na cidade de Goiana/GO, em novembro de 1997, foram apresentados diversos trabalhos, aumentando a estatística de ocorrência da RAA em estruturas de barragem e UHE brasileiras (ANDRIOLO, 1997, 1999).

Com base nos relatórios apresentados em 1997 no Simpósio sobre RAA foi montado o Quadro 2.1 que descreve as obras afetadas de acordo com sua ordem cronológica (SILVEIRA, 1997; KUPERMAN et al., 1997; GUERRA et al., 1997; ANDRIOLO, 1997, 1999; MAGALHÃES & MOURA, 1997; GALLETTI et al., 1997)

Quadro 2-1 – Estruturas afetadas pela ocorrência da RAA

UHE / Barragem	Ano de evidência da RAA	Companhias
Peti	1964	CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
Ilha dos Pombos	1976	LIGHT Serviços de Eletricidade SA
Furnas	1976	FURNAS Centrais Elétricas
Paulo Afonso I	1978	CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco
Paulo Afonso II	1978	
Paulo Afonso III	1978	
Moxotó	1978	
Paulo Afonso IV	1985	
Tomada D'água do Túnel 6	1989	SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo SA
Barragem de Tapacurá	1990	COMPESA – Companhia Pernambucana de Saneamento
Billings-Pedra	1992	ELETROPAULO
Traição	1995	
Jaguará	1996	CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
Mascarenhas Moraes	1996	FURNAS Centrais Elétricas
Estreito	1996	
Porto Colômbia	1996	
Jurupará	---	CBA – Companhia Brasileira de Alumínio – Grupo Votorantin
Sá Carvalho	---	Acesita SA
Joanes II	---	Embasa SA – Empresa Baiana de Água e Saneamento

2.3 Ocorrência da RAA em Recife/PE

Construída em 1973 e responsável pelo abastecimento de parte da Região Metropolitana do Recife (RMR), a barragem de Tapacurá, assim como dezenas de outras barragens espalhadas pelo Brasil, sofreu com os problemas expansivos da RAA. Os primeiros sintomas foram detectados no ano de 1990.

Com pouco mais de 25 anos de construída, a barragem de Tapacurá apresentava muitos vazamentos devido aos efeitos expansivos da reação álcali-agregado. De acordo com o diretor da empresa de recuperação, foram utilizados mais de seis mil sacos de cimento para preencher os vazios provocados pelo efeito expansivo do gel. O trabalho de recuperação durou aproximadamente dois anos e até hoje é monitorada pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP).

Tratando-se do fenômeno expansivo em blocos de fundação, o problema foi primeiramente identificado na fundação da ponte Paulo Guerra, localizada na foz do Rio Jiquiá, que permite o acesso à zona sul da cidade do Recife. A ponte atualmente é uma das principais vias de acesso para a costa litorânea da Região Metropolitana da Cidade do Recife, tais como: Pina, Boa viagem e Piedade (ÁVILA e FONTE, 2002).

No segundo semestre de 2006, o plano de recuperação da ponte foi concluído. Os blocos foram submetidos a esforços e tensões realizados por vigas protendidas. As fissuras foram fechadas com a injeção de epóxi e, posteriormente, foi substituída essa técnica pela injeção de microcimento. A troca do material se deu devido à grande umidade retida no interior das fissuras. Os aparelhos de neoprene foram substituídos, e uma camada de revestimento impermeável foi aplicada em toda a estrutura da ponte para barrar a umidade, evitando, assim futuras expansões.

Recentemente, foi identificado, em blocos de fundação dos edifícios na Região Metropolitana do Recife, o fenômeno da reação álcali-agregado RAA, problema que vem chamando a atenção da comunidade técnica local e sendo motivo de discussões e reuniões promovidas por entidades ligadas à cadeia produtiva da construção civil.

A reação nos blocos de coroamento em edifícios foi descoberta por acaso. Após o colapso do Edifício Areia Branca, em 14 de outubro de 2004, situado na Zona Sul da Região Metropolitana de Recife-PE, vitimando quatro pessoas, foi criada uma comissão técnica indicada pelo CREA-PE (OLIVEIRA, 2005).

O objetivo da comissão foi estudar as causas do desabamento dando uma resposta consistente quanto aos mecanismos envolvidos. O laudo conclusivo foi elaborado após nove meses de trabalho que envolveu entrevistas e ensaios

laboratoriais dos materiais utilizados na obra – como concreto, aço, água e solo – para estudar a causa de seu desabamento.

Especulações feitas por parte de alguns técnicos apontavam o fenômeno da RAA como principal causa do desabamento do Edifício Areia Branca. Essa idéia foi descartada logo após a divulgação do laudo técnico, em agosto de 2005, elaborado pela comissão do CREA-PE. Esse laudo apontou como causa do desabamento falha decorrente de vícios construtivos durante o período de execução da obra.

De acordo com o documento, o colapso da estrutura do edifício se deu a partir de dois pilares, denominados P21 e P22, que se localizavam ao lado do reservatório inferior. Nos pilares, foi constatada má execução do concreto, parte enterrado entre as cintas e a sapata, devido à falta de adensamento, alta porosidade e fator água/cimento elevado. Neles ainda teria sido evidenciada elevada oxidação das armaduras provocada pela presença excessiva de umidade, proveniente de diversos vazamentos no reservatório inferior ao longo do tempo, comprometendo-os ainda mais com relação aos outros pilares. De acordo com o documento, duas camadas de revestimento colocadas em épocas diferentes confirmam a realização de obras para eliminação de vazamentos do reservatório.

A partir da ruptura desses pilares, ocorreu o “efeito dominó”: a carga que era recebida por esses pilares passou a ser transferida através das vigas para os outros pilares, deixando-os sobrecarregados o suficiente para que entrassem em colapso e, conseqüentemente, ocorresse a ruína do edifício.

Aproximadamente um ano antes do desmoronamento do edifício residencial Areia Branca, o edifício comercial do BNB – Apolônio Sales, localizado no centro da Região Metropolitana de Recife/PE, passou a ser inspecionado por técnicos a pedido dos administradores do edifício. O prédio passou a ser vistoriado porque um vidro que separa a circulação com o meio externo, no pavimento térreo, flambou de forma súbita e sem causa aparente.

Pressupondo problemas patológicos na superestrutura do prédio, uma minuciosa vistoria passou a ser feita. Após um ano quase de acompanhamento na superestrutura da obra, os serviços de fiscalização já estavam se dando por encerrados, pois nada havia sido encontrado que comprometesse a integridade

do edifício. Pouco antes da conclusão dos serviços prestados ao prédio Apolônio Sales, ocorreu o colapso do edifício Areia Branca, aumentando a preocupação da comunidade em geral quanto à integridade dos prédios antigos.

A partir do conhecimento dos resultados apresentado no relatório do edifício Areia Branca, resolveu-se abrir a fundação do edifício Apolônio Sales surpreendendo-se com o quadro fissuratório em que os blocos se encontravam (Figura 2.2).



Figura 2.2 – Bloco de fundação do Edifício Apolônio Sales

A divulgação dos problemas encontrados na fundação do prédio do BNB – Apolônio Sales, somada ao caso do Areia Branca, desencadeou, por parte dos síndicos e administradoras, uma necessidade de se vistoriarem as fundações de prédios construídos há algum tempo.

Estudos laboratoriais feitos com testemunhos extraídos dos blocos de fundação mostraram que o quadro fissuratório dos blocos decorria do fenômeno da reação álcali-agregado. Ficou então evidenciado, através de confirmação laboratorial, como este sendo o primeiro caso da ocorrência desse fenômeno na fundação de edifícios do grande Recife.

Entre vários prédios vistoriados, chama atenção a fundação do edifício Solar da Piedade, vizinho ao Areia Branca. O Solar da Piedade, apesar de não

apresentar problemas de RAA na fundação, tinha o pescoço de alguns pilares totalmente deteriorados, semelhante à que levou ao colapso do Areia Branca (Figuras 2.3 e 2.4).



Figura 2.3 – Pescoço do pilar do Edifício Solar da Piedade

Nota-se na Figura 2.3, a ausência de concreto, oxidação em estado avançado e as barras de aço funcionando como pinos.



Figura 2.4 – Pescoço de outro pilar do Edifício Solar da Piedade.

Nota-se na Figura 2.4, a ausência de concreto, oxidação em estado avançado, semelhante ao que se observa na Figura 2.3. Vêm-se, também as barras de aço flambadas.

Depois de vistoriados, os edifícios Apolônio Sales e o Solar da Piedade passaram por um processo de recuperação na sua fundação. Foram então, empregadas técnicas específicas ao problema encontrado e, assim, voltaram a ser postos em uso.

Atualmente, aproximadamente 20 edifícios residenciais e comerciais estão com a fundação comprometida pelo fenômeno da reação álcali-agregado. Diante de tantos casos, a sociedade e, principalmente, os moradores dos edifícios passaram a ficar muito preocupados com a integridade dos prédios. Devido a isso, a comunidade técnica passou a ter um papel fundamental para apresentar uma resposta rápida e satisfatória ao problema identificado.

Ao longo de 60 anos, a partir de sua identificação, o mecanismo da reação vem se tornando um desafio à comunidade técnica, convocada para reduzir e até mesmo eliminar sua ação deletéria (SHRP-C-343 *apud* ANDRIOLO, 1999).

A ocorrência da RAA em blocos de fundação é raramente descrita na literatura. Assim, constituem um assunto praticamente inédito no meio técnico por não se terem registros de ocorrências em edifícios construídos no Brasil. Sabe-se que os blocos de coroamento afetados pela RAA devem sofrer intervenções com técnicas de recuperação adequadas a cada situação. Com esse objetivo, está sendo estudada a recuperação desses blocos afetados pela RAA, utilizando-se primeiramente a injeção com microcimento para o fechamento das fissuras provocadas pelo gel expansivo.

3. *A Reação*

3.1 Introdução

A reação álcali-agregado está intrinsecamente relacionada à composição mineralógica do agregado utilizado para confecção do concreto. O processo de formação do gel expansivo ocorre quando alguns constituintes mineralógicos dos agregados reagem com os hidróxidos alcalinos dispostos na água de amassamento, nos minerais pozolânicos, em agentes externos e principalmente no cimento (PRISZKULNIK, 2005).

Em síntese, pode-se entender a RAA como um tipo de degradação que afeta o concreto. Isso provoca expansão, causada pela reação química que se processa entre certos tipos de agregados reativos quando em contato com os Óxidos de Sódio (Na_2O) e Óxidos de Potássio (K_2O) existentes no cimento Portland. Assim, a intensidade de degradação de uma estrutura depende da quantidade de álcali disposto em contato com o agregado reativo.

Em escala macroscópica, as conseqüências da expansão devida à RAA podem apresentar-se como fissuras, trincas, exsudação de gel, movimentações diferenciais nas estruturas afetadas e até o desprendimento do agregado (LOPES, 2004). Sob o ponto de vista volumétrico, o desenvolvimento das forças expansivas provocadas pelo gel, quando em contato com a água, pode provocar deformações, elevado o quadro de fissurações, diminuição da resistência e até levar à demolição das estruturas afetadas por este fenômeno.

As expansões e fissurações devidas à RAA podem comprometer a resistência e a elasticidade de um concreto, o que afeta por conseqüência, a sua durabilidade (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

3.1.1 Tipos de reação álcali-agregado

Para se conhecer o tipo de reação pela qual a estrutura foi afetada é importante identificar as características dos agregados utilizados na confecção do concreto. A compreensão das propriedades químicas e físicas dos agregados, sem dúvida, pode descrever com maior facilidade o processo da reação propriamente dito.

Segundo Andrade (1997), a RAA pode ser classificada em três tipos distintos. Dependendo da composição mineralógica do agregado, com a qual o concreto foi confeccionado, a reação química, que resulta em um gel higroscópico expansivo na presença de água, pode ser classificada como:

3.1.2 Reação álcali-sílica: Esse tipo de reação é considerado quando há uma dissociação dos hidróxidos alcalinos, presente principalmente no cimento, com a sílica amorfa, tais como: opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais, e o quartzo microcristalino/criptocristalino deformado.

Segundo Barbosa e Pires Sobrinho (1997), as propriedades da sílica estão diretamente relacionadas ao grau de subdivisões ou às imperfeições na estrutura cristalina, passando a assumir um papel importante a superfície específica. Tendo a sílica uma superfície específica baixa, devido à subdivisão da partícula, os ácidos não são perceptíveis, aumentando a fixação do número de moléculas d'água. Conseqüentemente, aumenta o número de íons de hidrogênio livres e a reatividade do material.

Ainda Barbosa e Pires Sobrinho (1997) explicam, de forma resumida que o processo químico da reação ocorre quando uma partícula de sílica reativa está envolvida por hidróxido de cálcio dissolvido, formado na hidratação do cimento, e pelos álcalis livres (Na^+ e K^+) dissolvidos no cimento Portland. Portanto, quando esses três compostos (os álcalis, o cálcio e a sílica) estão em contato, em solução básica, é formado um precipitado coloidal insolúvel (gel de cal e álcali-sílica), não expansivo. Porém, no momento em que apenas os álcalis e a sílica estão postos em solução básica, é formado o gel álcali-sílica expansivo quando absorve água.

Resumindo-se como esse tipo de reação acontece, pode-se dizer que a manifestação se dá quando há um ataque dos álcalis sobre os planos mais fracos, poros ou superfície do agregado, onde se encontra a sílica ativa. Portanto, pode-se dizer que a massa específica, porosidade, permeabilidade, instabilidade química dos minerais constituintes e o tamanho dos agregados estão diretamente relacionados à reatividade química dos agregados.

3.1.3 Reação álcali-silicato: Esse tipo de reação ocorre de forma semelhante à da reação álcali-sílica, no entanto se dá mais lentamente devido ao fato de os minerais reativos estarem mais disseminados na matriz (REGOURD, 1988).

Segundo Duncan, Gillott & Swenson (1973), Van Aardt & Visser (1977a), Kihara (1986), Hobbs (1988), e Prizskulnik (2005), os minerais envolvidos nesse tipo de reação correspondem a alguns silicatos presentes nos feldspatos, folhelhos argilosos, nas rochas sedimentares – como as grauvacas, argilitos e siltitos – nas rochas metamórficas – como as ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos e hornfels – nas rochas magmáticas – como os granitos – e nos minerais expansivos, comumente mencionados na reação álcali-silicato – como os filossilicatos, verniculita, ilita e montmorilonita.

O princípio dessa reação ocorre quando hidróxidos alcalinos, resultantes dos álcalis do cimento, reagem com os silicatos. Na interface de aderência entre a pasta de cimento e o agregado, desenvolvido nas primeiras idades do concreto, é formada uma zona constituída por um gel expansivo de silicato alcalino desenvolvido por meio de um ambiente com umidade elevada (GAMINO, 2000).

O grau de expansão que o gel exercerá sobre a estrutura de concreto dependerá da quantidade de álcalis ou de hidróxido de cálcio disponível em contato com os silicatos presentes nos agregados, bem como da perda ou do ganho de água (VEIGA, GONÇALVES e ANDRADE, 1997).

Devido ao fato de o quartzo microcristalino ou deformado estar quase sempre presente nos agregados que contêm filossilicatos, a reação álcali-sílica pode se manifestar associada à reação álcali-silicato (HOBBS, 1988; PEOOLE, 1992). Devido a essa simultaneidade, o diagnóstico do tipo de reação ao qual a estrutura está submetida é prejudicado, dificultando a identificação dos danos que

uma estrutura de concreto poderá sofrer, visto que a reação álcali-silica acontece mais rapidamente que a reação álcali-silicato.

Ensaio laboratoriais, no entanto, devem ser feitos para identificar a mineralogia dos agregados empregados na confecção do concreto afetado pela RAA.

3.1.4 Reação álcali-carbonato: Esse tipo de reação acontece de maneira diferente das reações anteriores. Segundo Veiga, Gonçalves e Andrade (1997), o produto dessa reação não forma o gel alcalino. Esse fenômeno ocorre envolvendo os álcalis, presentes nos cimentos Portland, com os agregados dolomíticos (dolomitos calcínicos ou calcários dolomíticos).

Ainda segundo Veiga, Gonçalves e Andrade (1997), o fenômeno dessa reação está fundamentado na desdolomitização, formado pelo hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$) “brucita” e pela regeneração do hidróxido alcalino, resultando no enfraquecimento da zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento e provocando o aparecimento de fissuras nessas regiões devido à perda de aderência dos materiais.

Pelo fato de haver a regeneração do hidróxido alcalino no processo da reação álcali-carbonato, provavelmente a adição de pozolanas não seja eficaz para se controlar a expansão provocada por esse fenômeno, já que sempre haverá álcalis para reagir com os agregados potencialmente reativos. Contudo, mesmo sabendo que a adição de pozolanas pode não conduzir a bons resultados, concretos produzidos com escória granulada de alto-forno poderão inibir a reação devido à redução de permeabilidade (FONTOURA, 1999).

3.2 Parâmetros Químicos da RAA

Há muito tempo o agregado utilizado para confecção de concreto era considerado como material inerte. Após estudos realizados no final da primeira década do século passado e apresentados por Thomas Elwood Stanton em 1940, percebeu-se que havia uma reação química envolvendo os álcalis do cimento com os agregados e a resultante dessa reação era um gel expansivo quando em contato com água, provocando ações deletérias em estruturas de concreto (LEPS, 1999).

A partir desses estudos pioneiros, passaram a ser estudado por diversos pesquisadores, em todo o mundo, os efeitos da RAA nas estruturas de concreto.

O entendimento da reação química envolvendo a RAA é muito importante e imprescindível para serem identificadas as causas e os efeitos produzidos pela associação dos álcalis, provindos da fabricação do cimento, com os agregados reativos.

Devido a várias composições mineralógicas dos agregados, têm-se registrado três tipos de reação álcali-agregado por diversos pesquisadores. As particularidades de cada uma vão depender do tipo de agregado utilizado no concreto.

Para melhor compreensão dos aspectos químicos envolvidos na reação álcali-agregado, serão apresentadas suas particularidades de acordo com o tipo de reação que se desenvolve.

3.2.1 Parâmetro químico da reação álcali-sílica e álcali-silicato

Na definição de reação álcali-sílica apresentada no item 3.1.2 deste capítulo, viu-se que esse tipo de reação química só ocorrerá quando houver uma dissociação dos íons alcalinos e hidroxilas com os agregados reativos, cuja composição mineralógica contenha sílica na forma amorfa.

Na literatura, os parâmetros químicos que envolvem a reação álcali-sílica e álcali-silicato são considerados como de mesma natureza. Assim, o que diferencia as reações é que o processo de uma ocorre mais lentamente que o da outra.

Segundo Prezzi *et al.* (1997), estudos realizados por Dent Glasser e Kataoka foram de fundamental importância para o entendimento químico envolvendo a RAA. Os seus trabalhos resultaram em duas investigações:

(i) A primeira investigação realizada por Dent Glasser mostrou que um gel de sílica, proveniente da reação álcali-sílica, posto em uma solução de hidróxido de sódio com diferentes concentrações, os íons de sódio e hidroxilas decresceram rapidamente. No entanto, conforme a sílica fosse sendo dissolvida, a concentração de íons de sódio aumentava. Comprovou-se, a partir desse estudo, que os íons de sódio estão envolvidos na RAA.

(ii) Na segunda investigação, realizada por Kataoka, foi misturado gel de sílica em uma solução de hidróxido de cálcio. Com o auxílio de um microscópio de

transmissão eletrônica, ficou comprovado que o gel de sílica reage com os íons de cálcio dentro da solução em que foi posta. O resultado dessa reação foi a produção de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Os resultados dessas duas investigações mostraram quatro tipos de reações envolvendo a sílica gel com o hidróxido de sódio e a sílica gel com o hidróxido de cálcio, conforme enumerado abaixo (PREZZI *et al.*, 1997).

1° - dissolução da sílica no agregado pelo ataque das hidroxilas;

2° - reação dos grupos silanol (Si-OH) com os íons hidroxilas (OH⁻) em solução para promover ainda mais dissolução;

3° - ligação dos cátions de álcalis (Na⁺, K⁺) e cátions de cálcio (Ca⁺⁺) a posições carregadas negativamente na superfície dos silicatos;

4° - reação das espécies de sílica com íons de cálcio em solução para transformar silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

Ainda Prezzi *et al.* (1997), mostra que as equações 1 e 2 formam a hidrólise dos ânions de ácidos fracos, dispostos pelos silicatos. Em ambas as reações são formados íons de hidroxila, deixando a solução dos poros com pH alto.



A formação de sais de cálcio insolúvel provém da reação do hidróxido de cálcio com os íons sulfato, conforme equação 2.



Na estrutura, os íons hidroxila, presentes na solução dos poros do concreto, reagem com a sílica reativa, presente nos agregados, elevando levemente o pH. Os compostos que contêm os álcalis, ao participarem das reações de hidratação, formam produtos de baixa solubilidade – tais como a

etringita, o C-S-H e as fases aluminato -, liberando íons hidroxila. A hidrolisação ocorre de acordo com a equação 3.



Com o resultado dessa reação, ocorre a formação de grupos silanol. Conseqüentemente, os íons hidroxilas, presentes na solução dos poros do concreto, reagem com os grupos silanol promovendo mais dissolução da sílica no agregado conforme equação 4.



A Figura 3.1 mostra a neutralização do grupo silanol pelas hidroxilas.

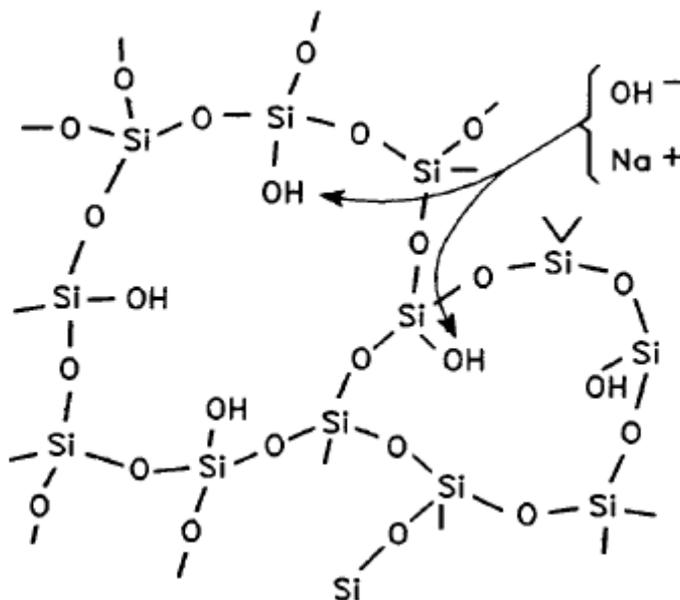


Figura 3.1 – Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas.

Fonte: Hasparyk, 2005

Quando os íons hidroxila estão em excesso, estes atacam o grupo siloxano (Si-O-Si), mostrado da equação 3, rompendo suas ligações e substituindo-o por pares de Si-O⁻ (HASPARYK, 2005). A Figura 3.2 mostra a ruptura destas ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas.

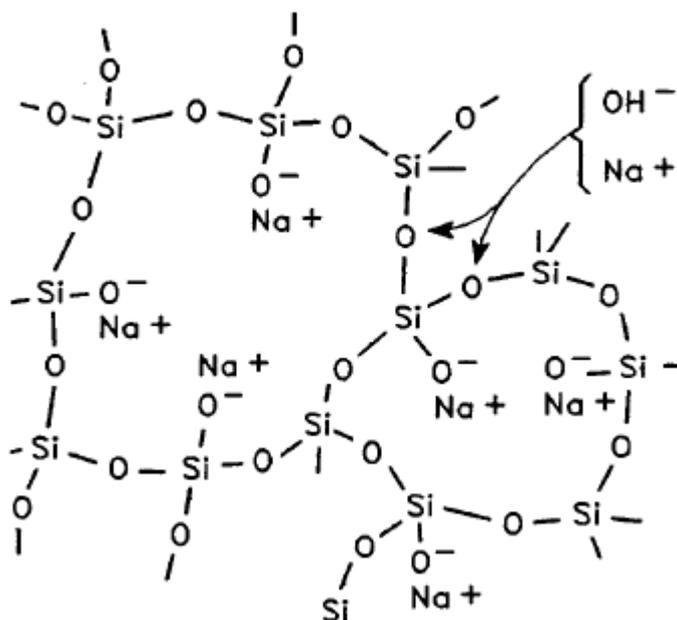


Figura 3.2 – Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas
Fonte: Hasparyk, 2005

Em geral, a reação química na superfície e a adsorção de íons ocorrem devido ao fato de a superfície sólida poder desenvolver cargas elétricas por substituição isomórfica de íons na estrutura do sólido. Os íons podem ser absorvidos a uma superfície quando, pelo menos, uma molécula de água estiver entre a superfície e o íon. Forma-se, então, um complexo de esferas internas, mesmo sem haver moléculas de água entre o íon e a superfície, e também podem ser absorvidos na nuvem difusa de dupla camada com a finalidade de neutralizar as cargas de superfície (PREZZI *et al.*, 1997).

Atualmente a hipótese da reação de superfície dos agregados e a dissolução de silicatos-minerais são aceitas por diversos pesquisadores. Devido à importância em se explicar a mudança de volume de solos argilosos, outras áreas, como a ciência dos solos e geotécnica, passaram a reconhecer a química de superfície para explicar o fenômeno da reação (PREZZI *et al.*, 1997).

3.2.2 Parâmetro químico da reação álcali-carbonato

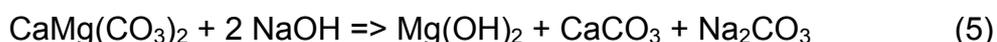
Conforme a definição sobre a reação álcali-carbonato (RAC) apresentada no item 3.1.4 deste capítulo, viu-se que esse tipo de reação química não forma o gel alcalino e expansivo quando em presença de água conforme as reações

álcali-silica e álcali-silicato. A reação álcali-carbonato está fundamentada na desdolomitização e pela regeneração do hidróxido alcalino.

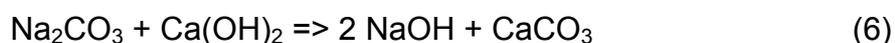
Segundo Fontoura (1999), os álcalis solúveis nos poros também afetam a RAC. Esse tipo de reação pode se manifestar em solução com o pH relativamente baixo e, se o pH da solução nos poros do concreto aumentar, o potencial da reação álcali-carbonato também aumenta. Durante essa reação, os hidróxidos de cálcio, produzidos na hidratação do cimento Portland, podem reagir com o carbonato de sódio. Formando-se, então, mais hidróxidos de sódio e carbonato de cálcio, fazendo com que os álcalis se regenerem, e reduz-se a concentração de íons carbonato, agravando a reação de desdolomitização.

Para Veiga, Gonçalves e Andrade (1997), o mecanismo da desdolomitização, que forma o hidróxido de magnésio (brucita) e o hidróxido alcalino, é bastante aceito para o mecanismo da reação álcali-carbonato.

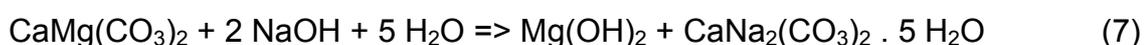
Segundo Veiga, Gonçalves e Andrade (1997), Prizskulnik (2005), a desdolomitização pode ser entendida pelo processo de reação entre os álcalis do cimento em solução na fase líquida com a dolomita dos agregados, formando a brucita, a calcita e o carbonato de sódio, conforme mostra a equação 5.



A equação 6 mostra a reação do hidróxido de cálcio liberado na hidratação dos compostos do cimento com o carbonato de sódio, regenerando os álcalis e dando continuidade à reação álcali-carbonato.

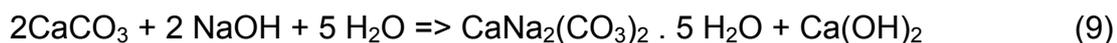


Segundo Sousa Coutinho, (1973), Sherwood e Newton, através de observações ao raio X, conseguiram descrever as reações da dolomita e da calcita com pureza elevada em soluções de hidróxido alcalinos, conforme as equações abaixo.





As equações 7 e 8 correspondem às reações de desdolomitização ocorridas com a dolomita. As equações 9 e 10 mostram as reações ocorridas com a calcita de elevada pureza em solução de hidróxidos alcalinos.



Ainda Sousa Coutinho (1973), relata que Hansen, em 1967, afirmou que um cristal de dolomita, em presença de solução de hidróxido de sódio, expande porque há penetração de íons de Na^+ , HO^- e molécula de água na rede cristalina da dolomita, formando, a partir dessa reação, a gaylussita $[\text{CaNa}_2(\text{CO}_3)_2 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}]$ e a brucita $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$. Quando há penetração de íons de Na^+ , HO^- e de molécula de água na rede cristalina da calcita, o produto dessa reação resulta na formação da gaylussita, conforme ocorrido na reação da dolomita, e hidróxido de cálcio sólido e cristalizado (portlandita).

Quando um cristal de dolomita ou de calcita é posto em solução de hidróxido de potássio, a expansão resultante da reação ocorrida é menor que quando posto em solução de hidróxido de sódio. No entanto, a penetração de íons de potássio, hidroxilas e moléculas de água na rede cristalina da dolomita reagem, formando o carbonato duplo de potássio e cálcio (buetschilita) $[\text{Ca}_2\text{K}_6(\text{CO}_3)_5 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}]$ e brucita sólida $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$. Quando a penetração ocorre na rede cristalina da calcita, ocorre a formação da buetschilita, conforme ocorrido na reação da dolomita, e portlandita sólida.

3.3 Parâmetros Físicos da RAA

O processo físico de expansão da RAA é conseqüência das reações químicas. Em função disso, torna-se importante o entendimento dos processos químicos envolvidos (GLASSER, 1992).

A formação do gel é resultante de uma reação química instável entre os álcalis e a sílica do agregado reativo. As características do gel e seus efeitos, tais como viscosidade, grau de inchamento e absorção de água estão diretamente relacionadas à composição química dos materiais envolvidos na reação e as condições em que se encontram a estrutura de concreto.

Segundo Biczok (1972), Diamond (1975), Kihara (1986), Hobbs (1988), Bulletin (1979 e 1991), Poole (1992), Farage (2000), o tempo para que se notem os primeiros indícios da RAA em uma estrutura de concreto pode depender de vários fatores, tais como: teor de álcalis disponível, tipo de agregado, temperatura, umidade e porosidade no concreto, entre outros fatores.

Destaca-se como fator principal da expansão a presença de água ou umidade acima de 80%, pois a expansão só é possível porque o gel, resultante da reação dos álcalis com o agregado reativo, absorve a água e expanda, fazendo com que haja uma ruptura de ligação da pasta e provocando fissuras generalizadas em forma de mapa.

Mais de meio século já se passou desde a descoberta da RAA e até hoje os mecanismos de expansão do gel são discutidos. Atualmente, algumas propostas são defendidas para explicar os mecanismos de expansão do gel na presença de água.

A primeira proposta foi desenvolvida por Hansen que defendia a expansão como sendo provocada por uma pressão osmótica. A segunda proposta, teoria da absorção, desenvolvida por Vivian (1951), é a mais aceita atualmente. Sua teoria atribui as tensões exercidas no interior do concreto afetado pela RAA ao aumento de volume do gel, provocado quando este se encontra saturado (HASPARYK, 2005).

Uma terceira teoria, proposta por Prezzi *et al.* (1997), diz que, a partir dos conceitos básicos da química de superfície, é possível uma melhor compreensão a respeito do ganho volumétrico do gel no interior da estrutura de concreto afetada pela RAA. O modelo proposto afirma que o aumento de volume do gel é provocado por forças de repulsão da dupla camada elétrica associadas às paredes dos poros e íons no processo de difusão de íons danosos no concreto.

O modelo da dupla camada elétrica é baseado no fato de a superfície sólida poder desenvolver carga elétrica por substituição isomórfica de íons em

sua estrutura. Portanto, em uma estrutura de concreto, comprometida pelo fenômeno da reação, a teoria da dupla camada acontece da seguinte maneira: Em uma superfície da sílica, presente no agregado, com cargas negativas, desenvolve-se uma dupla camada elétrica de cátions para neutralizar as cargas negativas, sendo essas cargas elétricas de cátions basicamente compostas por íons de cálcio, sódio e potássio. Quando houver oxigênio com ligações incompletas na superfície da sílica, os íons alcalinos serão absorvidos por forças eletrostáticas.

No processo de absorção dos íons alcalinos, provocado pelas ligações incompletas do oxigênio na superfície da partícula, ocorre uma alteração nos poros do concreto, facilitando o ingresso de mais água e desenvolvendo um quadro de fissuras.

Em seus estudos, Mitchell (2004) afirma que a quantidade de cátions na superfície da partícula é proporcional ao pH no interior da estrutura, ou seja, quanto maior for o pH nos poros do concreto, mais eletricamente carregada a partícula ficará.

A Figura 3.3 mostra a teoria de Gouy-Chapman, que é bastante utilizada para compreensão das características de argilas expansivas e que é muito parecida com a teoria de nuvem de íons.

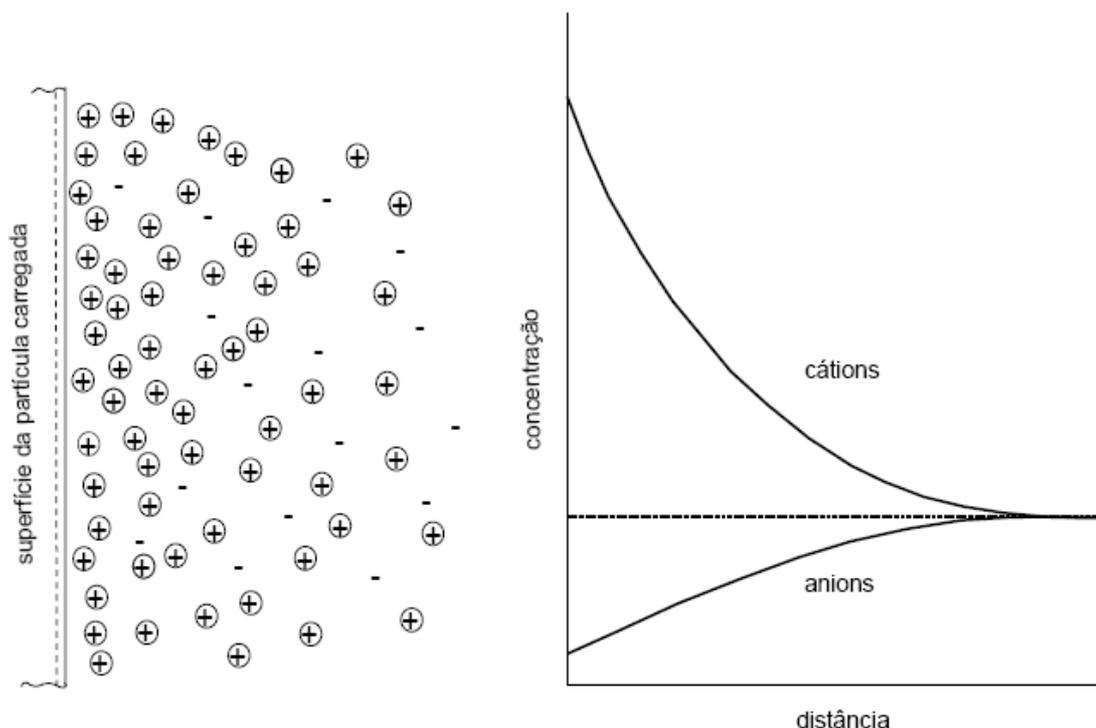


Figura 3.3 – Concentração de íons por absorção eletrostática na superfície da partícula, segundo o a teoria de Gouy-Chapman.

Fonte: Hasparyk, 2005

Observando-se a Figura 3.3, nota-se que as cargas positivas (cátions) são atraídas para a superfície da partícula, fazendo com que as cargas negativas (ânions) sejam repelidas.

Segundo Mitchell (2004), a temperatura atua facilitando a aproximação dos cátions na superfície da partícula; portanto, quanto maior for a temperatura, maior será a aproximação das cargas positivas na superfície da sílica presente no agregado.

Com base na teoria de Gouy-Chapman, o valor da expansão provocada pela reação na dupla camada elétrica pode variar de 2,2 a 10,3 MPa. No entanto, as pressões de expansão não superam os valores de 6 a 7 MPa, correspondendo uma expansão dentro do intervalo proposto no modelo de Gouy-Chapman (DIAMOND, 1989; PREZZI *et al.*, 1977; HASPARYK, 2005).

De forma geral, a intensidade das forças de expansão está diretamente relacionada com a área da superfície da partícula, ou seja, uma partícula com sua área de superfície maior absorverá uma quantidade de água maior e os íons de

sódio e potássio são os principais responsáveis pela formação da espessura na dupla camada.

As estruturas afetadas pela reação álcali-agregado sofrem diversas patologias por causa da ação deletéria de expansão do gel. Em muitos casos, essa expansão chega a levar a estrutura ao seu comprometimento total devido à perda de resistência, elasticidade, deformações excessivas e funcionalidade estrutural, provocada pelo grau de fissuração generalizada na estrutura.

4. *Prevenção, Correção e Monitoramento da RAA*

4.1 Introdução

Com a formação do gel no interior do concreto, resultante da reação, este irá expandir-se com a presença de água, rompendo as ligações entre a pasta de cimento e o agregado, e, quando os poros do concreto forem totalmente preenchidos pelo gel, este provocará tensões que produzirão fissuras com direções incertas, ou seja, as fissuras se formam com aspecto de mapa, conforme Figura 4.1.



Figura 4.1 – Bloco de fundação com fissuras em forma de mapa.
Obs: Para melhor visualização das fissuras, estas foram contornadas com lápis de cera.

Quanto às estruturas afetadas pela RAA, é ainda um desafio eliminar os efeitos deletérios provocados pela força de expansão do gel. Para muitas dessas

estruturas medidas paliativas são as soluções encontradas a fim de garantir sua funcionalidade estrutural.

Quanto às estruturas de concreto que ainda estão para ser executadas, a melhor maneira de evitar os efeitos da reação álcali-agregado é a prevenção. Adotando medidas preventivas com eficácia, essas estruturas poderão nunca apresentar os efeitos da RAA. Mesmo que a reação ocorra no interior do concreto, para essas estruturas confeccionadas com medidas preventivas, sua ação não será degenerativa.

4.2 Medidas Preventivas para Ocorrência da RAA

Atualmente, muito já se conhece e se tem domínio a respeito da reação álcali-agregado, apesar de certos assuntos gerarem discussões sem que haja um entendimento comum entre os diversos especialistas sobre o fenômeno da RAA. Contudo, todos são unânimes quando se trata de evitar os efeitos da reação: Concordam que devem ser adotadas medidas preventivas.

Segundo Corrêa (1997), para se evitar a ocorrência da reação em estrutura de concreto, deve-se evitar o uso de agregados reativos, a utilização de cimento com teor de álcali abaixo de 0,6%, evitar o emprego de aditivos e água de amassamento que contenham álcalis e usar, na mistura do concreto, materiais pozolânicos.

Através das medidas apresentadas por Corrêa como prevenção da reação, será visto como essas medidas podem e deve ser adotadas para minimizar ou até mesmo eliminar os efeitos deletérios oriundos do fenômeno da reação álcali-agregado.

4.2.1 Utilização de agregado não reativo

Para ocorrência da RAA, é necessário que haja a reação química entre os álcalis, presentes no cimento, e os componentes reativos, presentes nos agregados. A presença desses elementos instáveis envolvidos na reação é a grande responsável pela formação do gel que, quando em presença da água, provoca grandes expansões. No entanto, a primeira medida preventiva para que a

reação não ocorra é eliminar a utilização em conjunto de um desses elementos instáveis.

A eliminação do agregado reativo é quase sempre a melhor opção a ser adotada, porém nem sempre isso é possível, pelo fato de a utilização de agregados de outras regiões tornar o custo da construção muito elevado, inviabilizando o empreendimento.

Vivian (1951) mostrou, através de experimentos, que o tamanho do agregado reativo influencia diretamente na formação do gel resultante da reação. Pelo fato de o agregado com dimensão menor que 0,050 mm ter uma maior superfície específica, os experimentos comprovaram que os agregados reagem rapidamente com os álcalis do cimento, consumindo-os antes que o gel se forme. Com a redução dos álcalis, devido ao consumo dos agregados menores no interior do concreto, a reação futura provida pelos agregados maiores será reduzida significativamente.

O Quadro 4.1 mostra alguns componentes reativos presentes nos agregados associados ao tipo de reação álcali-agregado, que devem ser evitados para confecção de estruturas de concreto que tenham contato direto com umidade elevada.

Quadro 4-1 – Principais tipos de agregados reativos com os álcalis do cimento Portland.

Tipo de Agregado	Fase Mineralógica Reativa	Natureza da Reação
GRUPO I - ROCHAS METAMÓRFICAS		
Granulito Gnaisse Quartzito Xisto	> 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$	Álcali - Silicato
Filitos Hornfels Argilo	> 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$; quartzo microcristalino a criptocristalino	Álcali - Silicato
GRUPO II - ROCHAS SEDIMENTARES		
Arenito	>30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$	Álcali – Silicato
	Opala e Calcedônia.	Álcali-Sílica
Grauvaca	> 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$; quartzo microcristalino a criptocristalino	Álcali – Silicato
Chert Calcário	Calcedônia, opala, quartzo criptocristalino e microcristalino	Álcali-Sílica
	Calcita/dolomita, próxima a 1 e associado a argilominerais	Álcali-Carbonato
	Opala, Calcedônia	Álcali-Sílica
GRUPO III - ROCHAS MAGMÁTICAS		
Granito Granodiorito	> 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$	Álcali – Silicato
Basalto	Minerais de alteração: patagonita, opala, calcedônia	Álcali-Sílica
	Vidro vulcânico básico	Álcali-Sílica
Pedra Pomes Riolito Andesito Dacito Latitos Perlitos Tufos Vulcânicos Fonolitos	Vidros vulcânicos ácidos a intermediários e tridomita	Álcali-Sílica
GRUPO IV - MINERAIS E OUTROS		
Areia	Opala (> 0,25%), Calcedônia (> 3%)	Álcali-Sílica
	Eventualmente quartzo deformado	Álcali – Silicato

Fonte: Concreto – Ensaios e Propriedades. Equipe de Furnas, 1997 *apud* SABBAG, 2003

Quanto mais desestruturado for o agregado, mais este poderá ser reativo com os álcalis do cimento (HASPARYK,1999). As deformações tectônicas provocadas nas rochas também são responsáveis pela deformação na micro-estrutura do agregado, aumentando o poder de torná-lo mais reativo.

4.2.2 Utilização de cimento Portland com baixo teor de álcalis

Uma vez que a troca da brita é praticamente impossível pelo fato de inviabilizar a execução do empreendimento, imediatamente devem ser adotados outros meios para evitar que a reação, entre os dois elementos instáveis e principais da formação do gel, ocorra. Como segunda medida preventiva, deve-se evitar a utilização de cimentos com alto teor de álcalis livres em sua composição.

Atualmente, o cimento Portland é o aglomerante hidráulico mais utilizado por ser capaz de unir os agregados constituintes do concreto utilizado na construção civil. Sua composição é constituída de um grande número de substâncias distintas (KIHARA; CENTURIONE, 2005).

Os minerais empregados na fabricação do cimento se constituem, em sua composição química, de óxidos de cálcio (CaO), silício (SiO₂), alumínio (Al₂O₃) e ferro (Fe₂O₃), devidamente empregados em proporções distintas.

No processo de fabricação do cimento Portland, deseja-se obter os componentes C₃S; C₂S; C₃A e o C₄AF nas proporções ideais para cada tipo de cimento. No entanto, não é bem o que acontece. Outros compostos também são formados e são considerados como compostos livres no cimento anidro, tais como:

- CaO – Óxido de cálcio (cal livre);
- MgO – Óxido de magnésio (periclásio);
- Na₂O – Óxido de sódio;
- K₂O – Óxido de potássio.

Os dois últimos compostos, no entanto, são considerados como álcalis livres, ou seja, são esses compostos presentes no cimento (Na_2O e K_2O) os responsáveis pelo processo da reação química envolvendo a sílica dos agregados e formando o gel expansivo na presença de água.

A ASTM C-150 recomenda, como medida preventiva para evitar a reação, o uso de cimento com o equivalente alcalino Na_2O não superior a 0,6%. A equação I mostra como se pode obter o equivalente alcalino em percentual.

$$\text{Eq. alcalino em } \text{Na}_2\text{O} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{K}_2\text{O} \quad (1)$$

Segundo o ACI Committee 221 (1998), é recomendado como limite de equivalente alcalino, para se evitar a reação álcali-agregado, um valor que não ultrapasse 0,40%.

Apesar de o limite máximo de Na_2O estar bem definido pela ASTM C-150 e pelo ACI Committee 221, esses limites não dão garantias de que a reação possa ser evitada pelo fato de poder haver outras fontes externas de álcalis (HASPARYK, 2005).

Outra maneira de se evitar a reação é utilizar cimentos com adições pozolânicas, tais como: cimento Portland de alto forno CP III ou cimento Portland pozolânico CP IV.

O Quadro 4.2 mostra alguns tipos de cimentos mais empregados na construção civil, bem como suas composições e campo de aplicação.

Quadro 4-2 – Tipos, classes, composição e aplicação dos Cimentos Portland fabricados no Brasil

Tipos de Cimento Portland	Código de Identificação do tipo (Sigla)	Classe de Resistência	Código de Identificação na Sacaria (Tipo e Classe)	Matérias - primas utilizadas (Composição)	Aplicações do Cimento Portland
Comum NBR-5732 Rev. - jul/91	CP I	25 32 40	CP I - 25 CP I - 32 CP I - 40	100 % Clínquer + Gesso (Gesso = 3 – 6 %)	É usado em serviços de construção em geral, quando não são exigidas propriedades especiais do cimento.
Comum com adição NBR-5732 Rev. - jul/91	CP I-S	25 32 40	CP I - S - 25 CP I - S - 32 CP I - S - 40	95-99 % Clínquer + Gesso 1 – 5 % Calcário	É usado em serviços de construção em geral, quando não são exigidas propriedades especiais do cimento. Este apresenta pequenas adições.
Composto com escória NBR-11578 Rev. - jul/91	CP II-E	25 32 40	CP II - E - 25 CP II - E - 32 CP II - E - 40	94 – 58 % Clínquer + Gesso 0 – 10 % Calcário 6 – 34 % Escória Alto Forno	Obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento.
Composto com Pozolana NBR- 11578	CP II-Z	25 32 40	CP II - Z - 25 CP II - Z - 32 CP II - Z - 40	94 – 76 % Clínquer + Gesso 0 – 10 % Calcário 6 – 14 % Pozolana	Obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento.
Composto com Fíler NBR-11578	CP II-F	25 32 40	CP II - F - 25 CP II - F - 32 CP II - F - 40	94 – 90 % Clínquer + Gesso 6 – 10 % Fíler Calcário	Obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento.
Alto Forno (AF) NBR-5735 Rev. - jul/91	CP III	25 32 40	CP III - 25 CP III - 32 CP III - 40	65 – 25 % Clínquer + Gesso 35 – 70% Escória Alto Forno 0 – 5 % Calcário	Obras de barragens, fundações de máquinas, pilares, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, <u>concretos com agregados reativos</u> , pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos.
Pozolânico NBR- 5736 Rev. -jul/91	CP IV	25 32	CP IV - 25 CP IV - 32 CP IV - 40	84 – 45 % Clínquer + Gesso 15 – 50 % Pozolana 0 – 5 % Calcário	É especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos.
ARI NBR-5733 Rev.- jul/91	CP V ARI	Alta Resistência Inicial	CP V - ARI	95 – 100 % Clínquer + Gesso 0 – 5 % Calcário	Em blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados.

4.2.3 Emprego de adições minerais/pozolânicas

Ainda objetivando a prevenção da reação entre os álcalis do cimento e a sílica do agregado, pode-se fazer uso de adições pozolânicas, tais como: cinza da casca de arroz, cinza volante, sílica ativa, pozolanas naturais e metacaulim.

Segundo a ASTM C-1567, o emprego de cimentos com adições pozolânicas e as proporções de adições de minerais pozolânicos devem ser ensaiados nos laboratórios em conjunto com o agregado reativo a ser utilizado. Dessa maneira, será possível analisar se a melhor opção para inibir ou reduzir a reação é com o emprego de cimento com adições ou com minerais pozolânicos em proporções ideais para cada tipo de agregado reativo.

As proporções ideais de minerais pozolânicos a serem empregados no concreto podem variar de acordo com o grau de reatividade do agregado; daí a importância dos ensaios laboratoriais recomendados pela ASTM C-1567 (MEHTA & MONTEIRO, 1994; HASPARYK, 1999). O Quadro 4.3 mostra alguns teores de adições sugeridos por esses autores tomados como referência em experimentações realizadas.

Quadro 4-3 – Teores de minerais / pozolânicas empregados para inibição da RAA

Adições minerais / pozolânicas	Teores de adições (%)
Sílica ativa*	10 a 15
Cinza de casca de arroz amorfa*	> 12
Metacaulim*	10 a 25
Pozolana natural	20 a 30
Cinza volante	25 a 50
Escória de alto-forno moída	40 a 65

Nota: *Empregados em substituição do cimento e na presença de aditivos plastificantes

Fonte dos dados: HASPARYK, 2005.

Usando-se cimentos adequados ou com adições minerais / pozolânicas em proporções corretas, a sílica presente nesses constituintes fará com que os álcalis

solúveis, oriundos da hidratação do cimento, sejam consumidos antes que os hidróxidos reajam com a sílica provida pelos agregados.

Para que os efeitos das adições empregadas, com o objetivo de inibir ou diminuir os danos da RAA nas estruturas de concreto, possam ter eficácia, é imprescindível eliminar fontes externas de álcalis, possivelmente presentes na água de amassamento e nos aditivos empregados.

4.3 Medidas Corretivas adotadas em Estruturas afetadas pela RAA

Diferentemente das medidas preventivas, a reação uma vez iniciada e apresentando ações deletérias, quase nada se pode fazer para eliminar os seus efeitos danosos. No entanto, podem-se adotar medidas paliativas para diminuição de seus efeitos.

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.

Andriolo (1997) relata, em seu trabalho sobre conservação de estruturas afetadas pela RAA, uma série de medidas que podem ser adotadas como inibição ou diminuição dos 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.

Atualmente são essas as medidas de reparos que estão sendo utilizadas e, muitas vezes, se mostrando bastante eficientes. Porém, sabe-se que não são suficientes para anular os efeitos da RAA, tampouco são suficientes para reabilitar a estrutura afetada sem que haja uma constante vistoria e manutenção da obra. Para entender melhor algumas medidas de reparo, será explicitado como funcionam as técnicas empregadas.

4.3.1 Aplicação de impregnantes, penetrantes, selantes e membranas

a) Impregnantes e penetrantes

Pelo fato de a expansão do gel estar diretamente relacionada à presença de umidade, esse procedimento consiste em barrar a entrada da água, evitando assim expansões futuras. Para isso, usam-se materiais colóides hidrófobos na superfície da estrutura deteriorada, criando uma barreira e impedindo a penetração da água. Dentre esses materiais, pode-se citar:

- Silanos (grupo de compostos de hidrogênio e silício, análogos aos hidrocarbonetos) de vários tipos;
- Compostos de lítio (Li) de certa relação molar de Li/Na;
- Gás carbônico (CO₂).

Dentre esses métodos para barrar a penetração da água na estrutura de concreto, deve-se ter atenção especial para a aplicação do gás carbônico, pois se sabe que o CO₂ é um dos grandes responsáveis pela corrosão da armadura do concreto.

b) Selantes

A aplicação dos selantes consiste em uma proposta parecida com a apresentada no item (a); a diferença é que os selantes não conseguem impregnar

ou penetrar na estrutura afetada. A aplicação dos selantes também é feita superficialmente, criando uma barreira para impedir a entrada de mais água nessa estrutura afetada pela RAA. Dentre os materiais selantes, pode-se citar:

- Pastas, argamassas e concreto de Cimento Portland;
- Pinturas e argamassas poliméricas.

Em relação aos demais materiais (pastas, pinturas e argamassas poliméricas), deve-se ficar atento quanto ao módulo de elasticidade.

Havendo incompatibilidade de deformação entre a estrutura afetada pela reação e o selante aplicado sobre essa estrutura, iniciar-se-á uma série de manifestações patológicas, como, por exemplo, desprendimento e microfissuração do selante, seja devido à dilatação térmica, sejam em decorrência de expansões remanescentes.

Mesmo com o impedimento para entrada de água, criado pelos selantes, impregnantes e penetrantes, sabe-se que há presença de umidade no interior da estrutura e que está confinada por causa do material aplicado externamente. Dessa forma, certamente haverá ainda expansões comprometendo os materiais usados como vedantes externos, se esses não forem aplicados corretamente.

c) Membranas

As membranas também funcionam como barreiras externas.

- Manta asfáltica.

A aplicação desse material é feita de forma igual à impermeabilização de áreas úmidas tais como: banheiros, piscinas, decks, coberturas, entre outras. Apesar de fácil utilização, devem-se respeitar os prazos de validade estabelecidos pelo fabricante do material e programar periódicas vistorias já que se trata de um produto fácil de ser furado.

4.3.2 Reforços estruturais

O reforço é uma das alternativas para reabilitação de estruturas, que requerem estudos mais aprofundados pelo fato de envolver diversos parâmetros. O grande objetivo em reforçar uma estrutura deteriorada pela RAA é restringir as forças de expansão provocadas pelo gel, deixando-a confinada sobre uma força de compressão maior que a força de expansão.

Apesar de ser uma alternativa benéfica, esse tipo de ação é viável para obras de pequeno porte, pois para as obras de grande porte, como barragens, a execução pode ser inviável (ANDRIOLO, 1997).

4.3.3 Liberação de deformações

A liberação de deformação, realizada por criação de juntas ou vazios, é adotada com o objetivo de direcionar e forçar para que a expansão ocorra em uma determinada direção, aliviando a estrutura onde está sendo utilizada para trabalho.

4.3.4 Demolição e reconstrução

É uma alternativa 100% eficaz para eliminar os efeitos da RAA, porém nem sempre é a mais correta e viável devido ao grande número de obras existentes com esse tipo de problema. Essa forma de medida drástica é aconselhável e viável quando a estrutura estiver com sua vida útil totalmente esgotada e sua demolição não vier a causar impactos significativos ao meio ambiente, como é o caso de obras de pequeno porte e reparos localizados.

4.4 Monitoramento de Estruturas afetadas pela RAA

O monitoramento de estruturas é um poderoso instrumento utilizado para avaliar o comportamento delas, com relação à transferência dos esforços e de trabalho, principalmente quando instalados no início da construção. No entanto,

esse tipo de instrumentação está sendo cada vez mais utilizado como ferramenta valiosa em obras afetadas pela RAA, para avaliar os efeitos expansivos provocados na estrutura de concreto pelo gel em presença de água.

Apesar de as estruturas já terem sofrido patologias por causa dos efeitos expansivos, o monitoramento dessas estruturas se faz importante para acompanhar os efeitos remanescentes da reação, ou seja, monitorar as taxas de expansão do concreto que ainda estão para acontecer (ANDRIOLO, 1997).

Segundo Silveira (1999), a instrumentação das obras afetadas pela RAA deve ser feita com os seguintes objetivos:

- Verificar se o concreto ainda se encontra em fase de expansão.
- Acompanhar as taxas de expansão para saber se essas estão evoluindo de forma crescente, estável ou decrescente.
- Facilitar a calibração dos modelos matemáticos.
- Monitorar a eficiência das obras de reparo, se realizadas.
- Verificar as condições de segurança da obra, pelo acompanhamento da intensidade de fissurações no interior do concreto e suas deformações e distorções.

A locação dos instrumentos para acompanhar os efeitos expansivos nas estruturas de concreto é tão importante quanto a coleta dos dados a ser feita, pois os instrumentos devem ser postos em áreas bem específicas. Segundo Larive (1997), a expansão é restrita onde há forças de compressão superior às forças de expansão, Portanto, se os instrumentos forem postos nessas áreas, a leitura dos dados será comprometida.

Dessa forma, a fixação dos equipamentos de leitura deve ser realizada em trechos onde as forças de expansão provocadas pelo gel possam ser maiores que as forças compressíveis da estrutura. A partir da dificuldade de caracterizar os trechos menos compressíveis através de inspeção visual detalhada e

caracterizada pelos sintomas aparentes, pode-se perceber que a locação desses instrumentos é tão importante quanto a escolha adequada dos equipamentos para se fazerem as leituras desejáveis.

Dentre os instrumentos mais utilizados e mencionados na literatura, empregados em estruturas de concreto avariadas pela reação expansiva, pode-se citar:

- **Termômetros:** Consistem em dispositivos para medir a temperatura da massa do concreto, auxiliando na verificação da influência da temperatura quanto os dados coletados pelos demais instrumentos de monitoração de expansão.
- **Piezômetros:** Consistem em dispositivos cilíndricos metálicos dotados de pedra porosa e diafragma, instrumentados com extensômetros elétricos de resistência. A pressão externa aplicada ao diafragma fornece uma saída elétrica proporcional, que é lida com equipamento específico. Seu objetivo principal é medir o nível de pressão atuante.
- **Extensômetros múltiplos de hastes/fios:** Os extensômetros são projetados para serem soldados ou embutidos em diversas estruturas para monitoração de deslocamento e deformações.
- **Medidores triortogonais:** Correspondem a dispositivos capazes de medir abertura e fechamento de juntas de contração e fissuras, recalque diferencial entre blocos e deslizamento horizontal entre blocos.
- **Marcos superficiais:** São instrumentos utilizados para medir os deslocamentos e deformações horizontais e verticais.
- **Pêndulos:** São empregados para medir deslocamentos no plano horizontal, podendo avaliar eventuais deflexões.

Com o auxílio dos instrumentos de auscultação, poderão ser averiguados os possíveis danos que a RAA provocará a uma estrutura de concreto contaminada, podendo assim adotar medidas de reparo antes que os efeitos expansivos venham a comprometer a funcionalidade.

5. *Estudo de Caso*

5.1 Característica da Obra Estudada

A obra em que está sendo realizado o referido estudo é um importante edifício público situado na cidade de Recife/PE. O edifício foi construído há aproximadamente 13 anos.

5.2 Dados Sobre a Obra

O edifício tem toda sua estrutura concebida em concreto armado aparente e possui 13 (treze) pavimentos com forma retangular, sendo subdividida em três módulos devidamente separados por juntas de dilatação.

O módulo central da edificação possui 30 metros de comprimento e 34 metros de largura, onde estão localizados os elevadores e a escada de acesso aos pavimentos superiores. Os outros dois módulos laterais são idênticos, com comprimento de 25 metros e largura de 24 metros, e estão localizados simetricamente em relação ao módulo central. O concreto utilizado na obra foi usinado no início da década de 90 (SILVA e OLIVEIRA, 2006).

Na fundação, foram empregados blocos de coroamento com dimensões e formas variadas, apresentando volumes e número de estacas descritas no Quadro 5.1. As estacas são de concreto armado centrifugado com diâmetros de 400 a 700 mm. A Figura 5.1 mostra o detalhamento dos blocos em planta de forma da fundação.

Quadro 5-1 – Característica dos blocos de fundação

Blocos	Quant	seção	Altura (m)	Vol/ bloco (m3)	Vol Total (m3)	Nº de est/ bloco
BP03 - BP13 - BP12-BP 22	04	trape/retan	1,75	40,1	160	09
BP04 - BP14 - BP11-BP 21 BP 17 – BP 18	06	retangular	1,75	31,8	191	08
BP 5/6 - BP 15/16 BP 9/10 - BP 19/20	04	retangular	1,75	31,8	128	08
BP 07 – BP 08	02	hexagonal	1,75	38,2	76	08
BP 01 – BP 02	02	retangular	1,75	4,3	9	02
B 1	20	quadrado	1,75	6,4	128	01
B 2	10	quadrado	1,75	6,4	64	01
Total	48	-	-	-	756	-

Fonte: ANDRADE, 2005

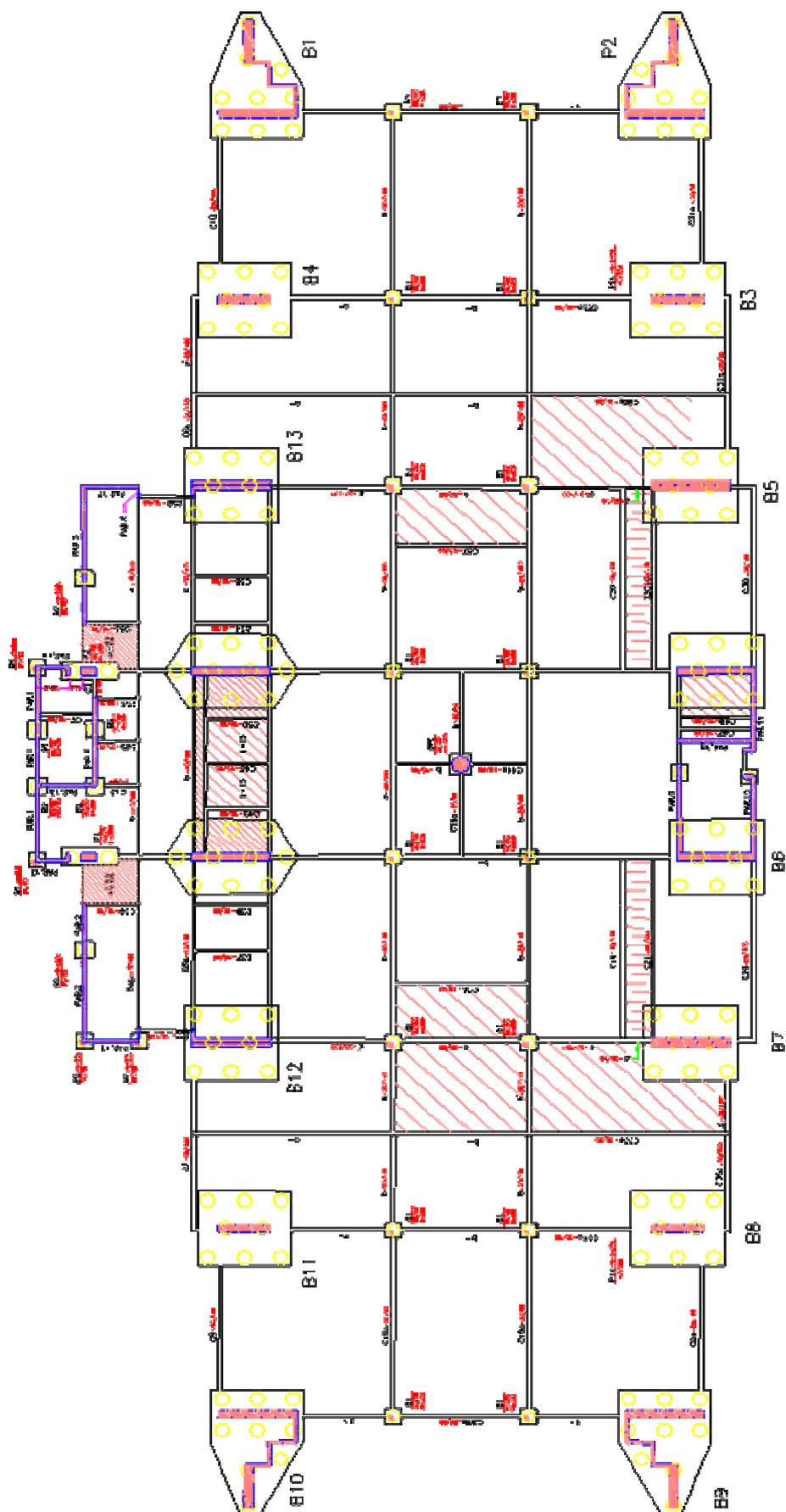


Figura 5.1 – Planta baixa de forma dos blocos

5.3 Histórico da RAA na Obra

Durante escavações realizadas para dar acesso ao edifício anexo, foram identificadas, na lateral de um dos blocos de fundação do edifício principal que havia sido descoberto, por conta das escavações, fissuras generalizadas. A partir daí, foram realizadas escavações em toda a periferia do bloco e constatou-se que o problema de fissuras estava em todas as faces do bloco, conforme se pode perceber na Figura 5.2. Foram efetuadas escavações em outros blocos com o objetivo de fazer uma inspeção visual para confirmar se o problema estava localizado ou generalizado em todos os blocos.



Figura 5.2 – Escavação preliminar para inspeção visual do bloco.

Após as escavações de alguns outros blocos, verificou-se que o problema era comum a todos os blocos da fundação. Vale ressaltar que as escavações não foram motivadas por sintomas na superestrutura do prédio.

Para identificação da real causa do problema, foram extraídos corpos-de-prova em locais diferentes e sobre as fissuras para identificar a profundidade das fissuras bem como seu comportamento no interior do bloco, conforme mostrado na Figura 5.3.

Com o objetivo de se evitarem especulações e falsos alardes sobre a integridade do prédio, nem todos os blocos foram escavados para realização da inspeção visual. Esse critério foi adotado por se tratar de um prédio público e bastante movimentado.

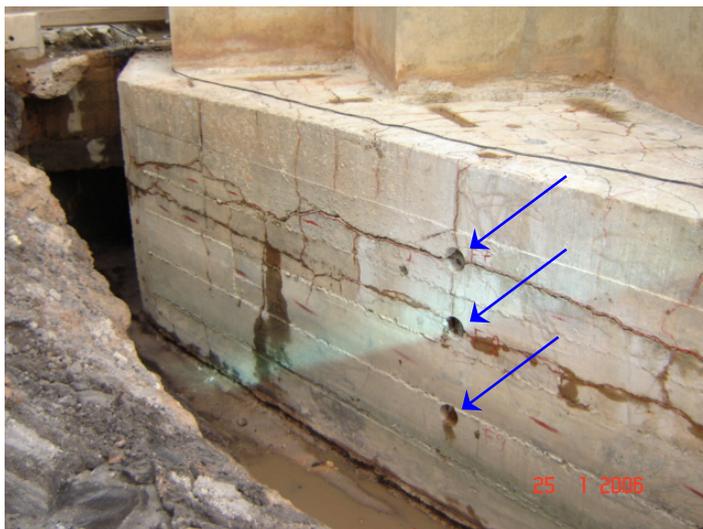


Figura 5.3 – Extração de testemunhos para análise laboratorial e verificação do comportamento das fissuras.

Os testemunhos extraídos com diâmetro de 100 mm foram embalados em papel filme para conservação de umidade e para evitar a contaminação de agentes externos como, por exemplo, carbonatação e ácidos de cloreto.

5.4 Ensaios Realizados nos Testemunhos dos Blocos

Os corpos-de-prova extraídos foram enviados para o laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), em São Paulo. Vários ensaios foram realizados com os testemunhos retirados dos blocos, conforme segue:

- Petrografia;
- Microscopia estereoscópica e óptica;
- Análise dos agregados utilizados na obra;
- Microscopia eletrônica de varredura;
- Teor de álcalis solúveis;
- Expansão do agregado graúdo;
- Resistência à compressão;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Módulo de deformação.

A análise laboratorial dos corpos-de-prova tem por objetivo avaliar a qualidade e a durabilidade do concreto com ênfase na ocorrência de eventuais reações expansivas.

5.4.1 Análise petrográfica

Os métodos empregados para caracterização do concreto correspondem:

- ASTM C 856-02 – Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete;
- NBR 7389/92 – Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado para concreto.

a) – Microscopia estereoscópica e óptica

Aspectos estruturais e texturais do concreto

Através de análise macroscópica e com microscópios estereoscópico e óptico, as principais características do concreto analisado estão sintetizadas no Quadro 5.2.

Quadro 5-2 - Análise Macroscópica do Concreto

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

Fonte: Relatório de ensaio nº 35927 - ABCP

De acordo com as características macroscópicas do concreto, foi verificado que a dosagem e o adensamento estão normais pelo fato de haver pequenas quantidades de vazios e com a distribuição dos agregados graúdos do tipo gnaisse bem homogeneizado.

Quanto à reatividade álcali-agregado, observou-se a presença de poros preenchidos por material esbranquiçado maciço, por vezes de aspecto gelatinoso, ou por tufos de cristais aciculares (etringita). De modo freqüente, observam-se, em torno dos agregados graúdos, bordas esbranquiçadas associadas à deposição de material nas superfícies de descolamento, conforme Figuras 5.4 a 5.9.

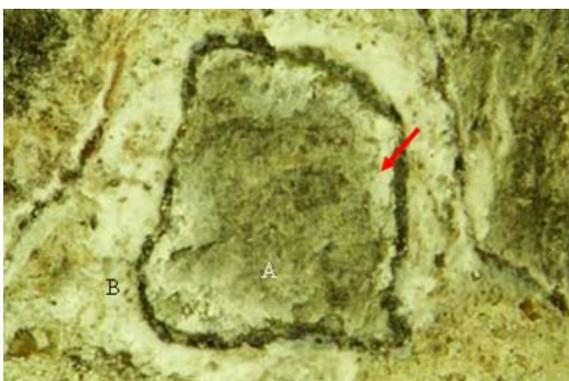


Figura 5.4 – Aspecto do concreto, onde se vêem bordas de reação (seta), no encontro do agregado (A) e o material esbranquiçado (B). Imagem obtida através de microscópio estereoscópico com ampliação 6X.

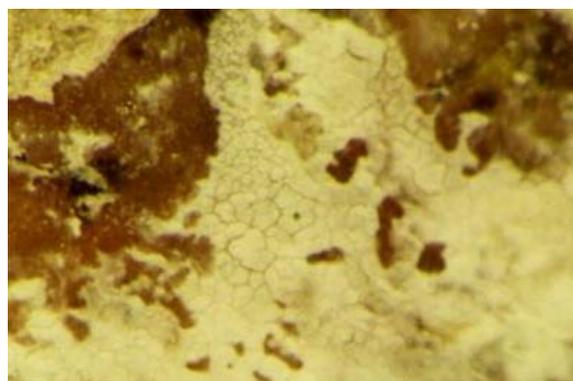


Figura 5.5 – Aspecto do gel gretado depositado sobre as superfícies de quebra dos agregados. Imagem obtida através de microscópio estereoscópico com ampliação 9X.

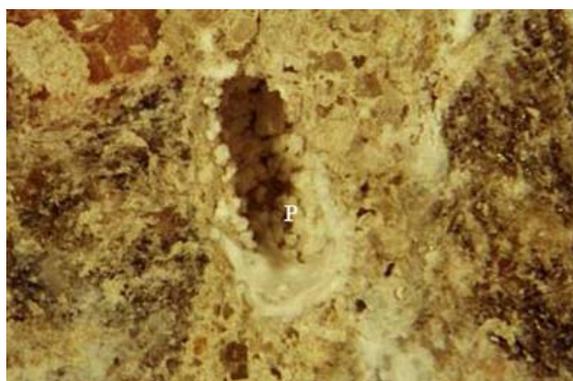


Figura 5.6 – Aspecto do poro (P) preenchido por tufos de material cristalizado e gel de aspecto cerâmico. Imagem obtida através de microscópio estereoscópico com ampliação 6X.

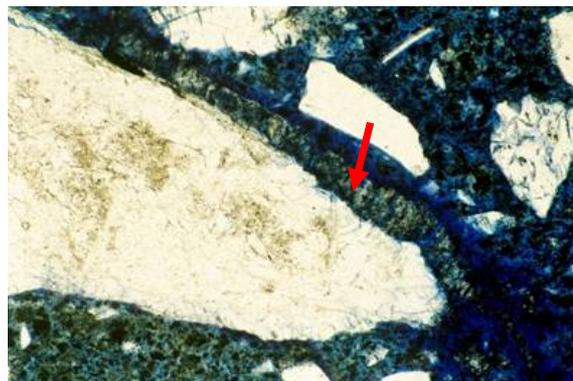


Figura 5.7 – Detalhe do concreto no qual se observa o gel desenvolvendo-se no contorno dos agregados (seta). Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 100X.

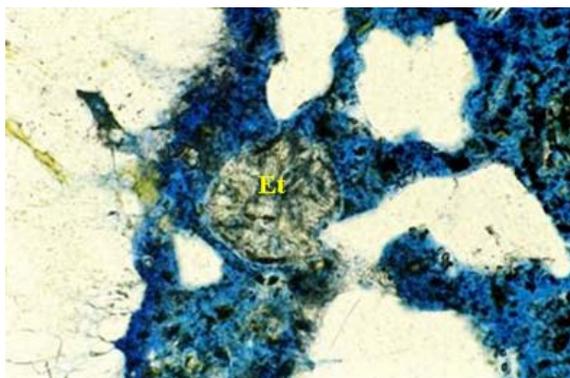


Figura 5.8 – Detalhe de um poro na borda do agregado graúdo preenchido por cristais de etringita (Et). Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 100X.

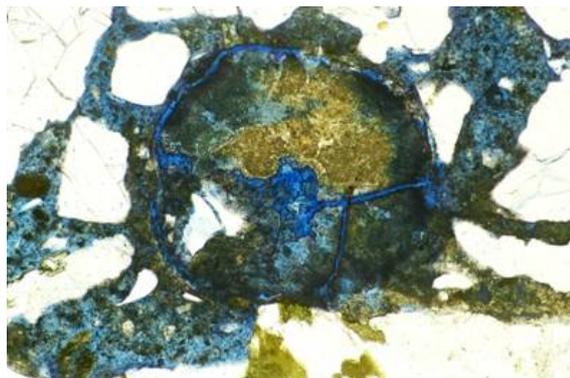


Figura 5.9 – Detalhe de um poro (P) na borda do agregado (A) preenchido por gel típico da RAA. Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 100X.

Fonte: Figuras 5.4 a 5.9 extraídas do relatório de ensaio n° 35927 – ABCP

b) Análise dos agregados utilizados na obra

Os testemunhos enviados para análise laboratorial mostraram que o concreto foi confeccionado com agregado do tipo pedra britada e areia natural, cujas características macroscópicas estão apresentadas no Quadro 5.3.

Quadro 5-3 - Características Gerais do Agregado Graúdo

Características		
Tipo		Pedra britada
Cor		Cinza
Forma		Eqüidimensional a lamelar
Grau de arredondamento		Angulosos
Dimensão	Intervalo de variação	0,5cm a 2cm
	Dimensão média	1,5cm
Caracterização físico-mecânica	Friabilidade	Não friável
	Compacidade	Compacto
	Tenacidade (resistência à quebra)	Elevada

Fonte: Relatório de ensaio n° 35927 – ABCP

Através de análise petrográfica, feita com microscópio óptico de luz transmitida, é apresentado o Quadro 5.4 com as características do agregado graúdo e o Quadro 5.5 com as características do agregado miúdo utilizados na confecção do concreto.

Quadro 5-4 – Síntese das Características do Agregado Graúdo

Características microscópicas		
Mineralogia	Principal	Quartzo, feldspato e mica
	Subordinada	Titanita e opacos
	Reativa/ Deletéria	Quartzo deformado com extinção ondulante, quartzo fino e quartzo recristalizado
Estrutura		Foliado orientado
Textura		Milonítica
Granulação		Média
Alteração		Pouco alterado
Deformação do agregado		Deformado
Tipo de rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Milonito
Reatividade potencial		Agregado reativo

Fonte: Relatório de ensaio n° 35927 – ABCP

Quadro 5-5 – Síntese das Características do Agregado Miúdo

Grau de arredondamento		Anguloso
Impregnações		Não observadas
Mineralogia	Principal	Quartzo, fragmentos de rocha
	Subordinada	Feldspato
Tipo/origem		Pó de pedra
Alteração		Não alterado

Fonte: Relatório de ensaio n° 35927 - ABCP

De acordo com os ensaios laboratoriais, o agregado utilizado na obra apresenta boa qualidade no que diz respeito à sua característica físico-mecânica. No entanto, do ponto de vista mineralógico, esse tipo de agregado é responsável pelo desencadeamento de reações expansivas do tipo álcali-silicato, pela presença de quartzo e feldspato em sua composição mineralógica.

Através das fotomicrografias apresentadas nas Figuras 5.10 e 5.11, percebem-se as características do agregado.

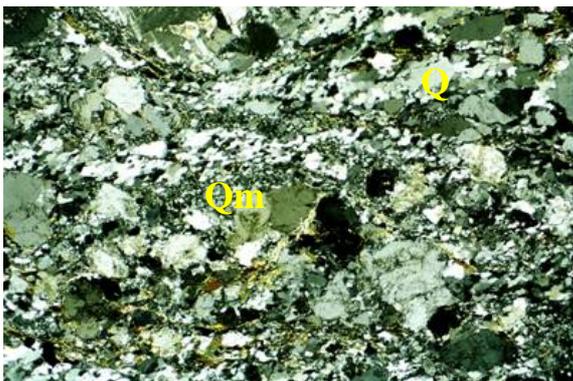


Figura 5.10 – Fotomicrografia do agregado no qual se observam cristais de quartzo deformado (Q) e massa de quartzo fino (Qm). Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 25X.

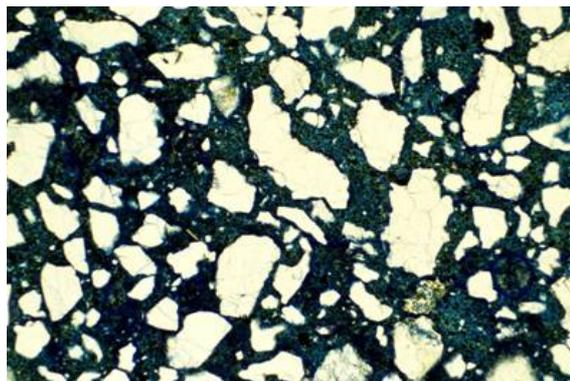


Figura 5.11 – Fotomicrografia do concreto mostrando os grãos de agregado miúdo angulosos. Imagem obtida através de microscópio de luz transmitida com ampliação 25X.

Fonte: Figuras 5.10 e 5.11 extraídas do relatório de ensaio n° 35927 - ABCP

c) Análise através da microscopia eletrônica de varredura

Com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura, pode-se melhor detalhar a microtextura do concreto utilizado na obra e caracterizar a ocorrência da RAA através de seus produtos constituintes.

Conforme havia sido constatado nos ensaios de análise dos agregados, as observações feitas através do microscópio também mostraram que as características microestruturais e texturais do concreto são compatíveis com um concreto de boa qualidade. Contudo, a análise dos locais onde se encontram os géis e cristais, resultante da reação química dos álcalis com os agregados, apresentam minerais com características da RAA.

Através da análise com a microscopia eletrônica de varredura, nota-se que os produtos cristalizados apresentam-se de maneira foliares e lancetados. Esses tipos de produtos se desenvolvem preferencialmente em meios aos grãos de quartzo ou feldspato presentes nos agregados graúdo, agrupando-se em “tufos” ou em grandes massas. O gel formado pela reação também está presente nos poros da argamassa e no contorno dos agregados graúdos.

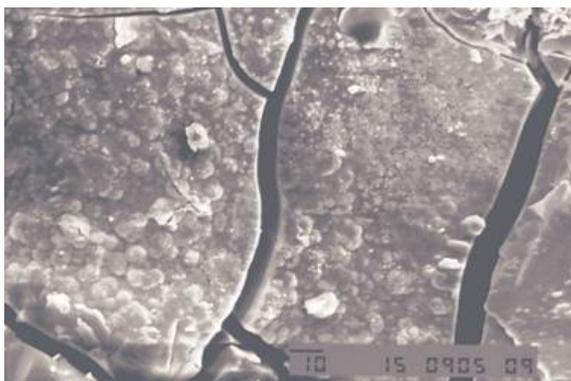


Figura 5.12 – Aspecto de detalhamento do gel gretado resultantes da reação álcali-agregado. Imagem obtida através de Microscópio Eletrônico de varredura.

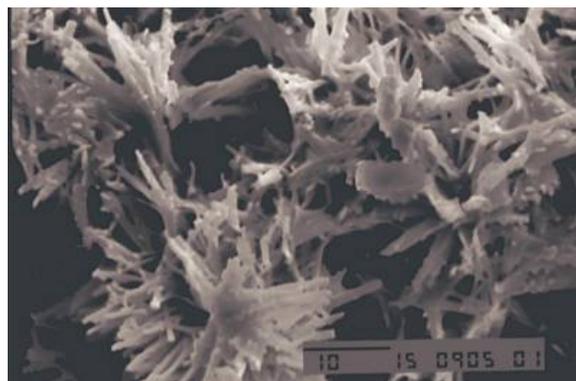


Figura 5.13 – Aspecto de detalhamento dos cristais lancetados (L) resultantes da reação álcali-agregado desenvolvendo-se sobre o agregado graúdo. Microscópio Eletrônico de varredura - 1500X.

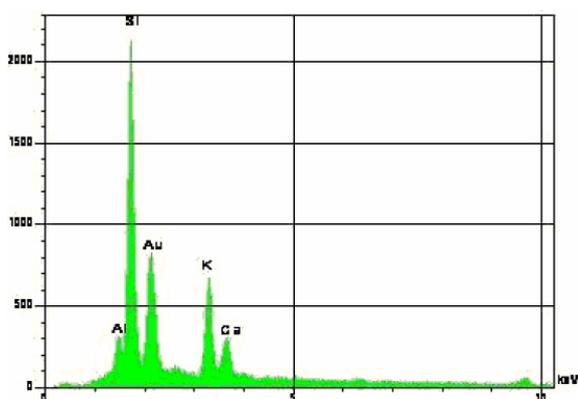


Figura 5.14 – Gráfico de EDS no qual se observa a composição aproximada dos cristais hidratados. Notar o elevado conteúdo de potássio (K). Microscópio Eletrônico de varredura/EDS.



Figura 5.15 – Aspecto de detalhamento do agregado recoberto com cristais aciculares de etringita. Imagem obtida através de Microscópio Eletrônico de varredura.

Fonte: Figuras 5.12 a 5.15 extraídas do relatório de ensaio nº 35927 - ABCP

Os resultados da análise petrográfica, empregada nos corpos-de-prova extraídos dos blocos de fundação, mostraram que o agregado graúdo utilizado na obra foi responsável pelo desencadeamento da reação do tipo álcali-silicato, e a característica do agregado foi classificada como milonito, conforme mostra o Quadro 5.4,

5.4.2 Determinação do teor de álcalis solúveis

Esse ensaio foi realizado no laboratório da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, cujo objetivo é caracterizar o teor de álcalis totais disponíveis no concreto utilizado nos blocos de fundação da obra.

Método de ensaio:

- PO-GT-3036 – Determinação de Óxido de Sódio e Potássio

Os resultados desse ensaio podem ser analisados no Quadro 5.6.

Quadro 5-6 – Determinação do teor de Álcalis Solúveis no Concreto dos Blocos

ABCP	Interessado	Teor (% em massa)			
		Na ₂ O (Total)	K ₂ O (Total)	Na ₂ O (Disponível)	K ₂ O (Disponível)
89522	Edifício situado na região metropolitana de Recife/PE	2,20	3,15	0,04	0,12

Fonte: Relatório de ensaio nº 36121 - ABCP

De acordo com os resultados, nota-se que o teor de álcalis solúveis corresponde a 0,12%, o que dá um total de 2,8kg de álcalis por m³. Esse valor é suficiente para o desencadeamento da reação química envolvendo os álcalis do cimento e o agregado reativo, segundo ACI 221.R-98.

5.4.3 Determinação de expansão do agregado graúdo

Esse tipo de ensaio é indicado para avaliar a reatividade do agregado frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, através da monitoração das expansões dimensionais de barras de argamassa, utilizando no ensaio um cimento comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado (referência: ABCP).

Método de ensaio:

- ASTM C 1260/05 – Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates.

A expansão média aos 14 dias de cura em solução alcalina é tomada como valor de referência para a estimativa da reatividade potencial do agregado com os álcalis. Expansões superiores a 0,20% aos 14 dias indicam que o agregado é reativo e que, entre 0,10% e 0,20%, o agregado é potencialmente reativo, necessitando de ensaios complementares para decisão quanto ao seu uso. E, quando os valores de expansão ficam abaixo dos 0,10%, o agregado é considerado inócuo (ASTM C 1260).

Os resultados de expansibilidade das barras foram plotados na Figura 5.16, na qual pode ser visto claramente o comportamento de expansão do agregado em relação ao tempo.

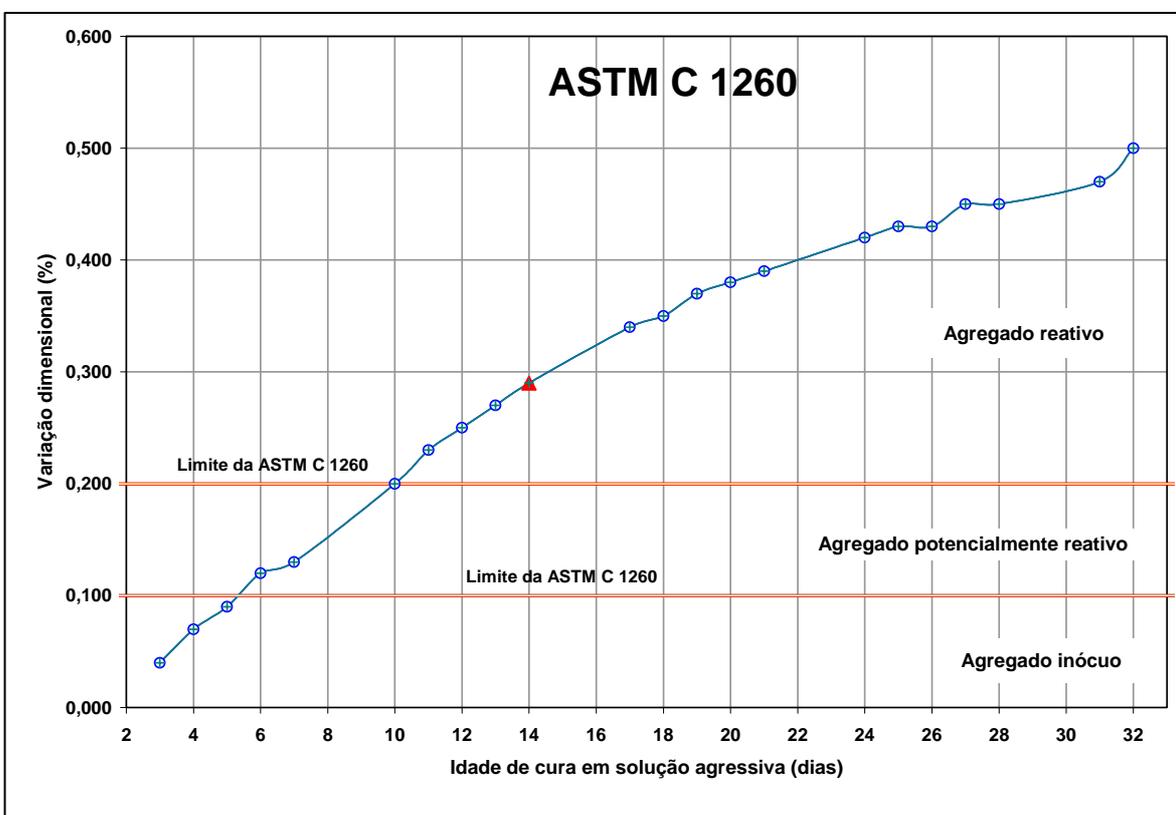


Figura 5.16 – Gráfico de expansão do agregado graúdo utilizado nos blocos de fundação.
 Fonte: Relatório de ensaio n° 36781 - ABCP

De acordo com os critérios estabelecidos pela ASTM C 1260/05, o agregado utilizado para análise é considerado reativo por apresentar expansões aos 14 dias igual a 0,29%, ou seja, valor acima dos 0,20%, conforme prescreve a norma.

5.4.4 Características mecânicas do concreto

a) Resistência à compressão do concreto

Para caracterização da resistência mecânica do concreto utilizado na fundação da obra, foram extraídos corpos-de-prova de dois blocos inicialmente inspecionados visualmente. Segundo Andrade *et al.* (2006), cada testemunho foi retirado com uma profundidade de 1,40 metros para obter uma maior amostragem das camadas de concretagem do bloco, haja vista que o volume total de concreto de um bloco foi realizado por um total de seis caminhões betoneira e que, com essa profundidade, pode-se obter uma representatividade de cinco caminhões.

O Quadro 5.7 mostra os resultados das resistências à compressão dos testemunhos extraídos dos dois blocos.

Quadro 5-7 – Resistência à Compressão do Concreto Utilizado nos Blocos

Bloco 22		Bloco 12	
Testemunhos	Resistência à compressão (MPa)	Testemunhos	Resistência à compressão (MPa)
F1-A (F. vertical)	29,2	F1-B (F. vertical)	20,5
F1-B (F. vertical)	24,6	F1-C (F. vertical)	21,0
F1-C (F. vertical)	26,9	F1-D (F. vertical)	27,4
F1-D (F. vertical)	26,9	F2-A (F. vertical)	23,8
F2-A (F. vertical)	26,4	F2-B (F. vertical)	26,0
F2-B (F. vertical)	22,5	F4-B (F. horizontal)	17,5
F2-C (F. vertical)	19,8	F5-A (F. horizontal)	32,8
F2-D (F. vertical)	22,8	F6-B (F. horizontal)	21,0
F4-A (F. horizontal)	24,9		
F6-C (F. horizontal)	23,8		
F9-A (F. horizontal)	33,0		
F9-B (F. horizontal)	17,3		
F10-C (F. horizontal)	26,9		
Res. média (MPa)	25,0	Res. média (MPa)	23,8
Desvio padrão (MPa)	4,0	Desvio padrão (MPa)	4,8

Fonte: ANDRADE *et al.*, 2006.

Ainda Andrade *et al.* (2006), cita em seu trabalho que a reação álcali-agregado pouco interfere na resistência à compressão do concreto.

Apesar de não haver informações sobre a resistência do concreto aos 28 dias de idade, para se fazer uma comparação com as resistências atualmente

obtidas, nota-se que os valores atuais atendem as resistências de projeto que foi de 18 MPa.

b) Resistência à tração por compressão diametral

Para se obterem maiores informações sobre a influência da RAA no concreto utilizado na obra, corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral. Com esses resultados, pôde-se fazer uma comparação entre a resistência à tração real, obtida através de ensaios, e a resistência à tração estimada, obtida através da correlação com a resistência à compressão. Segundo Dal Molin (1995, *apud* Andrade *et al.* 2006), a correlação para obter a resistência à tração através da resistência à compressão pode ser obtida através da Equação 5.1.

$$f_{tD} = 0,38 \times f_c^{0,63} \text{ MPa, para } 20\text{MPa} < f_c < 90 \text{ MPa} \quad \text{Eq. (5.1)}$$

Através das duas resistências médias dos blocos BP 22 e BP 12, representadas no Quadro 5.7, foram obtidos, por meio da Equação 5.1, os valores de resistência à tração por compressão diametral igual a 2,5 MPa e 2,8 MPa, respectivamente.

Após obtidos os valores de referência por meio da Equação 5.1, foram ensaiados três testemunhos à compressão diametral para se fazer um comparativo com as resistências de referência. O Quadro 5.8 mostra os valores das resistências à tração por compressão diametral.

Quadro 5-8 – Resistência à Compressão Diametral do Concreto

Testemunhos	Resistência à tração na compressão diametral medida (MPa)	Resistência à tração na compressão diametral estimada (MPa)	%
F3-A (BP 22 - F. horizontal)	1,8	2,9	62
F6-A (BP 22 - F. horizontal)	2,1	2,9	72
F3-B (BP 12 - F. horizontal)	1,8	2,8	64

Fonte: ANDRADE *et al.*, 2006.

Apesar de terem sido ensaiados apenas três testemunhos à compressão diametral, nota-se que os valores ensaiados foram menores que os valores estimados pelas resistências médias. Essa diminuição da resistência corresponde à perda de aderência entre o agregado e a pasta de cimento provocada pela expansão do gel em sua interface.

c) Módulo de deformação

Com o objetivo de se verificar o quanto a RAA vem influenciando na estrutura do concreto empregado na obra, testemunhos foram submetidos ao ensaio de módulo de deformação. Segundo Andrade *et al.* (2006), devido às microfissurações ocorridas na interface entre a pasta e os agregados, ocasionada, pelo fenômeno expansivo da reação álcali-agregado, a rigidez do concreto é diretamente prejudicada, ou seja, há uma diminuição da capacidade de deformação deste material.

Para melhor compreensão da efetiva interferência da reação na rigidez do concreto, adotou-se o modelo proposto pela NBR 6118/03, no qual se estima o módulo de deformação tomando por base a resistência de projeto do concreto. O valor estimado do módulo de deformação pode ser obtido através da Equação 5.2.

$$E_c = 5600 \times (f_{ck})^{1/2} \quad \text{Eq. (5.2)}$$

Os resultados dos ensaios realizados para se determinar o módulo de deformação estão representados no Quadro 5.9.

Quadro 5-9 – Módulo de Deformação dos Blocos BP 12 e BP 22.

BLOCO	F _{ck} (Mpa)	Resistência à compressão média (Mpa)	Módulo tangente (Gpa)	Módulo tangente médio (Gpa)
			Valor estimado	Valor ensaiado
BP 12	18,0	23,7	23,8	12,8
BP 22	18,0	26,8	23,8	14,5

Fonte dos dados: ANDRADE *et al.*, 2006.

Analisando o Quadro 5.9, nota-se que o módulo de deformação para o concreto utilizado na obra com resistência de projeto igual a 18 MPa apresenta um módulo de deformação igual a 23,8 GPa e os testemunhos ensaiados obtiveram valores bem abaixo do estimado pela NBR 6118/03, o que caracteriza uma forte influência das microfissurações na interface pasta/agregados provocadas pela reação expansiva.

Apesar de os ensaios realizados com corpos-de-prova retirados das estruturas comprovarem que os blocos de fundação estão sofrendo com os danos provocados pela expansão, alguns profissionais de engenharia civil comentam que as fissuras apresentadas nos blocos são decorrentes de esforços mecânicos excessivos e não de reação expansiva da RAA.

Com o objetivo de eliminar a hipótese de que as fissuras apresentadas nos blocos de coroamento são provocadas por esforços mecânicos, estudos realizados por Thomaz mostram o comportamento das fissuras provocadas por carregamento excessivo nos blocos, conforme se observa na Figura 5.17.

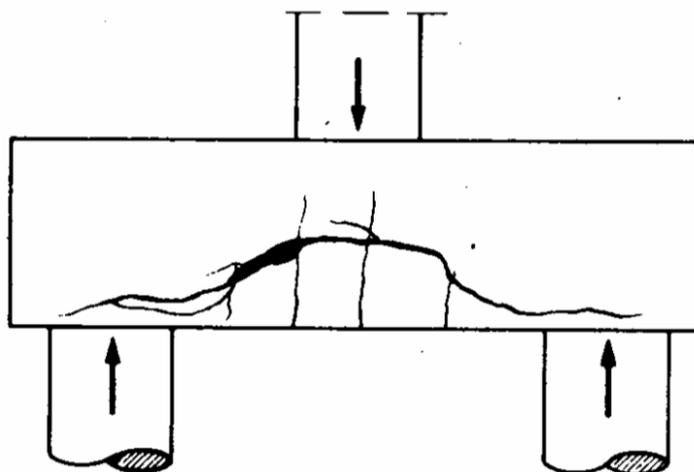


Figura 5.17 – Comportamento das fissuras provocadas por carregamento excessivo.
Fonte: Thomaz, E. C. S.

Nota-se na Figura 5.17 que as fissuras se comportam na lateral do bloco formando uma concha invertida.

Para comparar os resultados apresentados por Thomaz, Pitanga e Oliveira (2007) apresentam, em trabalho a ser publicado, o comportamento estrutural em um bloco de fundação, mostrando graficamente os esforços atribuídos ao

carregamento da superestrutura do prédio. Os resultados foram obtidos por um programa de elemento finito.

A Figura 5.18 mostra o resultado gráfico apresentado pelo programa.

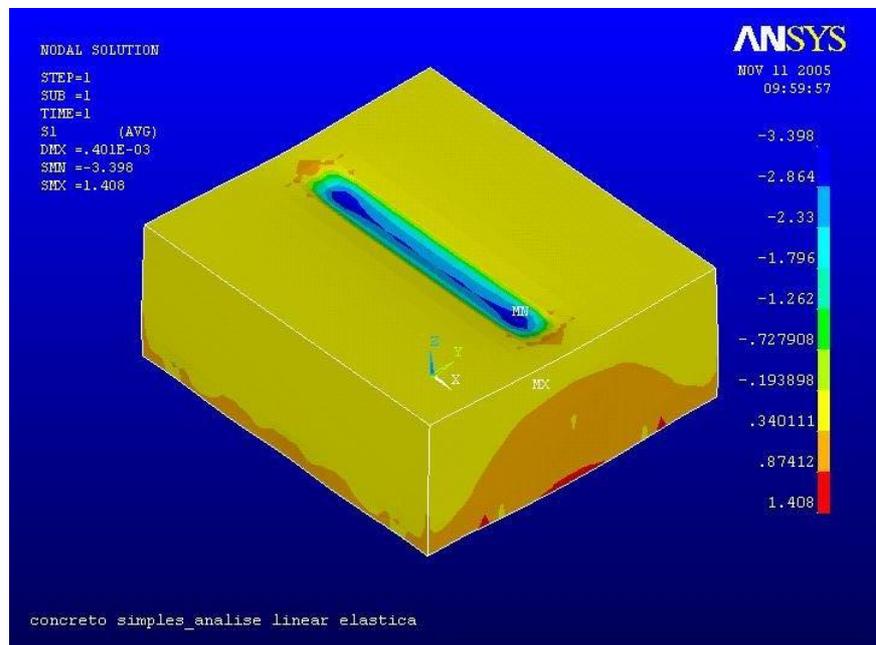


Figura 5.18 – Comportamento dos esforços devido ao carregamento.
Fonte: Pitanga e Oliveira, 2007

Analisando a Figura 5.18, nota-se que, na lateral do bloco, há uma tendência de esforço de tração com uma geometria semelhante à das fissuras mostradas na Figura 5.17.

Para diferenciar as fissuras provocadas por esforços mecânicos das realizadas pelo fenômeno expansivo da RAA, as Figuras 5.19 e 5.20 mostram o comportamento das fissuras no bloco de coroamento fissurado pela reação álcali-agregado. Esse fenômeno já havia sido comprovado por ensaios laboratoriais.



Figura 5.19 – Comportamento dos esforços devido ao carregamento.



Figura 5.20 – Comportamento dos esforços devido ao carregamento.

Analisando-se as Figuras 5.19 e 5.20, nota-se que as fissuras apresentam comportamento diferente das Figuras 5.17 e 5.18. Nos blocos com RAA, a fissura principal, ou seja, com maior abertura se dispõe no centro do bloco horizontalmente e, na extremidade, as outras fissuras se inclinam ascendentemente com um ângulo aproximadamente de 45° .

Com a confirmação efetiva da reação álcali-agregado nos blocos de fundação, conforme ensaios apresentado, iniciou um plano de recuperação dos blocos com o objetivo de devolve-lhes a integridade e restabelecer a vida útil da edificação.

Para isso, o plano de recuperação ficou dividido em duas etapas: a primeira consiste em fechar as fissuras para se evitar entrada de agentes agressivos no interior da peça e a entrada de umidade em grande proporção; a segunda etapa corresponde ao encapsulamento dos blocos, criando, dessa maneira, uma restrição às forças expansivas da RAA.

5.5 Plano de recuperação dos blocos - 1º PARTE – Fechamento das trincas

O processo construtivo de fechamento das trincas consistiu nas seguintes etapas:

5.5.1 Escavação do bloco afetado pela RAA.

A escavação dos blocos deve seguir rigorosamente as recomendações da NR-18.6 (Escavações, a fim de garantir a integridade dos operários).

5.5.2 Limpeza das faces do bloco e extração de testemunhos para análise laboratorial.

Depois de escavadas as laterais do bloco, foi realizado o procedimento de lavagem das faces do bloco para melhor visualização do quadro fissuratório e posterior calafetação externa das trincas e fissuras. Essa limpeza foi realizada com o auxílio de uma lavadora de alta pressão, igual à usada na lavagem de carros e fachadas, cuja capacidade de pressão é igual a 400 Kilopascal e tem uma vazão de 360 litros/hora, conforme Figura 5.21.



Figura 5.21 – Lavagem das faces com a lavadora de alta pressão.

Após as faces do bloco limpas e com as trincas bem visíveis, foram retirados testemunhos para realização de ensaios laboratoriais. A análise dos testemunhos tem por objetivo verificar se as trincas existentes no bloco são decorrentes do fenômeno da reação álcali-agregado. A retirada de testemunhos foi feita com o auxílio de uma máquina serra copo, conforme Figura 5.22.



Figura 5.22 – Retirada de testemunho para análise laboratorial.

Após extraídos, os testemunhos são embalados em papel filme para conservação da umidade a fim de evitar a entrada de agentes agressivos como íons cloreto e carbonatação, conforme Figura 5.23.



Figura 5.23 – Testemunhos envelopados em papel filme.

Os testemunhos foram protegidos, armazenados e identificados com lápis de cera, usado nos próprios testemunhos para evitar possível perda de etiqueta.

5.5.3 Furação das trincas de menor abertura e colocação de purgadores.

A colocação de purgadores (mangueira transparente com \varnothing de 10 mm e aproximadamente 200 mm de comprimento) ao longo das trincas e fissuras tem fundamental importância, pois é através desses que é realizado o processo de lavagem e injeção da calda de microcimento. No entanto, há de se considerar que nem todas as trincas permitem a colocação desses purgadores por terem abertura inferior a 10 mm.

Nas trincas onde não se podem colocar os purgadores, é necessária a furação com espaçamento aproximado de 250 mm (Figura 5.24).



Figura 5.24 – Furação das trincas com abertura inferior a 100 mm.

Esses furos são feitos com 100 mm de profundidade, e neles os purgadores penetram aproximadamente 90 mm para que fiquem totalmente fixos e não saiam com a pressão que lhes é imposta no momento em que é realizada a lavagem e injeção da calda de microcimento.

Nas trincas com abertura superior a 10 mm, a colocação dos purgadores é feita sem a necessidade dos furos (Figura 5.25), ou seja, os purgadores são introduzidos nas trincas com aproximadamente 90 mm de profundidade para que esses não saiam no momento de lavagem e injeção do material cimentício.

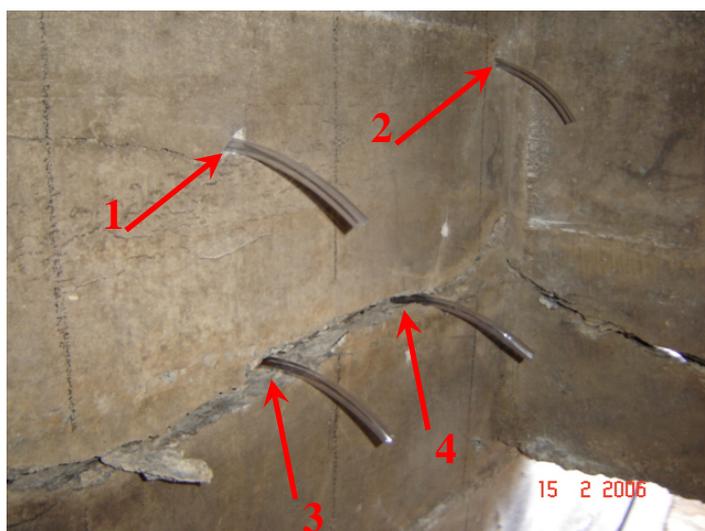


Figura 5.25 – Colocação dos purgadores nas trincas e nos furos.

Na Figura 5.25, as setas 1 e 2 mostram os purgadores colocados nos furos feitos onde as trincas são inferiores a 10 mm. As setas 3 e 4 mostram os

purgadores colocados onde as trincas são superiores a 10 mm. Como os purgadores possuem comprimento de aproximadamente 200 mm e apenas 90 mm fica no interior das trincas, o restante do comprimento fica livre pelo lado externo que servirá para encaixe do bico de injeção.

5.5.4 Abertura de furos com diâmetro de 2” abaixo da trinca principal.

A execução dos furos com \varnothing de 2” surgiu quando se verificou que as trincas e fissuras não estavam sendo preenchidas com o microcimento. Essa conclusão só foi possível com a retirada de testemunhos no bloco de fundação, onde já havia sido realizada a injeção com microcimento.

A retirada desses testemunhos foi posicionada a uma distância de 150 mm abaixo da trinca principal conforme Figura 5.26, com a finalidade de se encontrar o final da trinca, haja vista que essas têm um comportamento comum em todos os blocos, com inclinação aproximada de 45° descendente.



Figura 5.26 – Retirada de testemunho 150mm abaixo da trinca principal.

No processo de retirada dos testemunhos com profundidade aproximada de 350 mm, a trinca foi seccionada por completo no interior do bloco. Verificou-se que o microcimento não havia preenchido o interior da trinca, encontrando-se essa totalmente preenchida com areia e argila, conforme Figura 5.27.



Figura 5.27 – Face interna da trinca impregnada com areia e argila.

Analisando-se bem a Figura 5.27, nota-se que o microcimento chegou até certa profundidade, conforme indicado pela seta, mas foi impedido de preencher todas as trincas pelo fato de essas estarem cheias com o material com o qual o bloco foi aterrado. A Figura 5.28 mostra de forma mais evidente o interior da trinca através do furo feito na retirada do testemunho, dando uma idéia melhor das razões pelas quais o microcimento não conseguiu preencher o interior da trinca.



Figura 5.28 – Comportamento da trinca no interior do bloco, vista pelo furo realizado na extração de testemunho.

Através da Figura 5.28, fica mais fácil o entendimento do comportamento da trinca no interior do bloco, com relação ao ângulo descendente de

aproximadamente 45°, bem como o trecho mais escuro indicado pela seta apontando até onde o microcimento conseguiu penetrar. O trecho que se encontra fissurado logo abaixo da seta, no entorno da parede, corresponde à parte inferior da trinca que se encontrava cheia com material proveniente do aterrado do bloco.

Como a retirada do testemunho é feito através de uma serra copo de corte úmido, a periferia por onde é feito o corte fica totalmente lavada, retirando o material que ali se encontrava. Assim, a trinca não pode ser vista preenchida com areia e argila.

A partir da análise dos testemunhos mostrados nas Figuras 5.27 e 5.28, ficou comprovado que a lavagem feita através dos purgadores, colocados nas trincas, não foi suficiente para retirar toda a areia e a argila do interior das trincas e fissuras. Isso ocorreu porque o material mais grosso que estava nas trincas ficava mais adensado quando se injetava água pelos purgadores, fato que indica não ser suficiente a lavagem apenas pelos purgadores.

Na busca de uma forma mais eficiente para retirada desses materiais, surgiu a idéia de fazer furos abaixo da trinca principal (Figura 5.29) e em todas as faces de cada bloco, até conseguir encontrar sua extremidade. Inicialmente, foram feitos dois furos com \varnothing de 1", mas verificou-se que era impossível identificar se havia sido encontrado o final da trinca, pois os testemunhos saíam fragmentados devido ao pequeno diâmetro e à profundidade de perfuração na ordem de 350 mm. Devido a essas dificuldades, foram realizados furos com \varnothing de 2", visto que esse diâmetro facilitaria a visualização no interior dos furos, podendo-se assim, identificar o momento em que se atingia o final da trinca.

A idéia de se fazerem esses furos teve como objetivo lixiviar toda a areia e argila que se encontram no interior das trincas, ou seja, ao se realizar a lavagem das trincas injetando água pelos purgadores (parte superior), a água sairia pelos furos feitos logo abaixo, carreando todo o material que ali se encontrava.

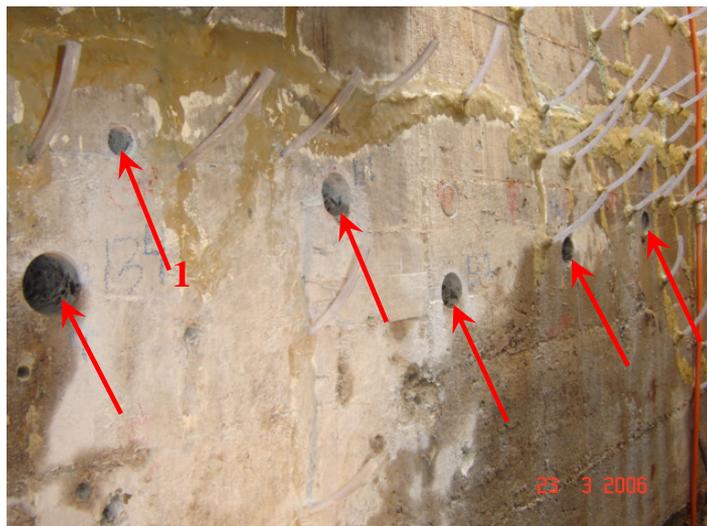


Figura 5.29 – Furos abaixo da trinca principal.

A Figura 5.29 mostra como foram feitos os furos abaixo da trinca principal: a seta “1” indica o primeiro furo com \varnothing de 1” e as demais setas, os furos com \varnothing de 2”. A distância para abertura dos furos abaixo da trinca principal foi estabelecida de forma empírica. Como o objetivo era encontrar o final da trinca, foi realizado o primeiro furo 150 mm abaixo e verificou-se que essa continuava descendo, haja vista que o comportamento da trinca já era conhecido com um ângulo de 45° descendente.

Ao realizar-se o segundo furo 350 mm abaixo da trinca, foi possível identificar sua extremidade. O testemunho exposto na Figura 5.30 mostra a parte superior da face da trinca se encontra impregnada de argila e a parte inferior está com a face limpa.



Figura 5.30 – Indicação do final da trinca através do testemunho extraído.

A extração do testemunho sem desfragmentá-lo pode mostrar como se comporta a trinca principal no interior dos blocos afetados pela RAA, conforme é observado na Figura 5.30. Pode-se notar no testemunho que, na face inferior, um pouco abaixo da metade, não há presença de argila. Isso indica que houve a ruptura nessa região, ou seja, que a trinca chegou ao fim nesse ponto.

Em média, foram feitos sete furos por face com espaçamento aproximado de 500 mm e profundidade de 350 mm, totalizando aproximadamente de 28 furos por bloco para facilitar a retirada de areia e argila no procedimento de lavagem. A realização desses furos não é um procedimento comum, porém foi adotado na obra por ser a forma mais prática e viável para a retirada dos materiais no interior das trincas. Vale ressaltar que esse procedimento não pode garantir que a limpeza das trincas e fissuras seja eficaz, apesar de ter apresentado ótimos resultados.

5.5.5 Sopragem das trincas, fissuras e furos feitos para colocação dos purgadores.

Essa etapa consiste em retirar da área, onde deverá ser aplicado o epóxi, todo material pulverulento, proveniente dos furos feitos nas trincas com espessura inferior a 10 mm.

É importante lembrar que a retirada do material pulverulento deve ser feita com o auxílio de um compressor e não se deve utilizar água, pois, se a superfície onde o epóxi for aplicado estiver molhada, este não obterá aderência suficiente, provocando vazamentos quando for injetado o microcimento. As Figuras 5.31 e 5.32 mostram como é realizada a retirada do material pulverulento.



Figura 5.31 – Retirada de pó nos furos dos purgadores.

A Figura 5.31 mostra a retirada do pó que se encontrava dentro do furo feito para colocação do purgador, utilizando-se ar do compressor.



Figura 5.32 – Retirada de pó nas trincas e fissuras.

A Figura 5.32 mostra a retirada do pó que se encontrava no início das trincas e fissuras, onde será aplicada a argamassa de epóxi, utilizando-se ar do compressor.

A lavagem dessas áreas não é recomendada pelo fato do epóxi não dar aderência quando há presença de água na superfície de contato. Portanto, caso seja necessária a lavagem, deve-se deixar que a superfície fique totalmente seca antes de se aplicar o epóxi.

5.5.6 Colocação dos purgadores nos furos e trincas.

Depois de realizado o procedimento de limpeza das trincas, fissuras e furos, retirando-se todo o material pulverulento, são colocados os purgadores com espaçamento aproximado de 250 mm, conforme Figura 5.33.



Figura 5.33 – Colocação dos purgadores nas trincas, fissuras e furos.

A Figura 5.33 mostra a colocação dos purgadores. É introduzido em 90 mm e o restante do purgador fica pelo lado de fora, para introdução do bico que servirá para injeção e, quando não mais estiver injetando material por um determinado purgador, ele é fechado, dobrado e amarrado. A parte do purgador introduzida é sempre no mesmo sentido da trinca.

5.5.7 Colmatação superficial das trincas de maior espessura com graute.

Diante de um bloco afetado pela RAA, pode-se ver um quadro fissuratório com diversas espessuras, e para fazer-se o serviço de injeção, é necessário fechar superficialmente toda a extremidade inicial das trincas. No fechamento superficial deve ser utilizado um material que promova aderência com a superfície, do bloco, impedindo que haja vazamentos e permitindo o suporte a pressão de injeção.

O epóxi, por apresentar ótima capacidade de aderência com a superfície seca e por ter uma excelente resistência, foi indicado para fazer a colmatação

superficial dessas trincas. Porém, sabe-se que esse material tem um custo muito elevado no mercado e isso tornaria alto o custo de recuperação do bloco, ou seja, se esse material fosse utilizado para fechar todas as trincas com espessura maior que 10 mm, devido ao grande consumo, o custo da obra se elevaria bastante.

Para facilitar a mão-de-obra na aplicação do epóxi e reduzir o consumo desse material, foi utilizado, no fechamento das trincas com espessura superior a 10 mm, o graute Figura 5.34, com quantidade de água suficiente para deixar a argamassa trabalhável.



Figura 5.34 – Fechamento superficial da trinca com espessura maior que 10 mm.

Apesar de a trinca estar totalmente fechada com graute, o material apenas penetrou 20 mm na trinca pelo fato da argamassa estar com consistência trabalhável. Após a secagem dessa argamassa, é feita a calafetagem com epóxi dessa trinca sobre a argamassa para evitar possível vazamento na hora de injeção do microcimento.

5.5.8 Colmatação superficial de todas as trincas e fissuras.

A colmatação superficial consiste em fechar externamente as trincas e fissuras nas faces do bloco, evitando a saída do material a ser injetado no interior. Para fazer o fechamento, é utilizada argamassa de epóxi e caulim (argila ultra-fina). A associação do caulim ao epóxi serve para deixar a mistura mais consistente igual a uma massa de modelar (Figura 5.35), haja vista que o epóxi

possui consistência muito fluida e seria impossível aplicá-lo no plano vertical das faces dos blocos.



Figura 5.35 – Preparo da argamassa de epóxi e caulim.

Depois de misturados os dois componentes do adesivo à base de epóxi de alto desempenho, o conjunto já misturado é posto sobre um pedaço de madeira plano e aos poucos lhe é adicionado o caulim. A adição do caulim se dá até a mistura obter consistência igual à de uma massa de modelar, ou seja, não mais fluir entre os dedos da mão. A proporção de mistura desses materiais é em média 0,20 kg de caulim para cada um kg de epóxi.

Para este tipo de mistura (epóxi com caulim), não foram feitos ensaios de plasticidade e granulometria, principalmente de resistência à compressão. É possível que a resistência do adesivo tenha sofrido diminuição com a adição do caulim, mas isso não causa nenhum problema na recuperação dos blocos, pois para essa argamassa, não será solicitado nenhum tipo de esforço, exceto o de aderência superficial na extremidade inicial das trincas e fissuras para impedir a saída do material cimentício no momento de injeção.

Após a preparação da argamassa, deve-se fazer o fechamento superficial das trincas (Figura 5.36). Esse fechamento consiste em aplicar a argamassa preparada sobre as fendas e aplicar uma força sobre a argamassa com as pontas dos dedos, deixando a argamassa aderida sobre a parede do bloco. Dependendo da abertura da trinca, a argamassa pode penetrar cerca de 10 mm no seu interior.



Figura 5.36 – Aplicação da argamassa de epóxi misturado com caulim.

Ao se fixarem os purgadores, esses devem ter uma atenção especial já que 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 sobre uma área maior. Dessa forma, a argamassa que esta 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.

Nas trincas com espessura maior que 10 mm que foram primeiramente fechadas com graute para diminuir a mão-de-obra e reduzir o consumo do epóxi, a aplicação do epóxi com caulim é indispensável. A aplicação da argamassa de epóxi sobre a trinca já preenchida superficialmente com graute tem como objetivo evitar possível vazamento. A aplicação da argamassa corresponde ao mesmo procedimento adotado para fechar as trincas com espessura menor que 10 mm, ou seja, aplica-se a argamassa de epóxi sobre a trinca e, com auxílio das pontas dos dedos, deve-se pressioná-la contra a trinca já grauteada, conforme Figura 5.37.



Figura 5.37 – Aplicação da argamassa de epóxi e caulim sobre a trinca grauteada.

A aplicação da argamassa de epóxi sobre o graute indicado pela seta só pode ser feita quando o graute que foi posto na trinca estiver totalmente seco, ou seja, a superfície não deve ter presença de água para não comprometer a aderência da argamassa de epóxi provocando pontos de vazamento.

Com exceção dos furos com \varnothing de 2", todas as trincas e fissuras devem ser fechadas superficialmente. Os furos com diâmetro de 2" só poderão ser fechados após lavagem interna.

5.5.9 Lavagem do interior das trincas e fissuras.

Após um período de 24 horas de finalizado o serviço de fechamento superficial das trincas e fissuras, procede-se à lavagem interna dessas, injetando água sobre pressão. Esse procedimento é feito com o auxílio de um compressor e um tanque de dez litros indicado para injeção de resinas, natas, grautes e mastiques.

A lavagem interna das trincas e fissuras consiste em injetar água pelos purgadores até que todo o material seja removido de seu interior. A retirada da areia e argila que se encontra no fundo da trinca só é possível por causa dos furos de 2", feitos anteriormente para retirada desses materiais.

Para isso, é necessário fazer com que a água injetada sobre pressão seja induzida a sair pelos furos de 2", fechando todos os purgadores que foram colocados na face do bloco, conforme mostra a Figura 5.38.



Figura 5.38 – Purgadores fechados antes do início da lavagem.

Nota-se, pela Figura 5.38, que todos os purgadores foram fechados com auxílio de um bico de PVC, utilizado em bisnaga de silicone, deixando apenas o furo de 2", indicado pela seta, aberto para que a água saia por ele.

A construção desses furos abaixo da trinca principal mostrou ser bastante eficiente, conforme mostra a Figura 5.39.



Figura 5.39 – Início de saída d'água que foi utilizada na lavagem.

Ao sair o início da água que foi injetada pelos purgadores acima, nota-se que esta sai com uma coloração bastante avermelhada (Figura 5.39). Essa coloração se dá porque a da água leva consigo o material argiloso que foi encontrado.

Ao se repetir o processo de lavagem por diversas vezes e sempre variando de purgador, por onde é realizada a injeção, percebe-se que a água vai tomando sua cor cristalina e retirando por sua vez grande quantidade da areia no interior da fissura principal, conforme mostra a Figura 5.40.



Figura 5.40 – Saída d'água após um período de lavagem das trincas.

No interior do furo mostrado na Figura 5.40 nota-se claramente a pressão da água que sai da trinca pelo fato de não haver mais obstrução desta pela areia e argila que ali se encontravam.

A retirada do material com maior granulometria é facilmente identificada através da Figura 5.41, que mostra a areia depositada no fundo do furo por onde está saindo à água.



Figura 5.41 – Areia depositada proveniente do interior das trincas.

Essa porção de areia que está depositada no fundo do furo é apenas uma pequena parte do volume desse material que foi removido do interior das trincas.

Depois de lavadas as trincas de todas as faces do bloco, é necessário que seja feita uma nova lavagem sendo que em sentido contrário ao que foi efetuado anteriormente. Essa nova lavagem serve para remover possíveis partículas de materiais que tenham se desprendido das faces das trincas pelo fato de não estarem mais comprimidas pelos materiais que foram removidos.

A lavagem do interior das trincas de um bloco só termina quando a água que sai pelos furos de 2" apresenta a mesma coloração da que entrou pelo purgador e quando não mais estiverem saindo partículas de material, conforme se vê na Figura 5.42.



Figura 5.42 – Saída da água injetada pelos purgadores sem areia.

A Figura 5.42 mostra quando se dá o término da lavagem no interior das trincas e fissura: a água que desce pela trinca sai totalmente cristalina e sem remover nenhuma partícula de areia ou argila.

Com o objetivo de garantir a efetividade do procedimento de lavagem, foram retirados testemunhos com \varnothing de 2" antes e depois da lavagem, conforme mostram as Figuras 5.43 e 5.44.



Figura 5.43 – Extração de testemunho antes da de lavagem das trincas.

Observando a figura acima, nota-se que o testemunho extraído antes da lavagem encontra-se com a face da trinca no interior do bloco totalmente impregnada com solo.



Figura 5.44 – Extração de testemunho depois da lavagem das trincas.

Com a retirada de testemunhos após o procedimento de lavagem, pode-se comprovar a efetividade da limpeza e que os furos com \varnothing de 2" serviram aos seus propósitos. A Figura 5.44 mostra o testemunho extraído depois da lavagem das trincas no interior do bloco: percebe-se que a face da trinca está totalmente isenta de qualquer tipo de material que possa ser removido. Apesar de a face da trinca estar totalmente limpa, pode-se observar que está com uma coloração um pouco avermelhada. Essa coloração é responsável pelas partículas de argila que se solidificaram em sua face ao longo do tempo e que é impossível de serem retiradas no ato da lavagem.

5.5.10 Retirada do excesso de água no interior das trincas e fissuras após lavagem.

Esse procedimento é sempre executado depois de concluída a lavagem do bloco e tem uma fundamental importância, pois, retirando-se a água, evita-se que haja alteração na composição da calda de microcimento a ser injetada.

Apesar de a injeção ser feita com um material que é misturado à água, é importante que seja retirado o excesso d'água do interior do bloco, para evitar o favorecimento de novas expansões. A Figura 5.45 mostra a retirada d'água com o auxílio de um compressor, injetando ar pelos mesmos purgadores que serviram para injeção.



Figura 5.45 – Saída de água retida nas trincas pela força do ar injetado.

Para realização desse procedimento, não é necessário fechar os purgadores para poder canalizar a saída de ar pelos furos de 2", conforme feito para lavagem das trincas. Como a trinca principal é orientada a um ângulo de 45° descendente, a água dificilmente poderá ficar retida, exceto em pontos onde deva ter cavidades já que a face da trinca não corresponde a uma superfície lisa e uniforme.

A injeção de ar deve ser sempre executada primeiramente pelos purgadores superiores e sempre se deve deixá-los abertos para que a água também saia por eles. O fechamento dos purgadores só é necessário quando se deseja que o ar saia pelos furos de 2", conforme mostrado na Figura 5.45, onde podem ser vistos os dois purgadores ao lado do furo fechado e o ar canalizado pelo furo expulsando as partículas d'água do interior da trinca.

5.5.11 Fechamento dos furos de 2" com graute e epóxi.

Depois de executados os serviços de lavagem e da retirada do excesso d'água através de injeção de ar pelos purgadores, é necessário o fechamento dos furos com \varnothing de 2" que serviram para retirada de solo no momento de lavagem do interior das trincas e fissuras.

Para fechar esses furos, é adotado o mesmo procedimento de fechamento das trincas com espessura superior a 10 mm, ou seja, a face do furo é fechada utilizando argamassa de graute, não fluido, conforme Figura 5.46.



Figura 5.46 – Fechamento do furo de 2" graute.

O fechamento dos furos não deve ser totalmente preenchido com graute, pois esses furos servirão para injeção da calda de microcimento. Portanto, devem ser fechados apenas 20 a 30 mm do furo partindo da face do bloco. O furo efetuado para retirar o material também servirá para injetar a calda de microcimento é necessária a colocação de um purgador para cada furo no momento em que o furo é fechado com graute (Figura 5.46). Logo em seguida, é vedado todo o furo, conforme Figura 5.47.



Figura 5.47 – Fechamento do furo de 2” com graute.

Após o fechamento dos furos com o graute, espera-se um período de 24 horas para que a argamassa seque e em seguida o furo é colmatado com argamassa de epóxi misturada com caulim para evitar possível vazamento quando for injetado o material, conforme Figura 5.48.



Figura 5.48 – Colmatação do furo de 2” com argamassa de epóxi.

A colmatação dos furos sobre o graute, indicada pela seta na figura acima, segue o mesmo princípio adotado na colmatação das trincas com espessura superior a 10 mm, ou seja, assim como a trinca, os furos serão preenchidos apenas com a calda de microcimento a ser injetado.

5.5.12 Injeção de microcimento nas trincas e fissuras.

A injeção de microcimento corresponde ao último dos procedimentos adotados, ou seja, o microcimento só pode ser injetado nas trincas depois que todos os outros procedimentos (fechamento, lavagem e secagem das trincas) tenham sido realizados de forma satisfatória, pois o sucesso da injeção da calda de microcimento está diretamente ligado à correta execução dos procedimentos anteriormente adotados.

Para assegurar a efetiva transmissão de esforços, os espaços correspondentes às trincas foram completamente preenchidos. Para isso, foi realizada a injeção com material cimentício cuja resistência equivale à resistência do bloco de concreto.

Difícilmente se pode assegurar que o preenchimento da trinca tenha sido realizado com perfeição. Apesar de terem sido tomados todos os cuidados no ato da lavagem, deixando os furos com \varnothing de 2" para que o material fosse carreado, pode-se afirmar que nem todo o material foi removido. Devido à grande quantidade de argila e areia que foram depositadas ao longo do tempo, formando uma mistura endurecida, uma pequena parte se solidificou na face interna das trincas, conforme mostrado na Figura 5.49. Portanto, devido a esse isolamento provocado pela argila, o microcimento injetado não poderá ter perfeita aderência em todas as faces da trinca.

Mesmo sabendo que a transmissão dos esforços não será totalmente garantida, o preenchimento das trincas é necessário para evitar que novas patologias apareçam, tais como: oxidação das armaduras e entrada de água que venha a favorecer novas expansões.

As figuras abaixo mostram o processo de injeção do microcimento no interior do bloco.

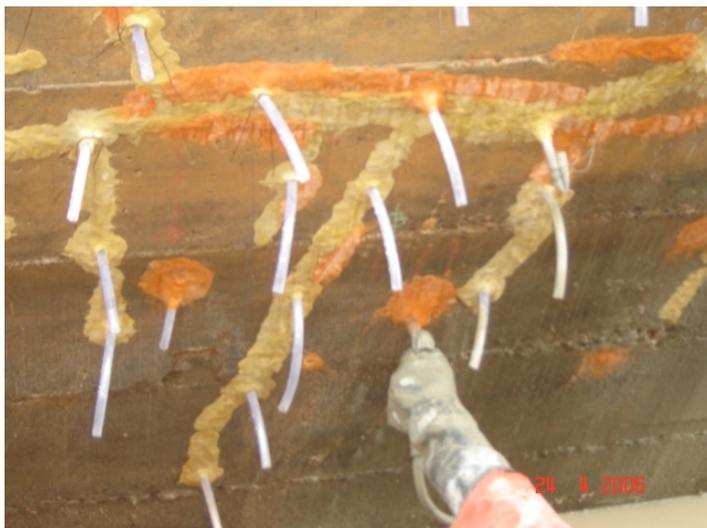


Figura 5.49 – Injeção de microcimento pelo furo de 2”.

Ao injetar o microcimento, devem ser tomados alguns cuidados para evitar que o interior das trincas e fissuras fique vazio. Para evitar que isso ocorra, a injeção do microcimento deve sempre começar pelos pontos mais baixos. Adotando-se esse procedimento, consegue-se fazer os preenchimentos dos interiores das trincas uniformemente e sem deixarem vazios.

O preenchimento das trincas deve ser realizado pela parte inferior conforme mostrado na Figura 5.49, pois o material que entra expulsa o ar pelos purgadores superiores, fazendo com que a calda de microcimento preencha todos os espaços vazios nos interiores das trincas.

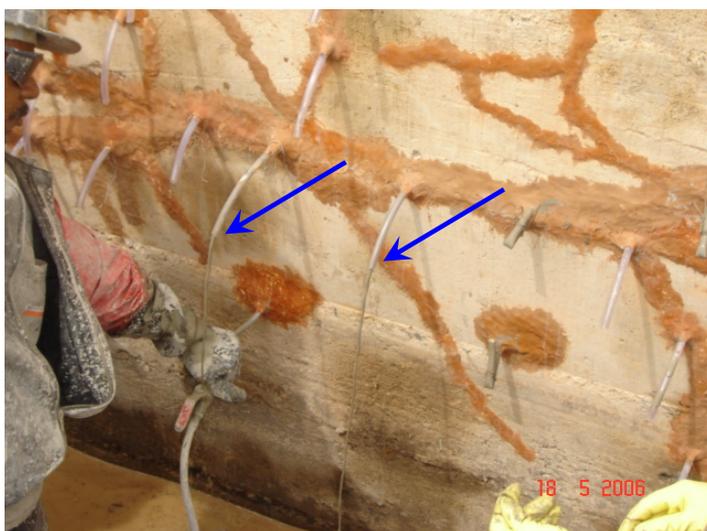


Figura 5.50 – Saída do microcimento pelos purgadores da trinca principal.

Quando a trinca estiver totalmente preenchida com o material injetado, os purgadores superiores ao que está sendo injetado começam a eliminar o excesso de material, conforme indicado pelas setas na Figura 5.50.

Ao se verificar que o microcimento injetado está começando a sair pelos purgadores superiores, esses devem ser fechados para evitar o desperdício de material. O fechamento dos purgadores pode ser feito de duas maneiras: a primeira consiste em dobrar a mangueira e amarrar com um pedaço de arame nº 18, indicado pelas setas na Figura 5.51; a segunda maneira é fechar os purgadores com o bico de bisonaga de silicone que foi utilizado no processo de lavagem interna das trincas.



Figura 5.51 – Fechamento dos purgadores após preenchido com microcimento.

Ao fechar os purgadores por onde o microcimento está saindo, o material injetado começa a ganhar pressão internamente. Devido a esse ganho de pressão, o material procura ocupar outros espaços vazios até que as trincas fiquem completamente cheias e comecem a sair por outros purgadores. Esse procedimento é repetido até que todos os purgadores estejam fechados e não mais esteja entrando o material.

O local por onde é injetado o material deve variar por duas razões, a primeira é o fato de não mais se estar conseguindo injetar o material por este purgador e a segunda razão corresponde à longa distância de saída do material com relação ao ponto de entrada. Essa distância é prejudicial pelo fato de reduzir

a pressão no trecho onde o material está sendo acomodado. Sendo reduzida excessivamente a pressão em um determinado trecho, este pode ficar com ar devido à falta de pressão para expulsá-lo.

A Figura 5.52 mostra a injeção do microcimento; a seta n° 1 mostra o local de injeção do microcimento na parte inferior do bloco e as setas n° 2 e 3 mostram o fechamento dos purgadores por onde sai o material que foi injetado.



Figura 5.52 – Pontos de saída do microcimento pelos purgadores.

Apesar de comprovar que as trincas no interior do bloco estão se comunicando, devido ao fato de a saída do microcimento ser bem distante do ponto de injeção (mostrada na Figura 5.52), não é recomendado que se injete o material apenas por um purgador, para evitar possíveis falhas de preenchimento das trincas e fissuras.

Depois de concluída a injeção do microcimento, o bloco afetado pela RAA ganha uma aparência melhor, aumentando psicologicamente a confiança dos leigos em relação aos blocos, conforme mostra a Figura 5.53.



Figura 5.53 – Bloco afetado pela RAA após a Injeção de microcimento.

Num período de cinco dias após conclusão do serviço de injeção, os purgadores são cortados rentes à face do bloco (Figura 5.54), pois esses não mais terão utilidade e iriam atrapalhar na segunda etapa de recuperação, que é a fase de encapsulamento do bloco.



Figura 5.54 – Corte dos purgadores rente a face do bloco.

Para comprovar que o procedimento de limpeza havia sido realizado de forma satisfatória, deixando as trincas e fissuras totalmente desobstruídas para ser preenchidas com microcimento, foram retirados testemunhos de todos os blocos após um período de 28 dias de concluída a injeção do material cimentício.

A retirada desses testemunhos teve como objetivo principal verificar se as trincas e fissuras tinham sido preenchidas com o material injetado. Conforme se

esperava nos pontos de onde foram extraídos testemunhos com \varnothing de 2", totalizando quatro unidades por bloco, o que corresponde a um testemunho por cada face, todas as trincas e fissuras estavam preenchidas com o microcimento injetado e com as faces das trincas consolidadas (Figura 5.55).

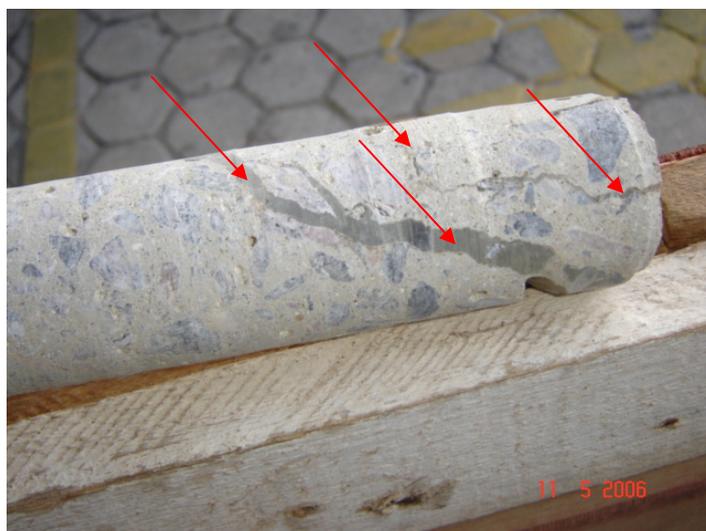


Figura 5.55 – Testemunho extraído após a injeção do microcimento.

A Figura 5.56 mostra um dos testemunhos extraídos após injeção do microcimento. As setas apontam as partes mais escuras onde o microcimento penetrou deixando os espaços vazios preenchidos.

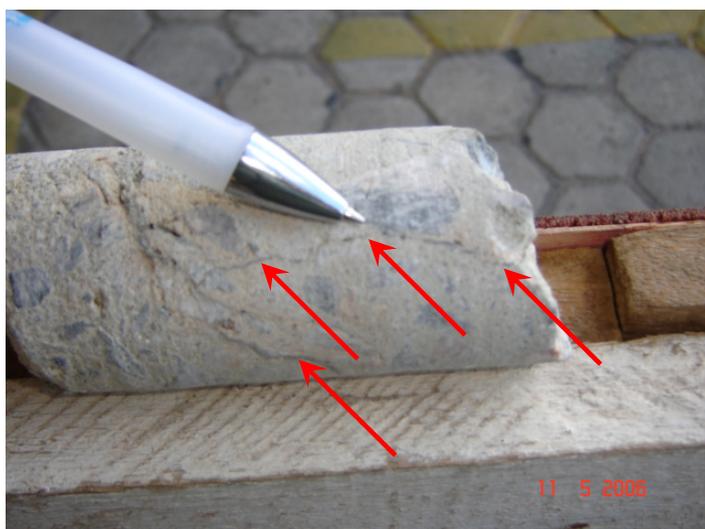


Figura 5.56 – Injeção do microcimento nas trincas finas.

A Figura 5.57 mostra em outro testemunho extraído que o microcimento consegue penetrar nas pequenas fissuras. As setas apontam as pequenas fissuras, todas preenchidas com o material injetado.

5.6 2° PARTE – Encapsulamento do bloco afetado pela RAA

Para realização do processo construtivo de encapsulamento dos blocos afetados pelo fenômeno expansivo da RAA, primeiramente deve-se ter um entendimento a respeito do comportamento da estrutura a ser recuperada. Com o aparecimento do fenômeno da RAA nos blocos de fundação nos edifícios da região Metropolitana do Recife, entender o comportamento dessas estruturas passou a ser um desafio para os técnicos sobre o assunto e para os calculistas de estruturas.

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 obra sua estabilidade e confiabilidade de projeto.

Atualmente, 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-agregado.

Para entendermos o procedimento de intervenção adotado nos blocos de coroamento desta obra, primeiramente devemos compreender os componentes do mecanismo resistente dos blocos.

5.6.1 Estudos realizados sobre os efeitos expansivos nas estruturas de concreto

Esses estudos foram de grande utilidade para o entendimento do comportamento de estruturas de concreto sobre os efeitos expansivos da reação álcali-agregado.

Ensaio realizado por Le Roux (1992) mostraram que as tensões de compressão, aplicadas em corpos-de-prova sobre os efeitos da RAA, atuaram restringindo a expansão na direção a qual foi imposta à carga. Nos ensaios, vários carregamentos foram aplicados e verificou-se que uma força de compressão na ordem de 5MPa é capaz de praticamente anular os efeitos expansivos da reação.

Resultados semelhantes foram apresentados por Silveira (1997), em estudos realizados na barragem de Kariba/África, onde o monitoramento realizado com deformímetros apresentou expansões praticamente nulas nas áreas sob tensões de confinamento, na ordem de 3 a 4MPa.

Ensaio laboratoriais mostraram que a expansão do concreto está restrita à área onde não ocorrem fortes compressões, pois as tensões de compressão aplicadas a corpos-de-prova restringem a expansão da reação nessa direção (LARIVE, 1997). Esse estudo foi de fundamental importância para o meio técnico, pois, através desse trabalho, foi possível entender melhor o comportamento das fissuras nas estruturas afetadas pela RAA.

5.6.2 Áreas comprimidas no bloco de coroamento

Os blocos de coroamento são empregados como elementos estruturais de fundação para transmitir os esforços oriundos do pilar, vigas e lajes às estacas, conforme Figura 5.57, quando as camadas superficiais de solo não forem resistentes.

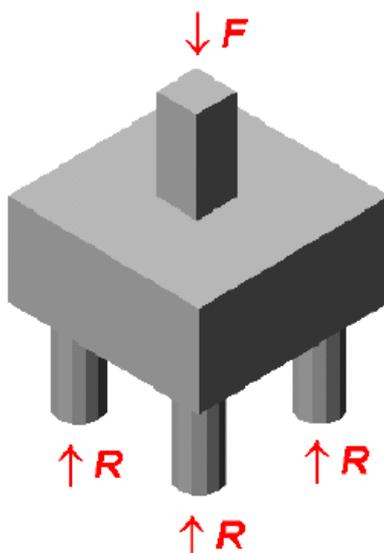


Figura 5.57 – Representação do bloco sobre estacas.

Fonte: Munhoz, 2004.

Esse tipo de estrutura é utilizado para dissipar, através das estacas, as cargas provenientes da superestrutura para uma camada de solo mais profunda e

resistente. A complexidade de seu funcionamento está diretamente relacionada ao comportamento mecânico do conjunto aço/concreto e à interação solo/estrutura.

Apesar de esses elementos estruturais serem fundamentais para a estabilidade da superestrutura de uma obra, geralmente, a inspeção visual é praticamente impossível de se fazer. Sendo assim, o conhecimento da distribuição das tensões internas do bloco é indispensável.

Para efeito de cálculo empregado nos projetos sobre estacas, são utilizados dois métodos: o do CEB-FIP (1970) e o método das bielas, desenvolvido através de análise experimental.

Os resultados apresentados consideram os esforços atuantes no interior do bloco semelhantes a uma treliça espacial composta por barras tracionadas e comprimidas. As barras tracionadas da treliça ficam situadas no plano médio das armaduras, que é horizontal e se localiza logo acima do plano de arrasamento das estacas.

As barras comprimidas, chamadas de bielas, são inclinadas e definidas a partir da intersecção do eixo das estacas com o plano médio das armaduras com um ponto definido na região nodal do pilar, que é considerado de seção quadrada.

As forças de tração que atuam na barra horizontal da treliça são combatidas pela armadura do fundo do bloco e as forças de compressão nas bielas são resistidas pelo concreto.

Segundo Schlaich et al. (1987), o modelo de bielas e tirantes pode ser adotado considerando-se o fluxo de tensões na estrutura e utilizando-se o processo do caminho mínimo das forças. Através de uma análise elástica linear ou não, utilizando-se métodos numéricos, como exemplo, método dos elementos finitos, a distribuição das tensões internas do bloco podem ser obtidas.

Com o objetivo de se estudar o comportamento das tensões no interior dos blocos da obra estudada, foi feita a modelagem linear de um bloco retangular de oito estacas com o auxílio de um programa computacional de elementos finitos [ANSYS® (ANalyser SYStem) (OLIVEIRA E PITANGA, 2006)]. Pelo fato de a estrutura estudada ser simétrica, apenas 1/4 do conjunto de bloco e estacas foi modelado, tomando por base as tensões principais de compressão do bloco σ_3 , conforme Figura 5.58.

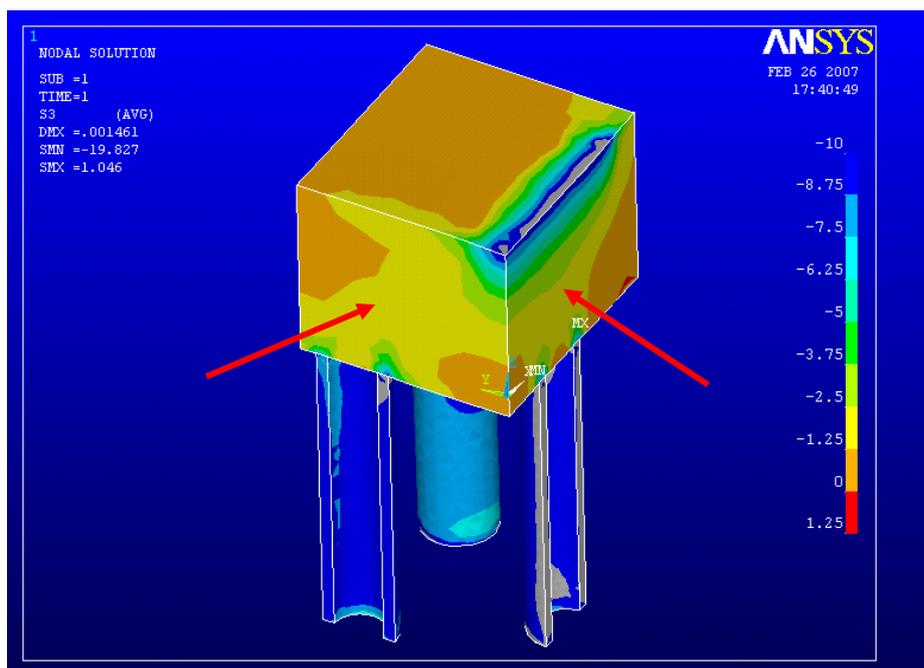


Figura 5.58 – Representação gráfica das tensões internas no bloco.

Conforme representado na Figura 5.58, as setas apontam para as faces internas do bloco modelado. A representação gráfica de σ_3 , ilustrada por cores, representa as tensões de compressão exercidas no interior da estrutura, onde as cores mais frias, representadas pelo azul, correspondem a tensões de compressão maiores que as cores mais quentes, representado pelo vermelho.

A partir dos resultados obtidos através do método dos elementos finitos aplicado nos blocos, passou-se a ter uma melhor compreensão a respeito das áreas de compressão das bielas, área amarela (Figura 5.58), e a verificar se as fissuras provocadas pela expansão do gel foram suficientes para atingir essas áreas.

A Figura 5.59 mostra com mais clareza a formação das bielas originada pelas tensões de compressão do pilar.

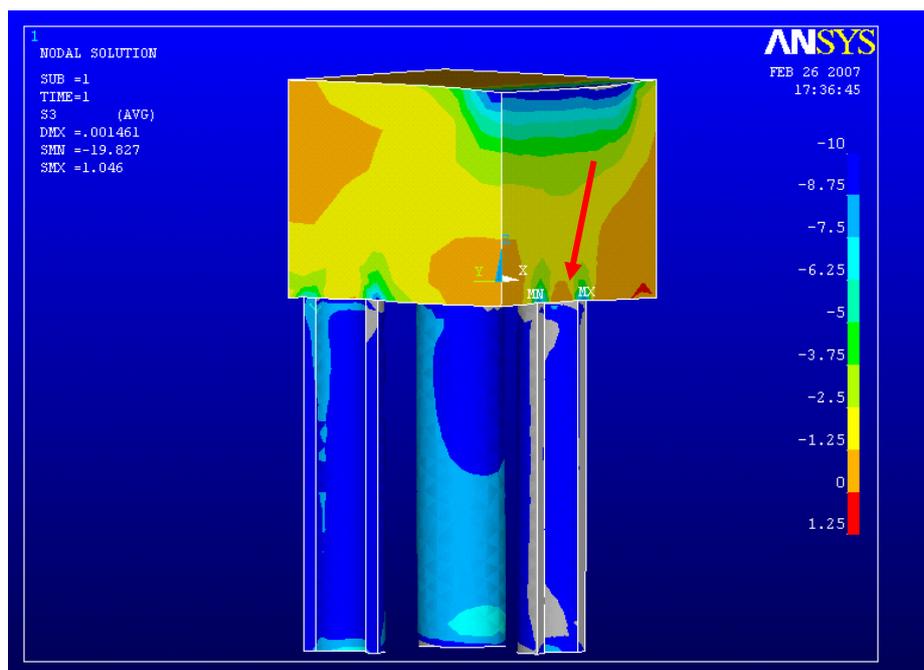


Figura 5.59 – Representação gráfica da formação das bielas.

De acordo com a Figura 5.59, a cor amarela representada no interior do bloco, correspondente ao intervalo de escala de -2.5 a -1.25 MPa, mostra uma tendência da formação das bielas. Nota-se que as bielas de compressão formam arcos entre as estacas e até mesmo entre as paredes da estacas, conforme indica a seta.

Através da representação gráfica apresentando as tendências das tensões no interior da estrutura afetada pela RAA, pode-se entender melhor as razões pelas quais tiveram um comportamento de se expandir abrindo grandes fendas a um ângulo de 45° descendente.

A Figura 5.60 mostra o comportamento das bielas geradas pelas tensões de compressão do pilar e a face do bloco onde se constatou um quadro de fissuração acentuado.

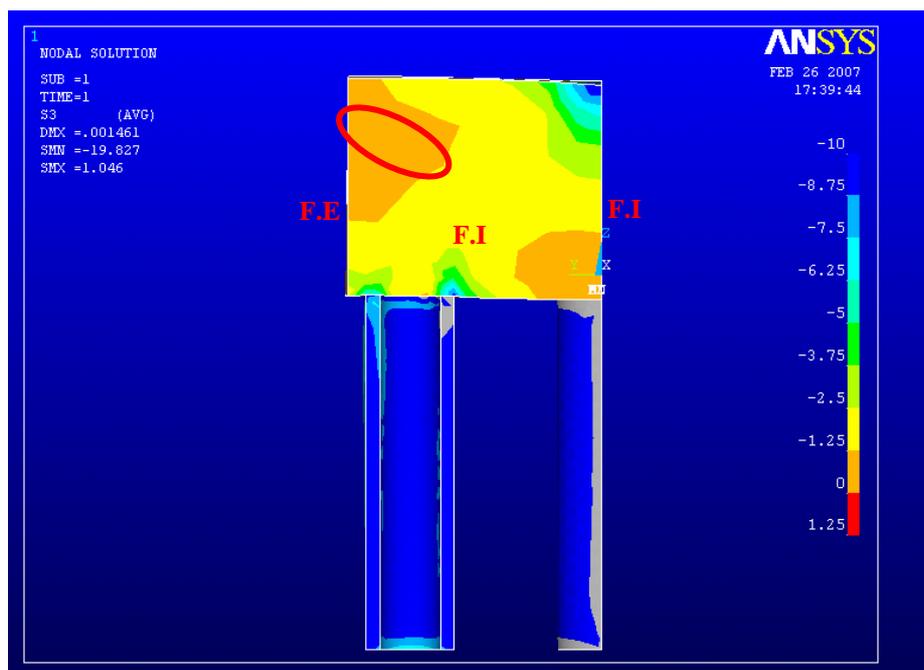


Figura 5.60 – Localização da trinca principal devido à RAA.

Nota: F.E – Face Externa; F.I – Face Interna do bloco

A área indicada pela elipse indica o trecho do aparecimento da fissura principal, orientada a um ângulo de 45° descendente. Nota-se que o aparecimento dessa trinca surgiu na região onde as tensões de compressão são baixas e onde não há armadura para restringir as expansões.

O mesmo pode ser visto na Figura 5.61, onde é mostrada outra face do bloco.

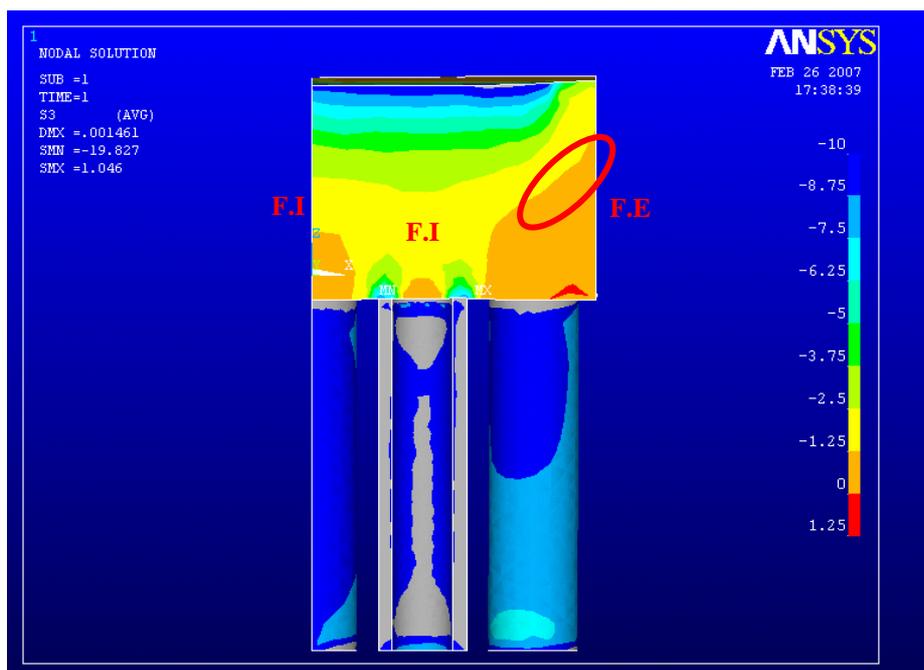


Figura 5.61 – Localização da trinca principal devido à RAA.

Conforme mostra a Figura 5.61, as tensões das bielas formam um ângulo de aproximadamente 45° partindo da face externa do bloco, o que justifica o impedimento da formação da trinca principal a um ângulo de 90° com a face, ou seja, pelo fato de as tensões de compressão das bielas serem maiores que as tensões de expansão, as trincas ficaram restritas a áreas de baixa tensão de compressão.

5.6.3 Atuação das armaduras no bloco afetado pela RAA

O dimensionamento das barras de aço necessárias para combater as tensões de tração na face inferior do bloco é obtido a partir do conhecimento das tensões máximas de compressão aplicada a um bloco. Esse tipo de armadura, definida pelos tirantes, deve estar devidamente ancorada nas zonas nodais para garantir o efeito da punção.

Embora a NBR 6118:2003 não faça recomendação alguma sobre o uso de armaduras complementares, esse tipo de armadura complementar em blocos sobre estacas, atualmente, é defendido e recomendado por diversos autores e algumas normas. A utilização dessas armaduras é justificada com o objetivo de combater possíveis tensões exercidas por excentricidades acidentais na locação de estacas e pilares, bem como para restringir prováveis aberturas de fissuras nas faces laterais dos blocos.

Quanto aos blocos afetados pela reação expansiva, a preocupação é saber como a estrutura contaminada por este fenômeno está interagindo com a armadura. Atualmente pouco se fala na literatura sobre o comportamento das barras de aço no interior do concreto com RAA.

Segundo Figueirôa (2006), o comportamento das barras de aço neste tipo de estrutura pode ser entendido conforme mostra a Figura 5.62.



Figura 5.62 – Influência da expansão sobre a armadura

Fonte: Figueirôa, 2006

Com a ilustração apresentada na Figura 5.62, percebe-se que a barra de aço fica tracionada pelo concreto em expansão, pressupondo que a aderência entre o aço e o concreto não tenha sido prejudicada pela RAA.

Partindo da hipótese de que não há perda de aderência entre o concreto contaminado e o aço, nota-se que a expansão, ao longo do tempo, exercerá sobre o aço mais deformações àquelas impostas por carregamentos de projeto.

Quanto à perda de aderência do aço com o concreto em expansão, alguns autores – como Nizar Smaoui, Marc-André Bérubé, Benoit Fournier e Benoit Bissonnette – mostraram em seu trabalho que nove dos quinze blocos ensaiados não apresentaram perda de aderência da armadura, ou seja, para a expansão do concreto de até 0,137%, as deformações das barras foram praticamente iguais às do concreto; para expansão superior a 0,151%, as deformações nas barras foram menores nos outros seis blocos, o que caracteriza uma perda de aderência.

Segundo esses autores, a possibilidade da perda de aderência não deve ser descartada, principalmente para estruturas de concreto armado com freqüentes ciclos de gelo/degelo e molhagem/secagem.

Para melhor compreensão do funcionamento da armadura utilizada nos blocos da obras estudada, a Figura 5.63 mostra o detalhamento da armadura e seu respectivo dimensionamento.

- Fazer com que a expansão seja restringida ao máximo;
- Boa capacidade de impedimento da passagem de água para a estrutura pré-existente;
- Maior durabilidade do reforço estrutural;
- Utilização de técnica conhecida e emprego de mão-de-obra local;
- Aplicável a todos os blocos da obra.

Apesar de esse tipo de intervenção apresentar diversas vantagens na recuperação da integridade dos blocos, vale ressaltar que o emprego do encapsulamento dos blocos só foi adotado por ser a melhor técnica encontrada até o momento. Para outras obras com a mesma patologia, deve-se adotar, porém, um plano de recuperação dentro das reais condições e disponibilidade nas quais a obra se encontra.

Embora a obra de reforço dos blocos ainda não tenha sido realizada, este trabalho apresentará os detalhamentos de projetos concebidos para os tipos de bloco vistoriados e realizado o serviço de injeção com a calda de microcimento.

De acordo com o embasamento teórico apresentado anteriormente, sobre o comportamento das bielas nos blocos de fundação, a preocupação dos projetistas envolvidos no projeto de reforço foi concentrada em preservar a integridade das bielas.

Mesmo teoricamente sabendo-se que a integridade das bielas não tem sofrido com os efeitos expansivos da reação álcali-agregado, pelo fato desse mecanismo exercer esforços de compressão maior que as tensões de expansão da RAA, a aplicação de tensões de compressão na parte inferior do bloco tem por objetivo aumentar e reforçar a área da base do bloco bem como provocar um alargamento das seções transversais da biela.

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

As Figuras 5.64 a 5.67 mostram os detalhes de projeto para reforço dos blocos de fundação retangular de oito estacas.

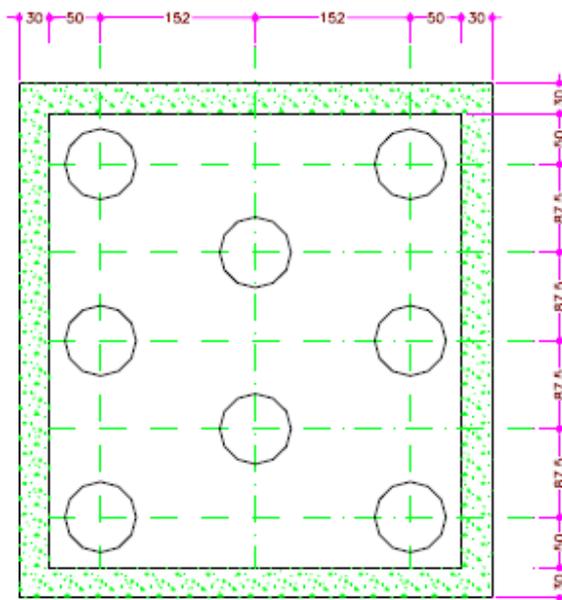


Figura 5.64 – Detalhe da espessura das paredes de concreto armado para encapsular os blocos de oito estacas, imagem do fundo do bloco.

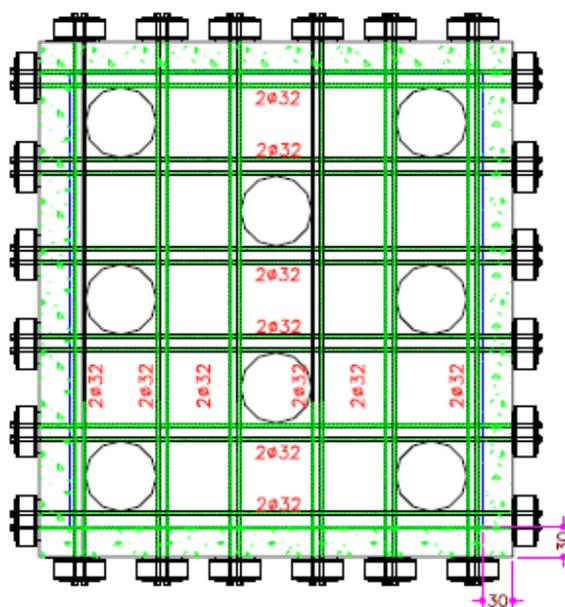


Figura 5.65 – Detalhe das barras DYWIDAG exercendo tensões de compressão no fundo do bloco.

Para os blocos com geometria trapézio/retângulo, a concepção adotada para reforço estrutural foi a mesma adotada nos blocos retangulares. Basicamente o que diferencia essa geometria de estrutura é a criação de consolos para dar apoio aos tensores / fixadores das barras de *dywidag* nas faces inclinadas.

As Figuras 5.69 a 5.71 mostram os detalhes do projeto para reforço dos blocos de fundação trapézio/retangular de nove estacas.

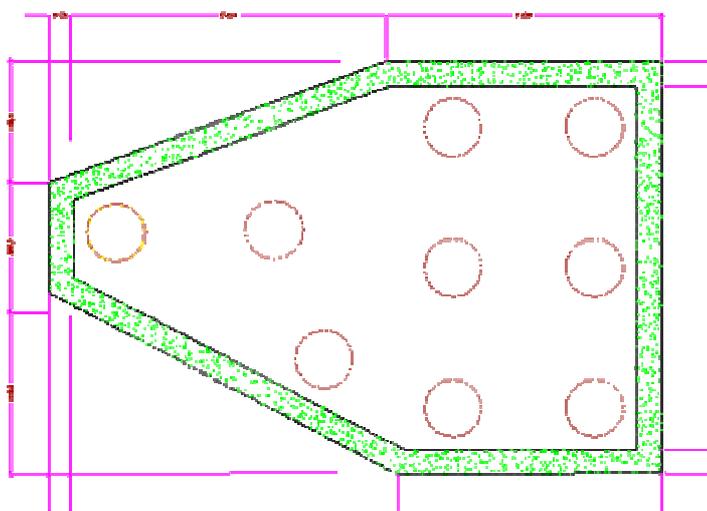


Figura 5.69 – Detalhe do envolvimento do bloco trapézio/retângulo de nove estacas.

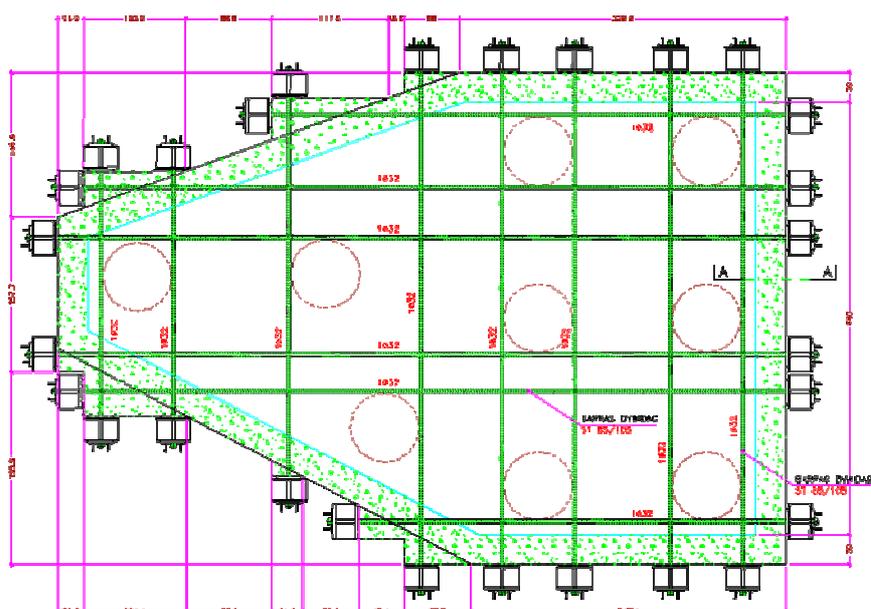


Figura 5.70 – Detalhe das barras DYWIDAG exercendo tensões de compressão no fundo do bloco trapézio/retângulo de nove estacas.

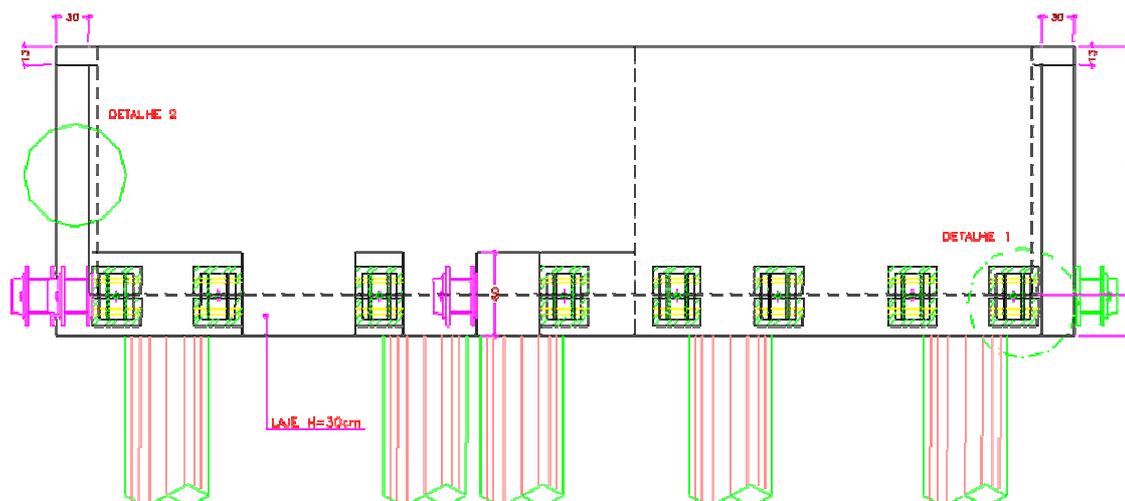


Figura 5.71 – Detalhe da ancoragem das barras DYWIDAG, vista lateral do bloco trapézio/retângulo.

Todo o concreto a ser utilizado no envelopamento dos blocos deverá ser dosado com adições minerais com a finalidade de atender aos requisitos de resistência a ataques químicos (RAA, sulfatos, etc.).

A concretagem do fundo dos blocos deverá ser realizada com concreto auto-adensável. Esse tipo de concreto é recomendado pela alta capacidade de fluidez e preenchimento evitando assim a ocorrência de vazios.

Para acompanhamento futuro da estrutura contaminada pela RAA e da nova estrutura, utilizada para reforço, é essencial e obrigatória a utilização de dispositivos apropriados no concreto e nas armações para monitoramento ao longo do tempo. Esses equipamentos devem ser utilizados e monitorados sob orientação de especialistas com experiência no assunto.

6. *Conclusões e Sugestões*

Conclusões

A crescente ocorrência de novos aparecimentos ou de novas observações de casos de infra-estrutura de prédios residenciais e comerciais afetadas pela reação álcali-agregado, torna pertinente incentivar a busca de soluções não só corretivas, mas também preventivas para novas estruturas.

Diante da grande diversidade de situações que a reação expansiva pode apresentar nos blocos de coroamento, é muito difícil estabelecer um padrão de danos que esse fenômeno pode causar em todos os edifícios da região Metropolitana do Recife afetados pela RAA.

Através de análise realizada nos testemunhos extraídos nos blocos de fundação, foram realizados ensaios de petrografia, microscopia estereoscópica e ótica, análise dos agregados utilizados na obra, microscopia eletrônica de varredura, teor de álcalis solúveis, expansão do agregado graúdo, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de deformação. Esses ensaios mostraram que o agregado utilizado no concreto dos blocos é potencialmente reativo para desenvolver a reação do tipo álcali-silicato.

De acordo com os ensaios laboratoriais, o agregado utilizado na obra apresenta boa qualidade no que diz respeito às suas características físico-mecânicas. No entanto, do ponto de vista mineralógico, esse tipo de agregado é responsável pelo desencadeamento de reações expansivas do tipo álcali-silicato, pela presença de quartzo e feldspato em sua composição mineralógica.

Além de sua composição mineralógica o agregado graúdo apresenta textura milonítica. Segundo alguns autores, esse tipo de textura apresenta alta reatividade com os álcalis do cimento.

A utilização do microcimento nos blocos para preenchimento das fissuras provocadas pela reação expansiva, mostrou-se bastante satisfatório. A injeção do epóxi nas fissuras não foi recomendada por haver umidade nas faces das fissuras, o que impede a ligação e a união das faces.

Para uma efetiva limpeza das trincas, os furos com diâmetro de 2", realizados abaixo da trinca principal, foram de extrema necessidade para retirar o material depositado do seu interior, bem como garantir boa lavagem nas faces para dar uma maior aderência entre o concreto e o material injetado.

A garantia de uma boa injeção com microcimento dependerá da retirada dos materiais no interior das trincas (areia, argila, etc.); da instalação apropriada de purgadores nas extremidades das trincas; do processo de lavagem com injeção de água sob pressão com o auxílio de um compressor; da secagem com injeção de ar no interior das trincas e fissuras com o auxílio de um compressor depois de finalizada a lavagem; da retirada de testemunhos para identificar a efetividade da limpeza; do processo de limpeza e secagem antes de efetuar-se a injeção do microcimento; da retirada de testemunhos para confirmação da efetividade do preenchimento.

Quanto ao reforço estrutural, os estudos finais para elaboração dos projetos de recuperação só foram possíveis por meio dos conhecimentos de trabalhos desenvolvidos em laboratórios. Esses trabalhos mostram que a expansão desenvolvida pela RAA não se desenvolve onde a estrutura é restrita.

Sugestões para futuros trabalhos

- Avaliar a influência da lavagem com água em possíveis expansões futuras.

- Estudar a influência da injeção com microcimento sobre futuras expansões por RAA, tendo em vista o material injetado ser argamassa fluida. Há que se considerar o pequeno volume de material injetado.
- Avaliar a influência das armaduras introduzidas no processo de recuperação dos blocos.
- Avaliar as ações decorrentes do uso do microcimento, no que diz respeito à sua aplicabilidade.

Referências

ACI COMMITTEE 221. *ACI 221.1R-98*. State-of-the-art: Report on alkali-aggregate reactivity. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, p.1-31, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C.39/C39M*: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, 2003.

_____. *ASTM C 114*: Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. West Conshohocken, 1997.

_____. *ASTM C 150*: Standard specification for Portland cement. West Conshohocken, 2002.

_____. *ASTM C 151*: Standard test method for autoclave expansion of Portland cement. West Conshohocken, 2000.

_____. *ASTM C.295*: Standard Guide for petrographic examination of aggregates for concrete. West Conshohocken, 2003.

_____. *ASTM C.469*: Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. West Conshohocken, 2002.

_____. *ASTM C. 597*: Standard test method for pulse velocity through concrete. West Conshohocken, 2002.

_____. *ASTM C.856*: Standard practice for petrographic examination of hardened concrete. West Conshohocken, 2002.

_____. *ASTM C.1260*: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). West Conshohocken, 2001.

_____. *ASTM C.1567*: Standard test method for determining the potential alkali-silica reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (accelerated mortar-bar method). West Conshohocken, 2004.

_____. *ASTM C.1293*: Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. West Conshohocken, 2001.

ANDRADE, J. C., ANDRADE, T., SILVA, J. J. R. **Diagnóstico dos blocos de Fundação do Ed. Sede Tribunal Federal 1º Instância em Pernambuco**. Relatório técnico preliminar – DEC/UFPE/FADE. Recife/PE, 2005

ANDRADE, W. P. e Equipe de furnas (1997), *Concreto massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo*. Ensaios e Propriedades, 1 ed. São Paulo, Pini.

ANDRIOLO, F. R. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Relatório Final – Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio**. Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1999.

ANDRIOLO, F. R. **Reação Álcali-Agregado: Observação de Âmbito Internacional**. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Anais**. Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 205-211.

ANDRIOLO, F. R. **Observações de Estruturas de Concreto: Validade Quanto a Ocorrência da Reação Álcali-Agregado**. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Anais**. Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 243-263.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Apreciação Petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado para concreto: NBR 7398 – 92**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2003** – Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

ÁVILA, J. I. S. L e FONTE, A. O. C. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO NOS BLOCOS DE FUNDAÇÃO DE UMA PONTE**. 44º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon, 2002.

BARBOSA, F. R., PIRES SOBRINHO, C. W. A. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: Caracterização e Estudos da Influência no Maciço de uma Barragem de Concreto Gravidade**. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Anais**. Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 323-328.

BICZOK, I. *Corrosion y proteccion del hormigon*. Bilbao/España: Ediciones Urmo, 1972. p.275-280. Trad. de Emilio J. d'Ocon Asensi.

BULLETIN 79 - ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE DAMS – REVIEW AND RECOMENDATIONS. Paris: CIGB/ICOLD, 1991.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (1970). CEB-FIP Recommandations particulières au calcul et à l'exécution des semelles de fondation. Bulletin D'Information, Paris, n.73.

CORRÊA, W. G. **Estudos sobre a Reatividade Álcali-Agregado no Concreto da Ilha dos Pombos e as Medidas de Proteção Adotadas.** Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Anais.** Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 365 - 380.

DIAMOND, S. ASR: Another look at mechanisms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION (ICAAR), 8., 1989, Kyoto. *Proceedings...* Kyoto: Edited by K. Okada, S. Nishibayashi & M. Kawamura, 1989. p. 83-94.

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms – 1: alkalis in cements and in concrete pore solutions. *Cement and Concrete Research*, v.5, p. 329-345, 1975.

DUNCAN, M. A. G.; GILLOTT, J. E.; SWENSON, E. G. Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia II: field and petrographic studies. *Cement and Concrete Research*, v. 3, n. 2, p. 119-128, 1973.

FARAGE, M. C. R. **Modelagem e implementação Numérica da Expansão por Reação Álcali-Agregado do Concreto.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro/RJ, 2000.

FIGUEIRÔA, J. P. **Interpretação de um Modelo de Comportamento Estrutural em Peças de Concreto com RAA – Aplicação a um Reforço de Bloco de Fundação.** II Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. 48° CBC – Ibracon. Rio de Janeiro, 2006.

FONTOURA, J. T. F. Relatório do Tema I – Investigação sobre a RAA – Metodologia e Ensaio. Relatório Final do Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Anais.** Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1999, p. 65-80.

GALLETTI, A. A. B., SILVEIRA, J. F. A., ANDRADE, M. A. S., PERES, R. G. Inspeção realizadas nas Usinas de Furnas para Detectar Reação Álcali-agregado. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Anais.** Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 277-283.

GAMINO, A. L. **Ensaio para Determinação da Potencialidade de Ocorrência de Reações Álcali-Agregado, Proposições para a Conservação de Estruturas Afetadas, Ocorrência em Barragens de Concreto.** Trabalho de Formatura. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Dezembro de 2000.

GLASSER, F. P. Chemistry of the alkali-aggregate reaction. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete.* Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p.30-53.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 1999.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.

HEIJNEN, W. M. M., LARBI, J. A., SIEMES, A. J. M. “**Alkali-Silica Reaction in the Netherlands**” – Proceedings of the 10th International Conference alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne, Australia, agosto/1996.

HOBBS, D. W. *Alkali-silica reaction in concrete.* London: Thomas Telford, 1988. 183p.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1., 1986, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986. p. 127-138.

KIHARA, Y., CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland – Cap. 10, Vol. 1. In: ISAIA, G. C., **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações.** 1^o Ed. São Paulo: Ibracon, 2005.

KUPERMAN, S. C., FERREIRA, W. V. F. F., DAL FABRO, J. C., NEGRINI, M. A., CIFÚ, S., KAKO, H., MARIANO, A., TAVARES, F. **Ocorrência da Reação Álcali-Agregado em Tomada D’água.** Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. *Anais.* Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 213-222.

LARIVE, C. *Apport combinés de l’expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l’alcali-reaction et ses effets mécaniques.* Thesis (PhD). École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris/France, 1997.

LEPS, T. M., **Reação Álcali-Agregado (RAA).** Um Breve Histórico do Descobrimento de sua Química Básica. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Relatório Final – Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio.** Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1999, p. 83-90.

LOPES, L. E. **Modelagem Mecânica e Numérica da Reação Álcali-Agregado com aplicação a Barragens de Concreto.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro/RJ, 2004.

MADUREIRA, E. L. **Simulação Numérica do Comportamento Mecânico de Elementos de Concreto Armado Afetados pela Reação Álcali-Agregado.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

MAGALHÃES, R. A., MOURA, C. N. **Caracterização, Histórico e Obtenção de Parâmetros da Reação Álcali-Agregado para Modelagem Matemática da Barragem de Peti.** Simpósio sobre Reatividade álcali-agregado em estrutura de concreto. *Anais.* Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, pág. 233-237.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ed. Pini, 1994.

MITCHELL, L. D.; BEAUDOIN, J. J.; GRATTAN-BELLEW, P. The effects of lithium hydroxide solution on alkali-silica reaction gels created with opal. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 641-649, 2004.

PAULON, V. A. **Reação Álcali-Agregado em Concreto**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 1981.

POOLE, A. B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p.1-29.

PREZZI, M.; KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. M.; SANTOS, M. C.; ANDRADE, W. P. **Importância da Química de Superfície na Reação Álcali-Agregado**. Simpósio sobre Reatividade álcali-agregado em estrutura de concreto. **Anais**. Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, pág. 173-196.

PRISZKULNIK, S., Inspeção e diagnóstico de Estrutura de Concreto Afetadas pelas Reações Cimento-Agregado – Cap. 34, Vol. 2. In: ISAIA, G. C., **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1º Ed. São Paulo: Ibracon, 2005.

GUERRA, M. O., CUNHA, E. G. N., BRAUN, P. V. C. B., GUEDES SOB°, E. F., JULIANI, M., SCANDIUZZI, L. **Aspectos da Reatividade álcali-agregado na Usina Elevatória de Traição**. Simpósio sobre Reatividade álcali-agregado em estrutura de concreto. **Anais**. Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 223-231.

REGOURD, M. Alteration interne des bétons – la réaction alcalis-granulats: *La durabilité des structures beton en béton*. Paris: Travaux, mars 1988, p.62-67.

SABBAG, A. F, **Verificação da Existência de Reação Álcali-Agregado no Concreto da UHE de Mascarenhas**. Dissertação de Mestre em Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

SCHLAICH, J., SCHAFER, K., JENNEWEIN, M. (1987). **Towards a consistent design of structural concrete**. *PCI Journal*, v.32, n.3, p.74-150, May-June.

SILVA, G. A., OLIVEIRA, R. A. **Procedimento de Injeção em Trincas nos Blocos de Coroamento Afetados pela Reação Álcali-Agregado**. II Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. 48º CBC – Ibracon. Rio de Janeiro, 2006.

SILVEIRA, J. F. A., **A Expansão do Concreto em Barragem Afetada pela RAA e a Importância das Tensões Confinantes**. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Anais**. Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 285-291.

SILVEIRA, J. F. A. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **TEMA III: Auscultação e Observações de Estruturas Afetadas pela RAA**. Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1999, p 93-115.

SOUSA COUTINHO, A. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Curso 120, Lisboa, 1973.

STANTON, T. E. (1940), "Expansion of Concrete Through Reaction between Cement and Aggregate". *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, v. 66, p. 1781-1811.

SHRP-C-343 "Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity" – Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1993.

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

VAN AARDT, J. H. P.; VISSER, S.. Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions. *Cement and Concrete Research*, v. 7, n. 6, p. 643-648, 1977a.

VEIGA, F. N.; GONÇALVES, I. N.; ANDRADE, N. P. H. **Microscopia Eletrônica de Varredura de Géis Provenientes de Usinas Hidroelétricas**. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Anais**. Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 69-79.

VISVESVARAYA, H. C.; MULLICK, A. K.; GEORGE SAMUEL, S. K.; SINHA, S. K.; WASON, R. C. Alkali reactivity of granitic rock aggregates. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., 1986, Rio de Janeiro, *Proceedings...* Rio de Janeiro, 1986. v. 5, p. 208-213.

VIVIAN, H. E. Studies in cement-aggregate reaction. XIX: The effect on mortar expansion of the particle size of the reactive component in the aggregate. *Australian Journal of the Applied Science*, v. 2, p. 488-494, 1951.