

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL PESSI

**MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO:
UMA REVISÃO DAS PUBLICAÇÕES OCORRIDAS NO BRASIL DE
2004 A 2014**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2016

GABRIEL PESSI

**MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO:
UMA REVISÃO DAS PUBLICAÇÕES OCORRIDAS NO BRASIL DE
2004 A 2014**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Profa. Ma. Silvana da Silva Ramme

TOLEDO
2016



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 023

**Mapeamento Sistemático da Reação Álcali-Agregado:
Uma Revisão das Publicações Ocorridas no Brasil de
2004 A 2014**

por

Gabriel Pessi

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:20 h do dia **08 de Junho de 2016** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Me. Carlos Eduardo Tino Balestra
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)

Profa. Ma. Silvana da Silva Ramme
(UTFPR – TD)
Orientadora

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
Coordenador da COECI

RESUMO

PESSI, Gabriel. **Mapeamento Sistemático da Reação Álcali-Agregado: Uma Revisão das Publicações Ocorridas no Brasil de 2004 a 2014**. 2016. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Toledo, 2016.

A reação álcali-agregado é uma reação química que ocorre no interior de estruturas de concretos, entre os hidróxidos alcalinos do cimento, e determinados minerais reativos presentes nos agregados utilizados. Como consequência dessa reação, são desenvolvidos produtos que, no contato contínuo com a água presente nos poros do concreto, são suscetíveis a expandir, gerando fissurações, movimentações e podendo causar o comprometimento das estruturas de concreto. Um grande número de trabalhos e pesquisas encontram-se desenvolvidos com objetivos de buscar maneiras de prevenção ou recuperação de estruturas que já possuem patologias relacionadas às consequências dessa reação. Porém, ainda não observa-se um consenso no meio técnico-científico sobre quais as soluções mais eficientes. Em virtude da importância do assunto, este trabalho apresenta um mapeamento sistemático da reação álcali-agregado com o objetivo de obter o panorama de desenvolvimento científico alcançado sobre essa reação no Brasil, através de pesquisas por publicações eletrônicas técnico-científicas ocorridas no território nacional de 2004 a 2014. Através de métodos sistemáticos de triagem, foram selecionados apenas aqueles trabalhos que realmente apresentaram pesquisas sobre a reação álcali-agregado como tema principal. Dessa maneira selecionou-se quarenta e três trabalhos que apresentavam estudos sobre a prevenção, monitoramento ou recuperação de estruturas atingidas pela reação. Concluiu-se que as formas mais eficientes de prevenir o desenvolvimento da reação são através do emprego de adições minerais, escolha adequada do tipo de cimento ou uso de agregados com comportamento inócuo. Em relação ao monitoramento das estruturas, observou-se que as obras mais suscetíveis ao aparecimento da reação álcali-agregado são barragens, pontes, blocos de fundação e pavimentos de concreto. Os estudos sobre métodos de recuperação das estruturas encontram-se em menor número, nos quais as soluções sugeridas são a utilização de compostos à base de lítio para mitigar o desenvolvimento do gel expansivo ou o reforço estrutural do elemento afetado.

Palavras-chave: Reação álcali-agregado. Concreto. Patologia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bloco de fundação com padrão de fissuração típico de RAA.....	14
Figura 2 – Topo de pilar de vertedouro de barragem afetado por RAA.....	15
Figura 3 - Estrutura afetada pela reação álcali-silica nos Estados Unidos.....	19
Figura 4 - Estrutura afetada pela reação álcali-silicato em Pernambuco.	20
Figura 5 - Estrutura afetada pela reação álcali-carbonato em Nova Jersey.....	21
Figura 6 – Ensaio de Análise Petrográfica	26
Figura 7 – Ensaio com Barras de Argamassa	27
Figura 8 – Ensaio pelo Método Acelerado das Barras de Argamassa	28
Figura 9 – Moldes e sistema de leituras empregados no método CPT.....	29
Figura 10 – Ensaio com Rochas Carbonáticas	30
Figura 11 - Reatores utilizados nos ensaios de reatividade pelo método químico....	31
Figura 12 – Microscopias eletrônicas de argamassa com a presença da RAA.....	32
Figura 13 – Etapas do processo de mapeamento sistemático	34
Figura 14 - Fluxograma de classificação de agregados.....	46

LISTA DE GRÁFICOS E QUADROS

Gráfico 1 – Quantidade de artigos encontrados nas bases de dados pesquisadas no recorte temporal de 2004 a 2014, divididos por Unidades Federativas Brasileiras. ...	37
Gráfico 2 – Quantidade de artigos encontrados nas bases de dados pesquisadas no recorte temporal de 2004 a 2014, divididos em função do Ano de publicação.	38
Gráfico 3 – Quantidade de artigos encontrados nas bases de dados pesquisadas no recorte temporal de 2004 a 2014, divididos quanto a área pesquisada.	39
Quadro 1 – Estruturas de concreto afetadas pela reação álcali-agregado, no Brasil.	17
Quadro 2 - Resumo do mapeamento referente aos métodos de prevenção da RAA.	50
Quadro 3 - Resumo do mapeamento referente aos métodos monitoramento da RAA e recuperação de estruturas afetadas.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCPT	Método Acelerado Brasileiro de Prismas de Concreto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACPST	Método Acelerado de Prismas de Concreto Imerso em Solução
ACPT	Método Acelerado de Prismas de Concreto
AMBT	Método Acelerado de Barras de Argamassa
BA	Bahia
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCA	Cinza da Casca de Arroz
CP	Cimento Portland
CPT	Método de Prismas de Concreto
DF	Distrito Federal
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EUA	Estados Unidos da América
GO	Goiás
IPT	Instituto de Pesquisa e Tecnologia
MBT	Método de Barras de Argamassa
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MS	Mapeamento Sistemático
PA	Pará
PE	Pernambuco
PR	Paraná
RAA	Reação Álcali-Agregado
RAC	Reação Álcali-Carbonato
RAP	Pós de Agregados Reativos
RAS	Reação Álcali-Sílica
RASS	Reação Álcali-Silicato
RJ	Rio de Janeiro
RN	Rio Grande do Norte
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
Scielo	Scientific Electronic Library Online
SP	São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVOS	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	13
2.2	HISTÓRICO DA REAÇÃO.....	15
2.3	OCORRÊNCIAS DA RAA NO BRASIL	16
2.4	OS ÁLCALIS DO CIMENTO PORTLAND	18
2.5	TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	18
2.5.1	Reação Álcali-Sílica (RAS).....	19
2.5.2	Reação Álcali-Silicato (RASS).....	20
2.5.3	Reação Álcali-Carbonato (RAC).....	21
2.6	FATORES QUE INFLUENCIAM Á REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO	21
2.6.1	Teor De Álcalis Do Cimento	22
2.6.2	Agregados	22
2.6.3	Umidade	22
2.6.4	Temperatura.....	23
2.6.5	Relação Água/Cimento E Cura Do Concreto	23
2.6.6	Teor De Ar Incorporado.....	24
2.6.7	Adições Químicas e Minerais	24
2.7	EFEITOS NOCIVOS PROVOCADOS PELA RAA.....	25
2.8	MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.	25
2.8.1	Análise Petrográfica	26
2.8.2	Método De Barras De Argamassa (MBT).....	27
2.8.3	Método Acelerado das Barras de Argamassa (AMBT).....	28
2.8.4	Método dos prismas de concreto (CPT).....	29
2.8.5	Método Osipov	29
2.8.6	Método Das Rochas Carbonáticas	30
2.8.7	Método Químico	31
2.8.8	Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV).....	32
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	PROCESSO DE MAPEAMENTO SISTEMÁTICO.....	33
3.2	ETAPAS DA PESQUISA	34
3.2.1	Definição Das Questões De Pesquisa	35
3.2.2	Realização Da Pesquisa De Estudos Primários Relevantes	35
3.2.3	Avaliação e Triagem dos Documentos Encontrados	35
3.2.4	A Extração e Classificação Dos Dados e Mapeamento.	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	PREVENÇÃO	39
4.1.1	Adições Minerais	39
4.1.2	Outras Adições.....	41
4.1.3	Influência dos Tipos de Cimentos	42
4.1.4	Influência da Reatividade dos Agregados	43
4.2	MONITORAMENTO	44
4.2.1	Análise dos Métodos de Ensaio	44

4.2.2	Sugestões e Desenvolvimento de Novos Métodos de Análise	45
4.2.3	Análise das Características e Consequências da RAA	46
4.2.4	Obras Mais Suscetíveis à RAA e Instrumentos de Monitoramento	47
4.2.5	Simulação e Modelagem Numérica.....	48
4.3	RECUPERAÇÃO.....	48
4.3.1	Utilização de Composto à Base de Lítio.....	48
4.3.2	Métodos de Recuperação Estrutural	49
4.4	ESTADO DA ARTE	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado na engenharia no mundo, especialmente no Brasil, devido a facilidade de obtenção dos insumos para a sua preparação, trabalhabilidade e custo de produção reduzido, se comparado a outros materiais de construção. Porém, a durabilidade das estruturas executadas em concreto está diretamente relacionada aos materiais empregados, metodologias construtivas, às propriedades químicas e físicas, condições de exposição às intempéries e aos esforços solicitantes. Em razão disso, podem ocorrer vários processos de degradação nessas estruturas, oriundos de causas físicas e químicas, dentre os quais, destaca-se a reação álcali-agregado (RAA).

A RAA é um fenômeno que se desenvolve no concreto endurecido e que ocorre em virtude da presença conjunta de três fatores: álcalis do cimento, agregados reativos ou potencialmente reativos e a existência constante de umidade. A ocorrência simultânea desses fatos causa deteriorações de grandes magnitudes e até mesmo irreversíveis em alguns casos, como em obras de barragens, pavimentação de estradas, blocos de fundação, pontes, cais e aeroportos.

Para investigação da RAA, existem alguns métodos de ensaio que podem ser utilizados, dentre os quais, podem ser citados a análise petrográfica, o método de barras de argamassa - MBT, método acelerado de barras de argamassa - AMBT, método dos prismas de concreto (CPT), o método Osipov, o das rochas carbonáticas, o químico e a microscopia eletrônica de varredura.

Contudo, até a atualidade, não existe uma solução para essa reação que seja consenso no meio técnico-científico. Porém adota-se, como solução primária, a prevenção. Sugerindo-se a necessidade de estudos, pesquisas e o desenvolvimento de metodologias de ensaios que possibilitem detectar antecipadamente a possibilidade de ocorrências dessa reação deletéria.

Assim sendo, pretendeu-se neste trabalho obter o panorama de desenvolvimento científico alcançado sobre o assunto reação álcali agregado - RAA, a partir de um mapeamento sistemático das publicações, ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. O qual poderá ser utilizado como ferramenta para observação dos itens ainda

deficientes de aprofundamento científico, contribuir socialmente como uma forma de facilitar o entendimento e conhecimento de profissionais das áreas relacionadas à construção civil, a respeito das propriedades dessa reação e até mesmo aplicar-se como instrumento de consulta para ensino e enriquecimento intelectual sobre a RAA.

1.1 JUSTIFICATIVA

A reação álcali-agregado (RAA) é uma das graves patologias que podem ocorrer na construção civil, em virtude de ser um processo químico complexo e capaz de gerar elevado grau de deterioração em estruturas de concreto simples, armado ou protendido.

Essa reação ocorre devido à presença dos álcalis do cimento, juntamente com a utilização de agregados reativos ou potencialmente reativos e a presença constante de umidade. Esse último fator, a umidade, torna obras como barragens, reservatórios, pontes e fundações os mais vulneráveis e sensíveis a essas manifestações patológicas.

Dada a importância do assunto, atualmente existe uma grande gama de artigos científicos e projetos de pesquisa desenvolvidos com o objetivo de avaliar métodos de proteção, recuperação ou reforço de estruturas suscetíveis aos danos causados pela RAA. Porém, apesar de todos os recursos estudados e desenvolvidos por engenheiros e pesquisadores, ainda não existe um consenso para a solução desse problema, devido principalmente ao fato de que a maioria das soluções, quando analisadas externamente, se caracterizam como altamente custosas, temporárias ou na maioria das vezes ineficientes (SANCHEZ, 2008).

Observa-se também que essa ausência de consenso definitivo sobre possíveis soluções, tende a retardar ou até inibir os avanços na aplicação de cuidados na prevenção ou recursos na recuperação de estruturas já afetadas pela patologia. Assim como ocorreu entre 1950 e 1960, quando os estudos sobre esse fenômeno perderam forças, voltando a serem pesquisados somente em 1970, possivelmente devido ao grande número de relatos de patologias que surgiram ao redor do mundo

naquela época e continuaram ocorrendo até a atualidade. Portanto, os estudos e avanços sobre o assunto são altamente necessários (NOGUEIRA, 2010).

Observando-se o considerável volume de pesquisas já realizadas e, ainda assim, a existência de muitas dúvidas relacionadas aos estudos da reação álcali-agregado, pretendeu-se neste trabalho, obter o estado da arte sobre o assunto reação álcali agregado - RAA, a partir do mapeamento sistemático das publicações, ocorridas no Brasil de 2004 a 2014.

Com isso, almejou-se reunir os principais resultados e características dessas pesquisas, em um único trabalho, o qual poderá ser utilizado como ferramenta para observação dos itens ainda deficientes de aprofundamento científico, contribuir socialmente como uma forma de facilitar o entendimento e conhecimento de profissionais das áreas relacionadas à construção civil a respeito das propriedades dessa reação e até mesmo aplicar-se como instrumento de consulta para ensino sobre a RAA.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho foram divididos entre geral e específicos, os quais são apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

Em virtude do grande número de obras de construção civil afetadas pela reação álcali-agregado, especialmente obras hidráulicas, este trabalho teve como objetivo geral:

- Desenvolver um estudo de revisão sistemática dos trabalhos técnico-científicos sobre a reação álcali-agregado, publicados no Brasil entre os anos de 2004 e 2014.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar as estruturas mais suscetíveis ao aparecimento da RAA;
- Identificar as principais áreas pesquisadas, antes e depois de ocorrer a reação;
- Sintetizar os principais cuidados práticos a serem tomados na execução e recuperação de obras civis em relação a essa reação.
- Obter o estado da arte sobre o assunto reação álcali agregado – RAA alcançado no Brasil, entre os anos de 2004 e 2014.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão abordados os temas relacionados às definições e tipologias da RAA, além de listar os principais fatores que influenciam o agravamento da reação e as metodologias utilizadas para sua identificação.

2.1 A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A Reação Álcali-Agregado (RAA) pode ser determinada como uma nomenclatura geral empregada para representar a reação química que ocorre no interior de estruturas de concretos, entre os hidróxidos alcalinos, originários especialmente do cimento, e determinados minerais reativos presentes nos agregados utilizados. Como consequência da reação, são desenvolvidos produtos que, no contato contínuo com umidade, são suscetíveis a expandir, gerando fissurações e podendo causar o comprometimento das respectivas estruturas de concreto (HASPARYK, 2005).

Para uma estrutura de concreto afetada pela RAA, a velocidade de surgimento e intensidade das deformações dependem de um grande número de fatores, tal qual, primeiramente, a composição e quantidade disponível de agregados reativos, níveis de álcalis no cimento, disponibilidade de umidade, temperatura ambiente e de possíveis restrições físicas a expansão, que podem ser internas e externas. A deterioração das estruturas pode ocorrer em questão de dias, anos ou até mesmo em décadas, até que os álcalis do cimento reajam por completo com os agregados. Considera-se uma duração necessária de aproximadamente 5 a 12 anos para a reação se desenvolver promovendo uma ação prejudicial na estrutura afetada (VALDUGA, 2002).

Os principais sintomas derivados da RAA podem ser observados por (adaptado de VALDUGA, 2002):

- Microfissuras no concreto, principalmente nos espaços entre os agregados graúdos;
- Fissuras na adjacência da superfície dos agregados graúdos;
- Perda de aderência da argamassa com a superfície dos agregados graúdos;
- Surgimento de gel expansivo;
- Movimentação ou abertura de juntas de retração e de concretagem;
- Travamento ou deslocamento de dispositivos e peças móveis como comportas, turbinas, eixos, pistões, etc.;
- Fissuras características na superfície, com aspecto poligonal e predominância na direção de maior dimensão;
- Fissurações com grandes aberturas, transversais à maior dimensão da estrutura.

A figura 1 apresenta algumas irregularidades e padrões de fissuração desempenhados pela RAA em blocos de fundação (NOGUEIRA, 2010).



Figura 1 – Bloco de fundação com padrão de fissuração típico de RAA
Fonte: Nogueira (2010).

A figura 2 demonstra o aspecto do topo de um pilar de vertedouro de barragem afetado por RAA.



**Figura 2 – Topo de pilar de vertedouro de barragem afetado por RAA.
Fonte: Lima (2009).**

2.2 HISTÓRICO DA REAÇÃO

De acordo com publicações ocorridas em meados da década de 1950, a primeira vez que se observou anomalias em estruturas e elementos estruturais de concreto devido à reação álcali-agregado (RAA) foi em 1922, na Usina Hidrelétrica de Buck (Virginia, EUA), dez anos após a sua construção. No decorrer das décadas de 1920 e 1930, um grande número de casos de deterioração e aparecimento de fissuras foram observados em barragens, pontes e pavimentos por toda extensão do estado da Califórnia, nos EUA (VALDUGA, 2002).

Segundo Valduga (2002), Stanton, um engenheiro americano estudioso do tema, publicou ainda em 1940, um artigo concluindo que certos componentes dos agregados e os hidróxidos alcalinos liberados pelo cimento durante sua hidratação eram os responsáveis pela ocorrência de fissurações excessivas em determinadas estruturas de concreto na Califórnia. A partir de então, evidências de deteriorações

similares foram descobertas em vários outros Estados, além de diversas regiões do mundo (MEHTA & MONTEIRO, 2006).

Na Dinamarca nos anos 50, na Alemanha Ocidental nos anos 60, no Reino Unido em meados dos anos 70 e no Japão nos anos 80. No Canadá, estima-se que cerca de 30% dos problemas relacionados à durabilidade de barragens estão associados a reação álcali-agregado. Existem países como a África Sul, que entre 1970 e 1996 gastaram milhões de dólares em reparos e manutenção de estruturas afetadas pela RAA e há outros em que aproximadamente 25% das estruturas de barragens estão afetadas pela reação (ANDRIOLO, 1999 e HOBBS, 1988 apud VALDUGA, 2002).

Conforme Hasparyk (2005), desde a descoberta da reação muitos pesquisadores se motivaram a estudar o tema, colaborando de forma singular no entendimento do processo químico e na identificação dos minerais reativos, tal como, nas consequências e causas envolvendo ocorrências reais de estruturas afetadas por esse tipo de patologia.

2.3 OCORRÊNCIAS DA RAA NO BRASIL

No Brasil, os primeiros registros que abordavam o problema da reação só foram desenvolvidos duas décadas após os primeiros estudos publicados nos Estados Unidos. Isso ocorreu quando Gitahy e Ruiz, em 1963, trabalhando no convênio entre o IPT – Instituto de Pesquisa e Tecnologia, e as Centrais Elétricas de Urubupungá S.A, para a execução da barragem de Jupiá, entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, verificaram, na composição dos agregados selecionados para os concretos da barragem, a existência de substâncias reativas com os álcalis do cimento, em conformidade com o que Stanton havia publicado em 1940 (LIMA (2009); PRISZKULNIK (2005).

Hasparyk (2005), cita pelo menos 19 casos de barragens afetadas por reação álcali-agregado no Brasil, onde as estruturas afetadas não se restringem apenas às barragens em si, mas também existem ocorrências em vertedouros, tomadas d'água e casas de força, onde as consequências são ainda piores. Pois, pequenos desníveis

provocados por expansões nessas estruturas já podem ocasionar a paralisação de máquinas em hidrelétricas.

Além de barragens, outras estruturas também estão vulneráveis a tal patologia, tais como pontes, obras portuárias, viadutos, blocos de fundação, dormentes de concreto, túneis, pistas de aeroportos e estruturas rodoviárias, notadamente, estruturas que possibilitam facilmente a existência de umidade.

O Quadro 1 apresenta algumas das estruturas afetadas pela RAA no Brasil, mencionadas em trabalhos publicados até 2000.

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

Quadro 1 – Estruturas de concreto afetadas pela reação álcali-agregado, no Brasil.

Fonte: Nogueira (2010).

2.4 OS ÁLCALIS DO CIMENTO PORTLAND

Segundo Barbosa (1997), a partir do entendimento químico, os álcalis são os elementos que estão situados na primeira coluna da tabela periódica, dos quais pode-se ressaltar a presença em quantidades significativas no cimento apenas os componentes sódio e potássio (0,5 a 1,3%), originários das matérias primas utilizadas para sua confecção como micas, feldspatos e minerais argilosos presentes no calcário e argila.

A partir do contato do cimento com a água, os álcalis exercem reação química com íons hidroxila, situados nos poros do concreto, contribuindo assim para elevar o pH do sistema (tornando-o alcalino) que, quando em contato com minerais reativos presentes em alguns agregados, ocasionam o surgimento e propagação da reação álcali-agregado, gerando conseqüentemente expansões internas, fissuras, perda de funcionalidade e durabilidade.

2.5 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Sanchez (2008) menciona que para a manifestação da reação, faz-se obrigatório a presença de alguns elementos, como:

- Agregado reativo;
- Umidade maior que 50%;
- Elevada concentração de hidróxidos alcalinos (sódio, potássio, hidroxila) nos vazios do concreto.

A concentração e disposição dos elementos mencionados acima, em conjunto com a temperatura ambiente, têm importante influência na magnitude da reação e nos seus efeitos prejudiciais ocasionados (FORSTER, 1998).

Pode-se classificar a reação álcali-agregado, de acordo com o perfil e mineralogia do agregado reativo envolvido, em três formas principais (BARBOSA, 1997; SANCHEZ, 2008; HASPARYK, 2005):

- Reação Álcali-Sílica (RAS);
- Reação Álcali-Silicato (RASS);
- Reação Álcali-Carbonato (RAC).

2.5.1 Reação Álcali-Sílica (RAS)

É o tipo de RAA mais conhecida e relatada no meio técnico, sendo também a que mais comumente e rapidamente ocorre, em virtude das conformações minerais de sílicas reativas compreendidas.

Como modelos de minerais com forma favorável à reatividade da sílica, pode-se mencionar: sílica amorfa ou opala, calcedônia (uma variação de quartzo fibroso ou criptocristalino), tridimita e cristobalita (formas cristalizadas de sílica capazes de perder a estabilidade através de pequenas perturbações), vidros vulcânicos (rochas vulcânicas) ou naturais e os vidros artificiais (pyrex) (HASPARYK, 2005).

A partir do momento em que o cálcio, a sílica solúvel e os álcalis são submetidos ao contato, em solução básica, origina-se uma solução coloidal insolúvel de gel de cal e álcali-sílica, com pigmentação branca. Porém, quando somente os álcalis e a sílica solúvel são conduzidos ao contato, produz-se um gel de álcali-sílica que se expande em função da absorção de água e desempenha uma pressão na região circundante, podendo ocasionar fissuras e outras patologias nas estruturas.

Na figura 3 apresenta-se uma barragem nos Estados Unidos, onde detectou-se a ocorrência da reação do tipo álcali-sílica nas paredes dos vertedouros.



Figura 3 - Estrutura afetada pela reação álcali-silica nos Estados Unidos.

Fonte: City of Greensboro (2014).

2.5.2 Reação Álcali-Silicato (RASS)

É uma reação muito semelhante à reação álcali-sílica, na qual participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas. Os silicatos reativos mais corriqueiros são algumas rochas sedimentares, como argilitos, siltitos, folhelhos argilosos e grauvacas, rochas metamórficas, como gnaisse e quartzitos, rochas magmáticas, como os granitos, dentre outros (NBR 15577-1, 2008).

Porém, de acordo com Valduga (2002), em comparação com a reação álcali-sílica, a reação com os silicatos é mais lenta, e se apresenta como a responsável pela maior parte dos casos de deterioração de estruturas de concreto no Brasil atingidas pela RAA.

Assim como na RAS, o produto (gel) ocasionado pela RASS gera uma adesão muito baixa entre os agregados e a matriz cimentícia, possibilitando ainda a ocorrência de expansões em caso de contato com água e desta maneira, acarretando fissuração no concreto (SANCHEZ, 2008).

Como exemplo real de estruturas afetadas pela reação álcali-silicato, a figura 4 traz a representação de dois blocos de fundação com essa patologia no estado de Pernambuco.



Figura 4 - Estrutura afetada pela reação álcali-silicato em Pernambuco.

Fonte: Andrade (2006).

2.5.3 Reação Álcali-Carbonato (RAC)

A reação álcali-carbonato é um tipo de reação que se desenvolve de maneira distinta das outras mencionadas anteriormente, em consequência de que o produto desta reação não origina o gel alcalino, mas sim uma união dos álcalis do cimento com hidróxidos de magnésio, onde acontece a desdolomização entre os agregados (ataque dos álcalis às rochas carbonáticas). Por consequência disso o hidróxido alcalino se regenera, acarretando no enfraquecimento da zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento ou argamassa, promovendo fissuras devido à redução ou perda total de aderência dos materiais (VALDUGA, 2002).

Através da figura 5, pode-se observar um exemplo de estrutura, no ano de 1997, afetada pela reação álcali-carbonato em Nova Jersey, nos Estados Unidos.

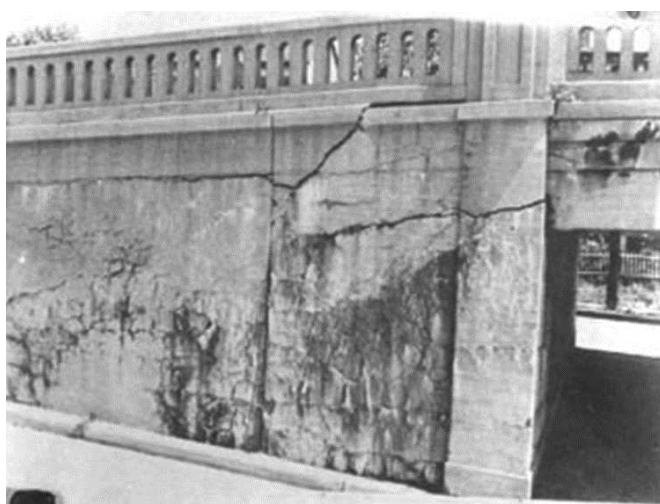


Figura 5 - Estrutura afetada pela reação álcali-carbonato em Nova Jersey.
Fonte: Farny (1997).

2.6 FATORES QUE INFLUENCIAM Á REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO

Os principais fatores que possibilitam a reação, segundo Nogueira (2010), são: cimento e agregados reativos, umidade, temperatura, tensões de compressão (influências externas) e o tempo.

2.6.1 Teor De Álcalis Do Cimento

Quanto maiores o teor de álcalis do cimento e o consumo de cimento no concreto, maiores serão as expansões. De acordo com investigações realizadas na Alemanha e Inglaterra determinou-se que o conteúdo total de álcalis mínimo para que ocorram danos devido a RAA é de 3 kg/m³. Porém, utilizar como parâmetro somente os níveis de álcalis presentes no cimento não assegura que a estrutura não sofrerá manifestações patológicas da reação álcali-agregado (MEHTA & MONTEIRO, 2006).

2.6.2 Agregados

São vários os fatores que ocasionam reação devido ao agregado utilizado na mistura. Entre eles destacam-se o tipo de rocha, histórico tectônico e de alterações, estrutura, tamanho dos grãos, porosidade, permeabilidade, área específica e composição mineral.

Segundo Paulon (1981) apud Lima (2009), as dimensões dos agregados também influenciam na magnitude das reações. Agregados reativos com dimensões muito diminutas provocam uma reação profunda e completa antes que o gel tenha se desenvolvido. Grandes quantidades de materiais finos, em virtude de sua grande superfície específica, provocam reduções rápidas na concentração de álcalis, de tal maneira que os agregados maiores não apresentem oportunidade de sofrer as reações de formação do gel expansivo.

2.6.3 Umidade

Já que o processo de expansão da RAA é motivado em função da presença de umidade no concreto, este se torna um fator muito relevante no comportamento do

mesmo diante desta reação. Em ambientes com umidade relativa acima de 80 a 85%, estima-se que ocorra um aumento na magnitude da reação (BULLETIN 79, 1991).

A degradação da estrutura de concreto se desenvolve através da absorção de água pelo gel e então a expansão. As estruturas com sistemas de drenagem deficientes ou localizadas em ambientes úmidos tais como as barragens, fundações de pontes e estruturas marinhas estão, portanto, mais sujeitas a este tipo de deterioração.

2.6.4 Temperatura

Quanto mais elevada a temperatura ambiente, mais rapidamente ocorrerá a reação. Isto pode ser esclarecido em consequência da maioria das reações químicas serem acionadas ou aceleradas através de temperaturas elevadas. Altas temperaturas também agilizam a hidratação do cimento, intensificando assim a agressividade produzida pelas reações alcalinas (BULLETIN 79, 1991).

2.6.5 Relação Água/Cimento E Cura Do Concreto

Concretos produzidos com relação água/cimento elevada (alta permeabilidade) admitem a entrada de umidade de maneira mais intensa, majorando a potencialidade da expansão provocada pela reação álcali-agregado (FOURNIER e BÉRUBÉ, 2000).

Elementos de concreto submetidos a processos de cura adequados têm menos probabilidade de desenvolver a RAA, uma vez que através da realização conveniente desse processo, pode-se evitar consideravelmente a ocorrência de microfissuras (FOURNIER e BÉRUBÉ, 2000).

2.6.6 Teor De Ar Incorporado

A utilização de ar incorporado ao concreto pode ser avaliada como benéfica em determinados casos. Hobbs (1988), apud Cardoso (2008), descreve que em concretos produzidos com a utilização de agregados reativos que não desenvolveram expansões patogênicas, o gel pode ser localizado completando os vazios provenientes do ar incorporado. Isso implica que o ar incorporado pode diminuir o perigo de ocorrer fissuração do concreto em função da RAA, apesar de não evitar a formação do gel em si.

Porém, Tiecher (2006) alerta que no decorrer do tempo, depois que o gel preencher todos os espaços vazios criados pela incorporação de ar, mas o concreto ainda possuir a presença minerais reativos, as estruturas serão capazes de sofrer expansão e fissuração.

2.6.7 Adições Químicas e Minerais

Conforme Cardoso (2008), a utilização de adições químicas incorporadas à mistura de concreto é uma alternativa para inibir a RAA, tendo em vista que as combinações químicas mais pesquisadas são as misturas com elementos à base de lítio, em razão da sua eficiência característica. Porém, sua utilização não é tão corriqueira quanto às adições minerais, como as pozolanas. A carência de pesquisas desenvolvidas nessa área, sobre as influências da adição desses compostos na contenção das expansões pode ser fator contribuinte para essa pouca utilização de misturas a base de lítio.

As adições minerais em concreto produzidos com agregados reativos são, até a atualidade, a principal e mais eficiente maneira de se impedir a ocorrência da RAA. Tendo como base o conhecimento da capacidade reativa de uma rocha, é aconselhável a realização de ensaios com uso de adições para verificação da coibição da reação através dessa alternativa (VALDUGA, 2002).

Os modelos de adições minerais são bastante diversificados. Os mais popularmente conhecidos e utilizados na inibição da RAA são a sílica ativa, a cinza volante, cinza de casca de arroz e a escória de alto-forno. Esses são denominados como adições minerais artificiais, que se apresentam geralmente como subprodutos de processos industriais (MUNHOZ, 2008).

2.7 EFEITOS NOCIVOS PROVOCADOS PELA RAA

As expansões causadas pela RAA podem danificar gravemente um determinado elemento estrutural de concreto, da mesma maneira que toda a estrutura em si, tanto no panorama de avaliação de estabilidade geral (ELU), quanto de utilização e durabilidade (ELS), além de poder interferir até mesmo no sistema operacional de usinas hidrelétricas, por exemplo. De acordo com Hasparyk (2005), os principais efeitos nocivos das RAA relatados no meio técnico são:

- Elevada ocorrência de fissuração na superfície do concreto e entre as camadas de concretagem;
- Deslocamentos na superfície do concreto;
- Perda de impermeabilidade;
- Perda de aderência entre a argamassa e à superfície dos agregados;
- Movimentação e/ou abertura de juntas de contração;
- Abertura de fissuras horizontais nas estruturas;
- Movimentação ou desaprumo das superfícies livres;
- Travamento e/ou movimentação de equipamentos e peças móveis (exemplo: comportas, turbinas, eixos, pistões, dentre outros).

2.8 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.

Existem vários métodos disponíveis de investigação para detectar-se a presença da RAA no concreto endurecido, a seguir serão mencionados algumas dessas metodologias.

2.8.1 Análise Petrográfica

Método empregado para obtenção de dados qualitativos sobre a composição mineral dos agregados utilizados em estruturas que possam estar sujeitas ao surgimento da reação álcali-agregado.

As técnicas utilizadas nesse método, são:

- Observações através de análise visual e microscopia estereoscópica (luz refletida), microscopia óptica (luz transmitida) e microscopia eletrônica;
- Técnicas analíticas, utilizadas para caracterizar a textura e forma cristalina das partículas dos agregados tais como difração de raios-x e espectroscopia de infravermelho.

A figura 6 exemplifica uma das etapas de realização da análise petrográfica:



Figura 6 – Ensaio de Análise Petrográfica

Fonte: Cichinelli (2007).

2.8.2 Método De Barras De Argamassa (MBT)

É um método baseado no ensaio descrito por Stanton em 1940, no qual é verificada a variação do comprimento de barras de argamassa confeccionadas com o agregado que se deseja analisar. De acordo com Kuperman et al. (2005), esse método de análise tem custo diminuto, porém, apresenta a desvantagens de possuir resultados sem muita confiabilidade. Essa falta de credibilidade dos resultados é motivada por:

- Falhas na identificação de agregados que possuem reatividade lenta;
- Demasiada lixiviação dos compostos alcalinos presentes nas argamassas das barras;
- Granulometria dos agregados utilizados no ensaio, não reproduzem a realidade.

A Figura 7 ilustra a realização do ensaio de barras de argamassa:



Figura 7 – Ensaio com Barras de Argamassa

Fonte: Freitas (2013).

2.8.3 Método Acelerado das Barras de Argamassa (AMBT)

É denominado acelerado, pois os resultados podem ser obtidos em apenas 16 dias, enquanto no método de barras são apresentados em um ano. As barras de argamassa são moldadas com uma relação água/cimento fixa de 0,47 e armazenadas imersas em uma solução alcalina de NaOH e temperatura de 80° C. Isto proporciona uma simulação das "condições péssimas" para submissão do agregado (LIMA, 2009).

É o método mais utilizado atualmente, por necessitar de espaços reduzidos em laboratório, além de investigar de maneira mais ágil o comportamento de um determinado agregado em função da RAA, devido ao fato de promover uma simulação de condições péssimas para submissão do agregado.

Nesse ensaio a reação álcali-agregado é avaliada, por meio de observação e análise da variação de comprimento das barras de argamassa confeccionadas com agregados e cimento.

Apesar de alguns pesquisadores constatarem que em alguns casos os resultados desse método não transitem com precisão a realidade de campo, os produtos obtidos, de acordo com Nogueira (2010), podem garantir a prevenção da RAA e servir de ferramenta para avaliação de técnicas inibidoras da reação.

A Figura 8 ilustra a realização do ensaio acelerado de barras de argamassa:



Figura 8 – Ensaio pelo Método Acelerado das Barras de Argamassa

Fonte: Lima (2009).

2.8.4 Método dos prismas de concreto (CPT)

É o método com maior confiabilidade atualmente, pelo fato de não existirem registros de divergências entre o comportamento apresentado por um agregado em laboratório e o comportamento em campo (SANCHEZ, 2008).

Para realização do ensaio, são confeccionados corpos de prova prismáticos de concreto com dimensões 7,5 x 7,5 x 28,5 cm, o quais são mantidos em câmara úmida por pelo menos 24 horas até a desmoldagem. A partir da desforma iniciam-se as medições de expansão dos prismas. A figura 9 apresenta os moldes e o sistema de leituras utilizados nesse método.

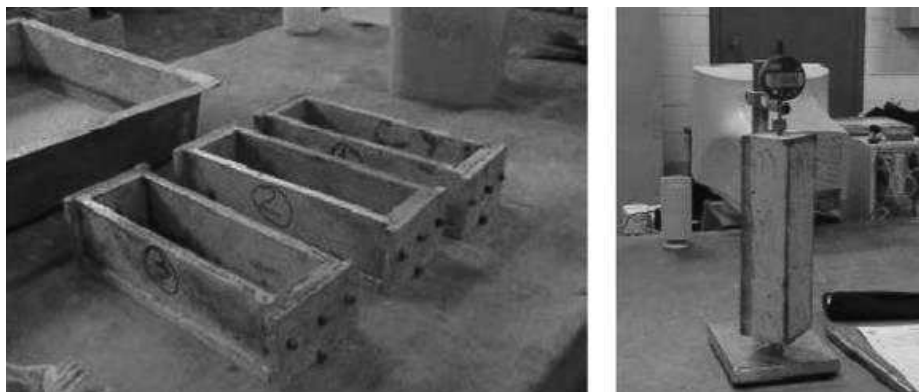


Figura 9 – Moldes e sistema de leituras empregados no método CPT.

Fonte: Sanchez (2008).

2.8.5 Método Osipov

É um método térmico de ensaio, onde partículas de agregado, com dimensões entre 20 mm e 50 mm são submetidas à uma temperatura aproximada de 1000°C durante 60 segundos. Onde, os agregados que exporem fragmentação de suas partículas ao final do ensaio, são considerados como elementos reativos aos álcalis.

Esse método possui algumas desvantagens, devido ao fato de não ser aplicável a agregados miúdos e os agregados que não sofrem fragmentação, não podem ser classificados como inócuos.

2.8.6 Método Das Rochas Carbonáticas

Esse método foi desenvolvido em virtude de a reação em rochas carbonáticas não poder ser identificada através dos outros métodos, pelo fato de desenvolver um procedimento de expansão completamente desigual dos outros tipos de reação.

Para a realização do ensaio são utilizadas amostras cilíndricas de rocha de tamanhos reduzidos (9 mm de diâmetro e 35 mm de comprimento), armazenadas em uma solução de NaOH (hidróxido de sódio) à temperatura de 23°C, onde são realizadas leituras de expansão nos períodos de 7, 14, 21 e 28 dias, podendo-se estender a duração do ensaio até 1 ano.

A figura 10 exemplifica o processo de realização desse ensaio, desde a apresentação de uma amostra obtida de rocha, armazenamento em solução de NaOH, até a aferição das leituras de expansão:



Figura 10 – Ensaio com Rochas Carbonáticas

Fonte: Silveira (2006).

As desvantagens desse ensaio são a dificuldade de obtenção de uma amostra que seja suficientemente representativa da rocha analisada, e a duração do ensaio, que pode se tornar muito prolongada.

2.8.7 Método Químico

É um método que permite avaliar a potencialidade de ocorrer a reação álcali-sílica de um agregado por meio da relação entre a concentração de sílica dissolvida e a redução da alcalinidade.

A vantagem desse ensaio é a rapidez com que pode ser executado, mas com isso surge a desvantagem em consequência do fato dos agregados permanecerem expostos as condições de ambiente agressivas dentro de reatores (figura 11) por somente 24 horas, o que poderá levar a resultados pouco precisos.



Figura 11 - Reatores utilizados nos ensaios de reatividade pelo método químico.

Fonte: Cardoso (2008).

2.8.8 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

Esse ensaio não se caracteriza como um método de avaliação de RAA propriamente dito, devido ao fato de não analisar os agregados diretamente. Mas é utilizado como uma ferramenta de apoio para situações quando já foi executado algum outro tipo de ensaio ou também para estudo de estruturas com a RAA já iniciada.

O MEV possui elevada resolução que permite a captação de informações topológicas da amostra e, com isso, possibilitam a identificação mais precisa dos produtos da Reação álcali-agregado. Na figura 12 apresenta-se um exemplo de microscopia eletrônica onde foi identificada a presença da reação álcali-agregado:

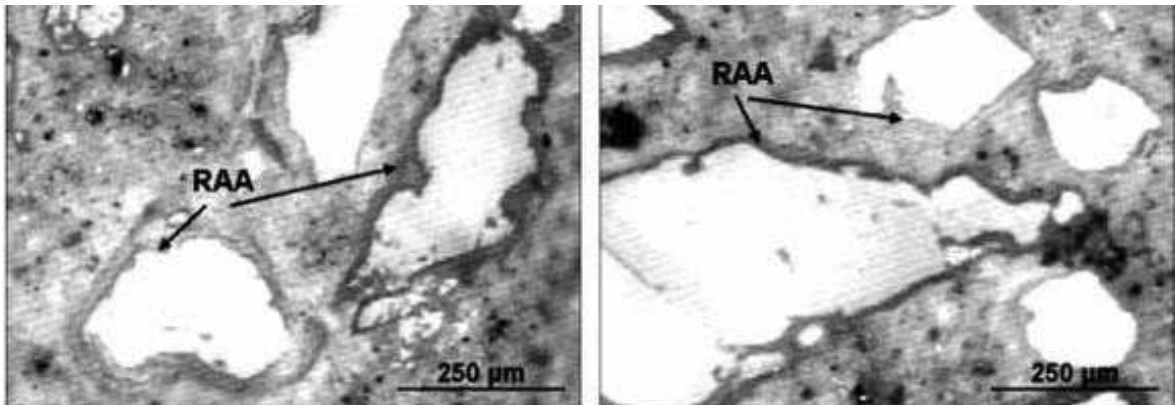


Figura 12 – Microscopias eletrônicas de argamassa com a presença da RAA

Fonte: Ribeiro et al. (2012)

3 METODOLOGIA

Utilizando a metodologia de estudo de mapeamento sistemático (Mapping Study), foram realizadas buscas por publicações eletrônicas técnico-científicas, sobre a reação álcali-agregado, nos bancos de dados da *Scientific Electronic Library Online* (SciELO) Brasil, no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e no Google Acadêmico. O recorte temporal utilizado para a pesquisa dos artigos foi do período de janeiro de 2004 a dezembro de 2014.

3.1 PROCESSO DE MAPEAMENTO SISTEMÁTICO

O mapeamento sistemático é uma forma de revisão sistemática, onde pode-se realizar uma revisão mais abrangente dos estudos primários, visando identificar quais os principais temas já foram pesquisados, bem como reconhecer lacunas no grupamento dos estudos primários onde seja sugerido o direcionamento do foco de revisões sistemáticas posteriores e detectar áreas onde outros estudos primários precisam ser conduzidos. O estudo de mapeamento sistemático proporciona uma visão abrangente de uma área de pesquisa, verificando a quantidade, as características das pesquisas realizadas, os resultados apresentados, além da periodicidade de publicações ao longo de um determinado tempo para detectar tendências (PETERSEN et al., 2008).

Segundo Kitchenham et al. (2009), o Mapping Study (MS) ou mapeamento sistemático é um instrumento utilizado para prover uma visão universal e ampla de um determinado assunto de interesse, com o objetivo de examinar, classificar e determinar a existência de evidências de pesquisas sobre um tema, fornecendo como resultado também a quantidade dessas evidências.

A título de exemplo, a eficiência no uso do MS como ferramenta de descrição minuciosa foi confirmada na área da saúde por Calil et al. (2009), apud Castro et al. (2015), na procura pela constatação das regiões corpóreas mais atingidas em

pacientes vítimas de acidentes de transporte. Os pesquisadores, ao utilizarem o estudo de publicações científicas, conseguiram mapear e determinar a região corpórea mais frequentemente atingida em acidentados, a nível de gravidade das lesões e as implicações finais dos traumatismos.

A competência e credibilidade dos estudos de revisão sistemática também foi averiguada por Moura et al. (2013), o autor conseguiu desenvolver uma análise quantitativa temporal, utilizando pesquisas científicas publicadas entre os anos de 2001 a 2011, conquistando em suas conclusões a capacidade de mapear, classificar e relacionar a atuação dos sedimentos como poluidores e suas contribuições com relação a qualidade da água utilizada para o abastecimento e consumo humano.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

O processo de mapeamento, descrito em Petersen et al. (2008), apresenta 10 etapas básicas (Figura 13), dentre as quais, há cinco passos essenciais que foram seguidos no presente trabalho:

- Definição das questões de pesquisa;
- Realização da pesquisa de estudos primários relevantes;
- Avaliação e triagem dos documentos encontrados;
- Determinação de palavras-chave nos resumos; e
- A extração e classificação dos dados e mapeamento.



Figura 13 – Etapas do processo de mapeamento sistemático

Fonte: Petersen et al. (2008)

3.2.1 Definição Das Questões De Pesquisa

Questão Principal 1: Qual o estado da arte sobre o assunto reação álcali agregado – RAA no Brasil?

Questão Secundária 1: Quais os cuidados práticos mais eficientes a serem tomados na execução e recuperação de obras civis em relação à RAA?

Questão Secundária 2: Quais as estruturas mais suscetíveis ao aparecimento da RAA e os equipamentos e métodos utilizados para monitoramento da reação nessas estruturas?

Questão Secundária 3: Quais as principais áreas pesquisadas, antes e depois de ocorrer a reação?

3.2.2 Realização Da Pesquisa De Estudos Primários Relevantes

Foram pesquisadas publicações eletrônicas técnico-científicas, sobre a reação álcali-agregado, nos bancos de dados da Scientific Electronic Library Online (SciELO) Brasil, no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e no Google Acadêmico, entre janeiro de 2004 a dezembro de 2014. Para realização das pesquisas foi utilizada a ferramenta de pesquisa avançada por palavras presentes nos títulos dos artigos, utilizando os termos reação álcali, reação expansiva ou RAA.

3.2.3 Avaliação e Triagem dos Documentos Encontrados

Para melhorar os resultados obtidos, realizou-se a triagem dos documentos encontrados, sendo selecionados para inclusão apenas aqueles trabalhos que realmente dissertam sobre os assuntos da área da pesquisa em questão, com

publicação realizada no intervalo de datas válidas, previamente definidas nessa metodologia.

3.2.4 A Extração e Classificação Dos Dados e Mapeamento.

Por fim, com todos os trabalhos efetivamente selecionados, realizaram-se análises aprofundadas nos trabalhos escolhidos, afim de atingir o mapeamento completo dos dados e alcançar todos os objetivos desse trabalho.

Para análise, dividiu-se as pesquisas em três grupos: Prevenção, monitoramento e recuperação, de acordo com as palavras-chave nos resumos e o desenvolvimento das respectivas pesquisas como um todo. No primeiro grupo, sobre prevenção, reuniram-se os trabalhos que estudaram maneiras de prevenir a ocorrência da reação expansiva, independentemente do método utilizado.

No grupo de monitoramento, selecionou-se os trabalhos com foco nos métodos de ensaio utilizados na identificação da RAA, análises das características e consequências da reação álcali-agregado, monitoramento de obras reais e os instrumentos utilizados nesses casos e, por fim, simulações computacionais e modelagem numérica.

Para o terceiro e último grupo, denominado recuperação, foram direcionados os trabalhos que apresentavam formas de mitigar as expansões residuais da álcali-agregado e os métodos práticos de recuperação estrutural em obras afetadas pela reação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio do mapeamento sistemático utilizado nesse trabalho, buscou-se compreender o estado de arte sobre a reação álcali-agregado no Brasil, através de pesquisas nos bancos de dados da Scielo Brasil, Capes e Google Acadêmico, onde realizou-se a triagem dos trabalhos, tomando-se como critério a utilização somente de pesquisas desenvolvidas no Brasil entre os anos de 2004 e 2014 sobre a RAA como tema principal.

Utilizando-se as palavras reação álcali, reação expansiva e RAA nos portais propostos, foram encontrados 43 artigos com ênfase na reação álcali-agregado, sendo que a maior quantidade de produções técnico-científicas encontradas foi desenvolvida nas regiões Sul e Sudeste, com destaque para os estados de São Paulo (34,9%) e Rio Grande do Sul (23,3%) como mostra-se no gráfico 1.

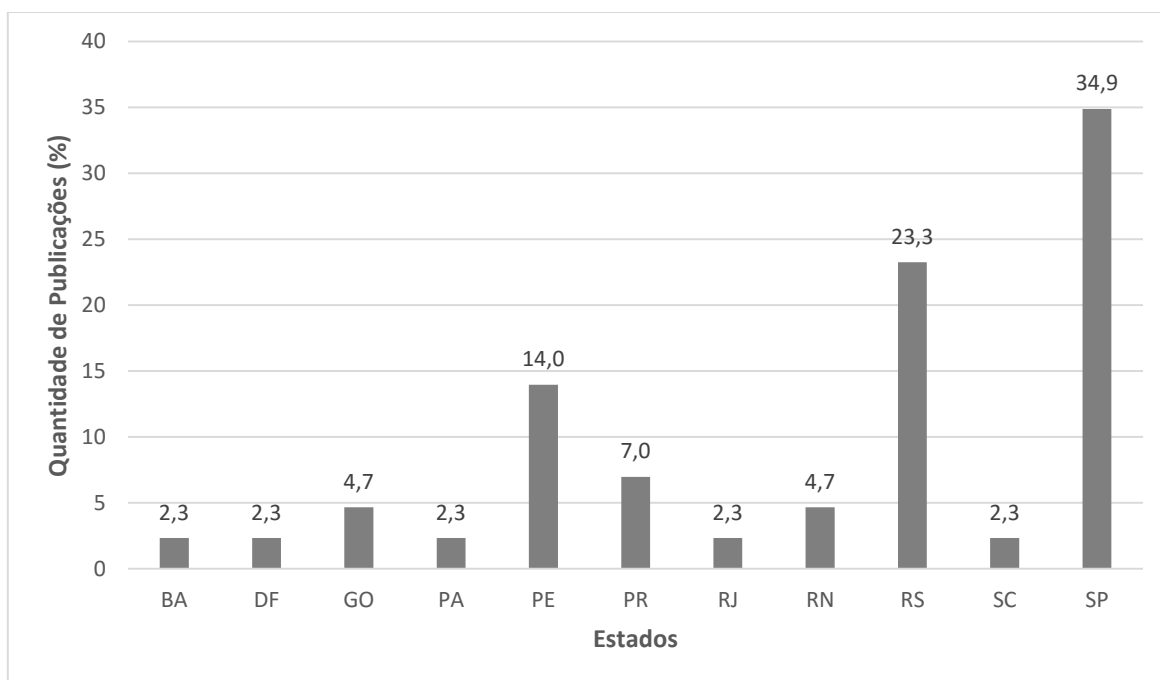


Gráfico 1 – Quantidade de artigos encontrados nas bases de dados pesquisadas no recorte temporal de 2004 a 2014, divididos por Unidades Federativas Brasileiras.

Durante o período de análise, compreendido entre os anos de 2004 a 2014, o ano de 2007 foi aquele em que se identificou o maior número de publicações

relacionadas à reação álcali-agregado, 18,6% no total, seguido pelo ano de 2010 com 14% das publicações. Na outra extremidade, ou seja, o menor número de publicações ocorreu em 2004, 2005 e 2013 com 4,7% das publicações, em cada ano. O gráfico 2 apresenta a quantidade de artigos encontrados nas bases de dados pesquisadas no recorte temporal de 2004 a 2014, divididos em função do Ano de publicação.

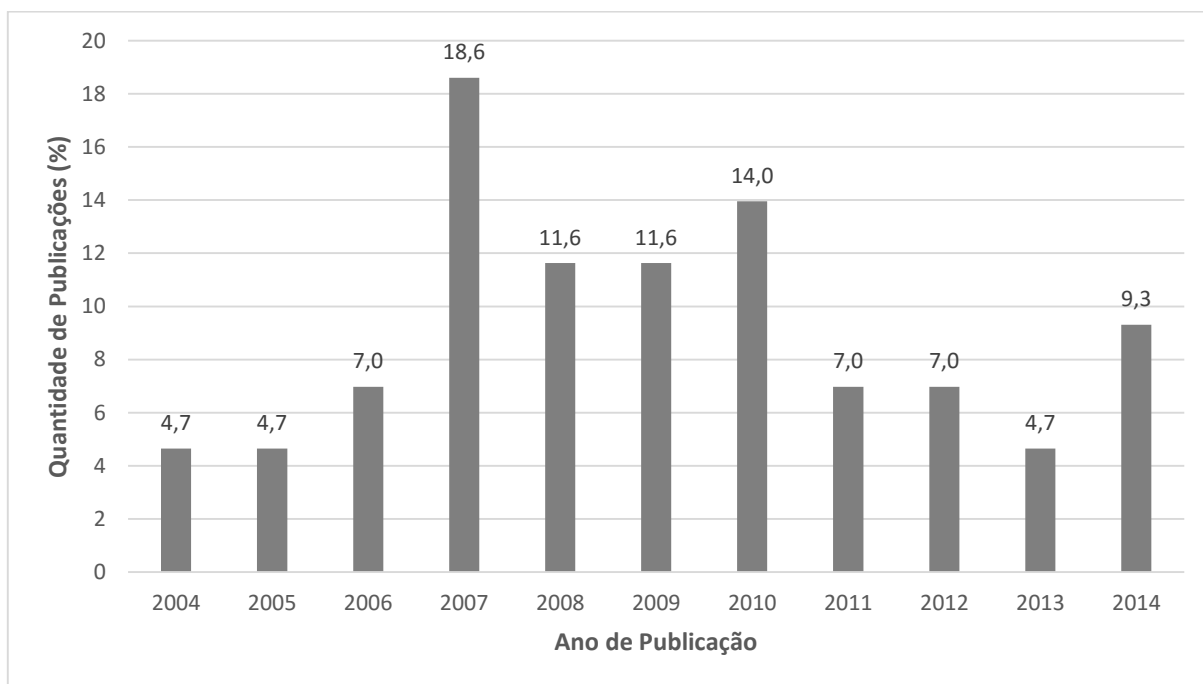


Gráfico 2 – Quantidade de artigos encontrados nas bases de dados pesquisadas no recorte temporal de 2004 a 2014, divididos em função do Ano de publicação.

Seguindo a metodologia sistemática estabelecida neste trabalho as publicações foram divididas para análise em três áreas de pesquisa: Prevenção, monitoramento e recuperação. Com isso, foi observado que 48,9% dos trabalhos tratam de maneiras de prevenir a ocorrência da RAA; 38,3% abordaram métodos de ensaio e monitoramento do desenvolvimento da reação; e 12,8% analisaram maneiras de recuperar estruturas já afetadas pelas reações expansivas. No gráfico 3 apresenta-se a quantidade de artigos encontrados nas bases de dados pesquisadas no recorte temporal de 2004 a 2014, divididos quanto a área pesquisada.

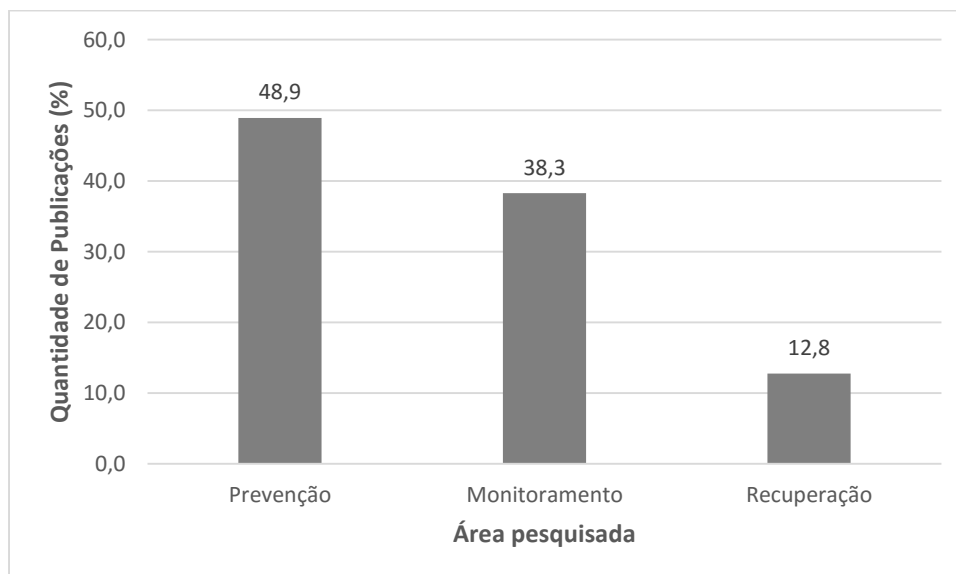


Gráfico 3 – Quantidade de artigos encontrados nas bases de dados pesquisadas no recorte temporal de 2004 a 2014, divididos quanto a área pesquisada.

4.1 PREVENÇÃO

Observou-se que o assunto mais pesquisado nos trabalhos selecionados foi a busca por maneiras de prevenir o surgimento da reação álcali-agregado, através de análises da potencialidade reativa de alguns agregados utilizados no concreto e a utilização de cimentos com baixos teores de álcalis ou, ainda, cimentos com adições ativas mitigadoras dessa reação como a sílica ativa, cinza da casca de arroz (CCA), metacaulim, cinza volante, escória de alto-forno, dentre outras.

4.1.1 Adições Minerais

De acordo com Baptista (2013), traços de concreto elaborados com adições de 15 % e 25 % de sílica com cimento CP V ARI demonstraram eficiência inibindo a reação álcali-agregado e tornaram as amostras potencialmente inócuas. Porém outros

autores encontraram resultados eficientes com essa mesma adição em proporções ainda menores. Para Chiaro (2012), a utilização de 10% de sílica ativa já se mostrou eficiente, em virtude da utilização de cimentos como CP V ARI-RS e Cimento Branco (CPB).

Outros trabalhos também apresentaram resultados eficientes para algumas adições ativas, além da sílica, como foi o caso da pesquisa de Munhoz (2007), na qual foram analisadas amostras de agregados graníticos que desenvolvem a reação álcali-silicato e amostras de agregados basálticos que são potencialmente reativos à álcali-silica. Para mitigar a expansão causada pela reação álcali-silicato, Munhoz (2007) concluiu que são necessárias as adições de 60% de escória de alto-forno, 16% de cinza volante, 15% metacaulim ou 10% sílica ativa. Já para mitigação das expansões causadas pela reação álcali-silica, o teor mínimo de adições é de 45% de escória de alto-forno, 20% de cinza volante, 13% metacaulim ou 9% sílica ativa.

Outra adição muito estudada e que se apresenta como um importante contribuinte na busca pela sustentabilidade e preservação do meio ambiente por parte da indústria da construção civil, mas que gerou resultados distintos entre diversos autores, foi a cinza da casca de arroz - CCA. Para Silveira (2007), o efeito da incorporação de CCA na redução da expansão devido a RAA está relacionada ao tipo de cinza, o tipo de agregado e ao teor de cinza utilizado. A melhor combinação agregado-CCA, onde se obteve a menor expansão, foi com 50% de CCA-Americana e agregado riodacito. No caso das pesquisas elaboradas por Silva (2007), teores de 5% ou 10% proporcionaram reduções na expansão quando comparados a amostras sem adição de CCA, porém, não o suficiente para considerar o material inócuo.

Em buscas de outras alternativas, Trindade (2010) pesquisou a utilização conjunta da CCA com a adição de 30 e 40% de cinza volante, concluindo que a mistura se mostrou mitigadora da RAS e seu efeito aumentou proporcionalmente com a adição de cinza volante. Partindo desse princípio, Trindade (2011) também conseguiu resultados satisfatórios com a utilização de CCA natural na produção de concretos conjuntamente com cinza volante, porém desenvolveu seu trabalho com teores mínimos de 20%, mesmo com a estrutura estando em ambientes agressivos, atendendo assim ao requisito durabilidade.

A utilização de apenas cinza volante como adição ativa também trouxe resultados satisfatórios como mostra o trabalho de De Lucca (2010). O autor concluiu

que um teor de substituição de 15% de cimento Portland por cinza volante foi suficiente para manter as expansões devido à RAA em valores inferiores ao limite recomendado. Neste trabalho também verificou-se que a redução da expansão cresce com o aumento do teor de cinza, porém de maneira não linear, fazendo com que a adição seja limitada a 30%, devido à redução ocasionada na resistência do concreto.

Ainda em relação a utilização de cinza volante, Silva et al. (2010) determinou que os teores indicados para quando utiliza-se o basalto como agregado é de 40% de cinza volante e 30% para o cascalho.

Em alguns lugares do Brasil já são utilizadas adições minerais ao concreto como forma de prevenção da RAA. Freire Junior (2012), menciona que em diversas obras da cidade de Caruaru-PE foi utilizado o metacaulim na proporção de 10% a 15% adicionado em substituição parcial ao cimento empregado para produzir o concreto.

Um dos compostos que obteve maior consenso entre os autores como forma efetiva de reduzir as expansões causadas pela RAA foi o Lítio. De acordo com Silva (2007), Silva (2009), Silva et. al. (2010) e Hasparyk (2005), as expansões são reduzidas com o aumento da adição de LiNO_3 (nitrato de lítio) na água de amassamento do concreto, podendo existir um valor limite de adição desse composto no qual não ocorre mais aumento na redução da expansão, porém esse valor ainda não foi definido. Quando relacionados com a utilização de cinza volante, as adições com lítio tendem a estabilizar a expansão ao longo do tempo, enquanto nas adições de cinza volante a expansão permanece aumentando.

4.1.2 Outras Adições

Segundo Filla (2011), existe uma nova maneira de combater a reação álcali-agregado, através da utilização do pó derivado de agregados reativos (RAP). Essa linha de pesquisa parte do princípio de que quando um pó reativo entra em contato com a pasta cimentícia, acontece a liberação de sílica, que potencializa a sua capacidade de reter os álcalis. A redução de álcalis livres reduz o pH e, portanto, o ataque aos minerais reativos. Em seu estudo, o autor comprovou a eficiência da utilização de pó ultrafino de basalto através da mitigação da RAA, porém verificou-se

também que os concretos modificados apresentaram metade da resistência original e o dobro do tempo de pega.

Algumas adições obtiveram resultados não muito conclusivos, como foi o caso da utilização de lama vermelha descrita por Ribeiro (2012), onde observou-se que as expansões em 14 dias foram maiores do que as recomendáveis, porém aos 28 dias foram menores, fato descrito pelo autor como sendo devido à elevada quantidade de álcalis presentes na lama fazendo com que as reações nos primeiros dias sejam mais acentuadas, porém esses fatos tornaram a eficiência desse composto um pouco inconclusiva.

Outro trabalho que também apresentou resultados inesperados foi sobre a impermeabilização superficial do concreto para controle da RAA. Albertini (2014), esperava que um produto impermeabilizante impedisse a entrada de água no concreto, o que não foi observado, pois em todos os casos constatou-se aumento da umidade do ar no interior dos corpos de prova, comprometendo totalmente os resultados.

Na utilização de agregados miúdos reciclados de ágata também se encontrou algumas dificuldades. Segundo Chiaro (2012), devido ao agregado de ágata ser altamente reativo, ele deve ser utilizado com adições, como a sílica ativa, capazes de mitigar a reação álcali-agregado. Outro fator importante a ser analisado na possível utilização deste agregado miúdo reciclado de ágata é a dificuldade em britá-lo. Sua dureza acarreta um grande desgaste, provocando contaminação com lascas de ferro originadas das mandíbulas do britador. Em contato com a água o agregado possui grande possibilidade de sofrer processo de oxidação devido ao pó de ferro.

4.1.3 Influência dos Tipos de Cimentos

Como forma de prevenção da reação álcali-agregado também verificou-se trabalhos que analisaram a influência do tipo de cimento utilizado. Dentre todos os tipos de cimento, o que se apresentou mais eficiente foi o CP IV devido ao fato de que todos os prismas moldados com esse cimento obtiveram expansões muito próximos e bem abaixo do limite estabelecido pela norma, manifestando que o cimento CP IV é

um excelente mitigador da reação expansiva (Trindade, 2010; Tiecher, 2006; Arrais, 2011).

Essa capacidade benéfica de certa forma já era esperada em virtude de o cimento CP IV possuir grande quantidade de pozolana em sua composição, com teores que podem variar de 15 a 50 %.

4.1.4 Influência da Reatividade dos Agregados

Um dos principais fatores que influenciam a reação álcali-agregado é a reatividade dos agregados, em virtude disso vários autores dedicaram suas pesquisas para analisar os agregados utilizados no concreto, com o intuito de alertar sobre os agregados potencialmente reativos e encontrar aqueles que possuem comportamento inócuo.

Em relação aos agregados caracterizados como inócuos (não reativos), Couto (2008) concluiu através de análises pelo método químico e método acelerado de barras de argamassa que rochas como basaltos, granodioritos e granitos provenientes do estado de Goiás não apresentaram potencialidade reativa. Nessa linha de pesquisa, De Lucca (2010) demonstrou, através dos resultados do método acelerado de barras de argamassa, que amostras de brita granítica originárias do estado do Rio Grande do Sul também apresentaram comportamento potencialmente inócuo.

No que diz respeito aos agregados potencialmente reativos, Tiecher (2006) destaca-se pela abrangência de seu trabalho, onde avaliou a reatividade dos 40 agregados mais utilizados para dosagem de concreto nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Através de análise petrográfica constatou-se que todos os 40 agregados coletados possuem minerais reativos.

De acordo com Tiecher (2006), dentre as 40 amostras de agregados avaliadas, 10 eram areias de rio e 30 eram rochas. Dentre as 30 amostras de rochas utilizadas, 28 eram de origem ígnea, sendo 07 granitos, 07 riolitos e 14 basaltos, uma amostra com origem carbonática (calcário) e uma metamórfica (gnaisse). Outra análise realizada pelo autor resultou na descoberta de que o gel da RAA possuía a mesma constituição, independentemente do tipo de agregado ou cimento utilizado.

4.2 MONITORAMENTO

Em relação ao monitoramento das estruturas afetadas por RAA, observou-se em alguns trabalhos, o enfoque principal voltado para a análise dos métodos de ensaio mais utilizados para a avaliação de agregados e de combinações entre cimentos e agregados em laboratório, buscando análises críticas no que diz respeito ao comportamento da reação álcali-agregado. Além desses itens, também foram encontradas pesquisas de estudos de caso em estruturas com potencialidade de desenvolvimento da RAA e os equipamentos utilizados para realização desses monitoramentos.

4.2.1 Análise dos Métodos de Ensaio

Através de análises críticas, Sanchez (2008), Jesus (2008) e Mizumoto (2009), concluíram que a análise petrográfica não é conclusiva por si só, sendo apenas indicativa e deve ser sempre acompanhada de outros métodos de ensaio. Porém, ressaltam que a realização deste tipo de ensaio torna-se extremamente importante na estimativa do potencial reativo de um agregado.

Outro ensaio estudado foi o método AMBT (Método Acelerado das Barras de Argamassa), o mais utilizado em todo o mundo, especialmente pela agilidade de classificação de um agregado (16 dias). Contudo, Sanchez (2008) mencionou que os agregados avaliados através desse método apresentaram comportamentos expansivos distintos dos ensaios realizados em concreto, tais como o CPT, ACPT, ABCPT e ACPST. Mizumoto (2009) identificou essas diferenças nos resultados de reatividade dos granitos quando foram classificados como inócuo no ensaio AMBT, mas em outros ensaios o mesmo foi caracterizado como potencialmente reativo.

Para Sanchez (2008), o método acelerado ACPT realizado tanto em estufa ventilada quanto com equipamento de banho-maria, apresentou grande correlação com o ensaio CPT que é considerado o método mais confiável atualmente, podendo ser utilizado para substituir o ensaio de longa duração. Porém, convém ressaltar que,

Mizumoto (2009) encontrou inconsistências no diagnóstico da reação para litologias granítica e basáltica.

Além dos métodos já mencionados, outra análise que se mostrou como uma ferramenta satisfatória para Mizumoto (2009) foi o teste colorimétrico, o qual baseia-se na identificação de potássio e cálcio referentes ao gel proveniente da RAS, empregando-se reagentes químicos tonificantes, como o cobaltonitrito de sódio [NaCo(NO₂)₆], que identificam regiões afetadas do concreto com cores amareladas e rosadas, respectivamente. Esse método se mostrou satisfatório no indicativo da RAA, além de distinguir a presença de outras manifestações patológicas nos concretos estudados.

4.2.2 Sugestões e Desenvolvimento de Novos Métodos de Análise

Alguns trabalhos apresentaram sugestões de alteração para os ensaios já existentes, como no caso do método químico simples, em que Rolim (2010) observou que o ensaio estava em desuso por não fornecer resultados confiáveis para agregados que participam da reação álcali-silicato. Assim, o autor sugeriu algumas alterações no mesmo, como o aumento para 7 dias no tempo de ataque das amostras. Essa mudança mostrou resultados condizentes com o comportamento das rochas em campo e pelo ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa, tornando o ensaio mais representativo quando realizado dessa forma.

Sanchez (2008), sugeriu um novo método de análise, o ensaio ABCPT (método acelerado brasileiro de prismas de concreto), similar ao AMBT (método acelerado de barras de argamassa), exceto pela concentração da solução e pela cura, que não é feita em água a 80° C e sim em câmara úmida a 23°C durante as primeiras 24 horas. Além do cuidado com o equilíbrio da concentração alcalina entre os meios externo (solução) e interno (prismas). Esse ensaio sugerido demonstrou bastante potencial na análise de agregados em laboratório e rapidez na classificação (28 dias). Porém, ainda torna-se necessária à utilização deste método com um maior número de agregados de modo que sua efetividade possa ser realmente constatada.

Como conclusão de seus estudos, Sanchez (2008) sugeriu um fluxograma de classificação de agregados (figura 14) utilizando mais de um ensaio, de maneira que os resultados sejam os mais precisos possíveis.

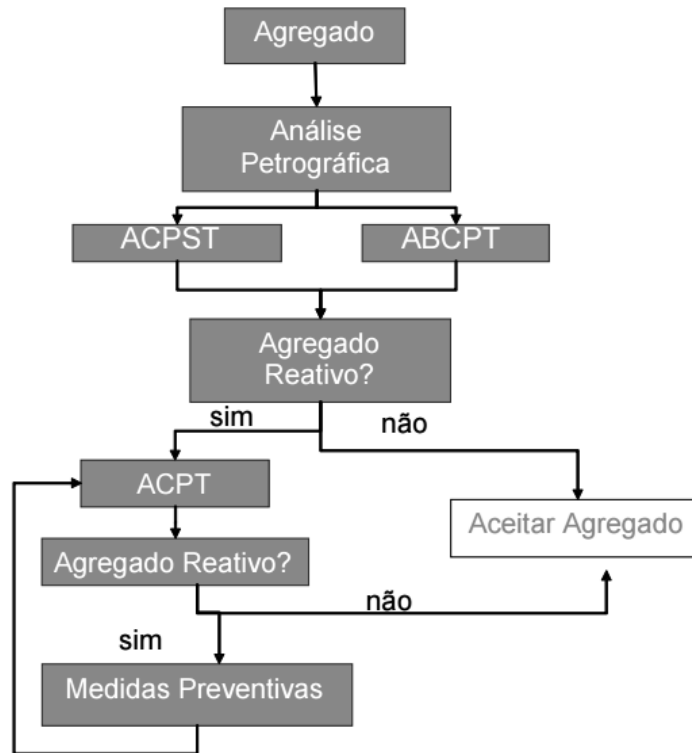


Figura 14 - Fluxograma de classificação de agregados.
Fonte: Sanchez (2008).

4.2.3 Análise das Características e Consequências da RAA

Alguns trabalhos encontrados apresentaram pesquisas voltadas ao monitoramento e compreensão do desenvolvimento da reação álcali-agregado e suas influências nas propriedades do concreto. Em virtude disso foram encontrados resultados muito interessantes e até mesmo curiosos, como na pesquisa de Silveira (2007), em que a resistência à compressão de testemunhos de concreto de uma barragem que apresentava o desenvolvimento da RAA foi maior do que em prismas moldados em laboratório, essa característica segundo o autor, pode ser atribuída a

densificação do concreto, que devido a formação dos produtos da reação álcali-agregado, preenchem os vazios, levando ao ganho de resistência.

Em estudos relacionados à compreensão sobre as propriedades da reação álcali-agregado, Hasparyk (2005) observou que o “gel” exsudado é um material com consistência rígida, análogo a um vidro, em virtude das características apresentadas e por ser quebradiço quando golpeado. Em suas análises sobre as propriedades mecânicas, o autor também observou que o módulo de elasticidade é a primeira propriedade a ser influenciada, sofrendo reduções significativas devido aos efeitos de microfissuração causados pela reação, enquanto isso, a resistência à compressão pode aumentar até atingir um valor máximo a partir do qual começa a reduzir-se ao longo do tempo.

De uma maneira mais específica, Silveira (2006) focou sua pesquisa no estudo das reações com rochas carbonáticas e observou que seus diagnósticos necessitem de vários ensaios e a interpretação dos resultados em conjunto, além de observar que essa classe de rochas pode desenvolver tanto as reações RAC quanto RAS, devido alguns minerais silicáticos.

4.2.4 Obras Mais Suscetíveis à RAA e Instrumentos de Monitoramento

Em relação aos estudos de monitoramento de estruturas com possibilidade de ocorrência da reação ou que já apresentem a RAA, observou-se a predominância de obras como barragens, pontes, blocos de fundação e pavimentos de concreto. Nos trabalhos de Marques (2009) e Zoilo (2010), também encontrou-se os principais instrumentos utilizados para monitoramento das estruturas mais suscetíveis à RAA, os quais foram:

- Marcos superficiais de referência, a fim de acompanhar o deslocamento de pontos da estrutura;
- Extensômetros múltiplos de haste, para medir deformação;
- Pêndulos diretos e pêndulos livres, para monitorar os deslocamentos horizontais e cisalhantes; e

- Medidores tri-ortogonais para avaliar a abertura ou fechamento de juntas.

4.2.5 Simulação e Modelagem Numérica

Em complemento aos estudos de monitoramento da reação álcali-agregado, os trabalhos de Rodrigues (2014), Nobrega (2008), Lopes (2004) e Lira Madureira (2007), foram desenvolvidos buscando maneiras de simular a ocorrência da reação e prever suas consequências. Nesses estudos constatou-se que é possível simular a reação computacionalmente, contribuindo assim para facilitar seu estudo e busca por maneiras de combatê-la.

4.3 RECUPERAÇÃO

Entre os assuntos abordados nas pesquisas reunidas nesse trabalho, a recuperação de estruturas já afetadas pela reação álcali-agregado foi o que possuiu menor número de trabalhos publicados, porém as pesquisas encontradas apresentaram métodos satisfatórios de recuperação de elementos deteriorados e mitigação das expansões residuais da RAA.

4.3.1 Utilização de Composto à Base de Lítio

De acordo com a maioria dos autores, a utilização de composto à base de lítio é a solução mais eficiente até o momento, para mitigar as expansões residuais da álcali-agregado, tanto nos concretos como nas argamassas. A atuação dos compostos a base de lítio, segundo Florindo (2009), provoca alterações na

composição do gel exsudado, inibindo a absorção água e as expansões nas estruturas, reduzindo ou até impedindo que essas expansões ocorram.

Porém, todos os estudos (Silva ,2009; Cândido, 2009; Florindo, 2009) a respeito da utilização do lítio foram realizados com corpos de prova de concreto e argamassa em laboratórios, em condições específicas de análise, fazendo com que essa solução ainda não tenha sido comprovada em aplicações práticas, para utilização em estruturas já executadas e afetadas pela reação.

4.3.2 Métodos de Recuperação Estrutural

Conforme os estudos desenvolvidos sobre métodos de recuperação estrutural, Silva (2007) e Gomes (2008) apresentaram algumas soluções intuitivas que engenheiros especialistas em estruturas utilizaram em algumas obras afetadas pela RAA na cidade de Recife – PE. Segundo os autores, os procedimentos práticos sugeridos e executados pelos engenheiros para a recuperação de blocos de fundação consistiram, de maneira geral, em limpeza e preenchimento das trincas através de injeções de microcimento, protensão nas faces laterais e uma camada de concreto armado com adições ativas e impermeabilizantes na face superior.

Entretanto, ainda necessita-se a elaboração de outros estudos para o desenvolvimento e comprovação de técnicas de recuperação de estruturas afetadas pela reação álcali-agregado.

4.4 ESTADO DA ARTE

Como conclusão dos resultados obtidos nessa pesquisa, através da metodologia utilizada, obteve-se o estado da arte sobre o assunto reação álcali-agregado no Brasil entre os anos de 2004 e 2014 que está apresentado resumidamente nos Quadros 2 e 3.

Prevenção	Adições Minerais	15% e 25% de sílica ativa + cimento CP V-ARI	Baptista (2013)
		10% de sílica ativa + cimento CP V-ARI RS ou Cimento Branco (CPB)	Chiaro (2012)
		Para agregados graníticos: 60% de escória de alto-forno, 16% de cinza volante, 15% metacaulim ou 10% sílica ativa	Munhoz (2007)
		Para agregados basálticos: 45% de escória de alto-forno, 20% de cinza volante, 13% metacaulim ou 9% sílica ativa	
		50% de cinza da casca de arroz (Americana) + agregado riodacito	Silveira (2007)
		5% ou 10% de cinza da casca de arroz proporcionaram reduções na expansão, porém insuficientes para mitigá-la	Silva (2007)
		20% de cinza da casca de arroz natural + 30% e 40% de cinza volante	Trindade (2011)
		15% até 30% de cinza volante, adições acima de 30% ocasionaram redução na resistência do concreto	De Lucca (2010)
		40% de cinza volante + basalto ou 30 % de cinza volante + cascalho	Silva et al. (2010)
		10% a 15% de metacaulim	Freire Jr. (2012)
		Adição de compostos a base de Lítio, com quantidades que variam em função da reatividade dos agregados utilizados	Silva (2007), Silva (2009), Silva et al. (2010) Hasparyk (2005)
	Outras Adições	Utilização de pó ultrafino derivado de agregados reativos, eficiente em mitigar a reação, porém reduziu em 50% a resistência original e aumentou em 100% o tempo de pega das amostras de concreto analisadas	Filla (2011)
		Utilização de lama vermelha, apresentou resultados de eficiência inconclusivos	Ribeiro (2012)
		Impermeabilização superficial, as técnicas utilizadas não impediram o aumento da umidade no interior das amostras, comprometendo os resultados	Albertini (2014)
		Utilização de agregados miúdos reciclados de ágata, apresentou-se altamente reativo, agravando a reação	Chiaro (2012)
	Tipos de Cimento	Cimento CP IV apresentou-se mitigador da reação, sem a necessidade de adições	Trindade (2010), Tiecher (2006) e Arrais (2011)
	Reatividade dos Agregados	Basaltos, granodioritos e granitos do estado de Goiás se caracterizaram como inócuos	Couto (2008)
		Brita granítica de Porto Alegre apresentou comportamento potencialmente inócuo	De Lucca (2010)
		Granitos, riolitos, basaltos, calcário, gnaiss e areias de rio, foram todos caracterizados como reativos	Tiecher (2006)

Quadro 2 - Resumo do mapeamento referente aos métodos de prevenção da RAA.

Monitoramento	Métodos de Ensaio	Análise petrográfica necessita de outros métodos para obtenção de resultados conclusivos	Sanchez (2008), Jesus (2008) e Mizumoto (2009)
		Método Acelerado Das Barras De Argamassa apresenta divergência de resultados quando comparado com outros métodos	Sanchez (2008) e Mizumoto (2009)
		Análise colorimétrica considerada como ferramenta eficiente	Mizumoto (2009)
	Tipos de Obras	As obras mais suscetíveis ao aparecimento da reação são barragens, pontes, blocos de fundação e pavimentos de concreto	Marques (2009) e Zoilo (2010)
	Instrumentos de Monitoramento	Marcos superficiais de referência, extensômetros múltiplos de haste, pêndulos diretos e pêndulos livres e medidores tri-ortogonais	Marques (2009) e Zoilo (2010)
Recuperação	Compostos químicos	Utilização de compostos à base de lítio, considerados altamente eficientes	Florindo (2009), Silva (2009) e Cândido (2009)
	Recuperação estrutural	Procedimento utilizado em blocos de fundação na cidade de Recife - PE: Injeções de microcimento, protensão nas faces laterais e uma camada de concreto armado com adições ativas e impermeabilizantes na face superior	Silva (2007) e Gomes (2008)

Quadro 3 - Resumo do mapeamento referente aos métodos monitoramento e recuperação de estruturas afetadas pela RAA.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do mapeamento sistemático executado nesse trabalho, concluiu-se que nos estudos realizados no Brasil sobre a reação álcali-agregado, no período entre 2004 e 2014, as pesquisas mais predominantes foram aquelas que buscaram por maneiras de prevenir a ocorrência da RAA, representando 48,9% do total de trabalhos encontrados. O ano com o maior número de pesquisas desenvolvidas foi o ano de 2007 com 18,6% do total. Em relação as unidades federativas onde foram publicados os trabalhos, o estado com maior quantidade de publicações foi São Paulo, com 34,9% das pesquisas.

No que diz respeito às técnicas de prevenção, a predominância de pesquisas encontradas foi em relação aos estudos sobre a eficiência de adições químicas e minerais no concreto. Apesar disso, entre os resultados encontrados, aquele que destacou-se pelo fato de ser potencialmente o mais eficiente em prevenir a reação, foi a utilização do cimento CP IV. Essa capacidade benéfica ocorre, possivelmente, devido ao fato de o cimento CP IV possuir elevada quantidade de pozolana em sua composição, capaz de inibir a RAA.

Observou-se, através das pesquisas mapeadas, que as estruturas mais suscetíveis ao aparecimento da RAA são barragens, pontes, blocos de fundação e pavimentos de concreto. Nesses casos recomenda-se análise prévia de todos os fatores que potencializam o desenvolvimento da reação, com o objetivo de garantir a segurança nas estruturas.

Em virtude dos fatores que influenciam no desenvolvimento da reação álcali-agregado e a particularidade que cada construção pode apresentar na prática, recomenda-se que antes da utilização efetiva de técnicas com eficiência comprovada em laboratórios e pesquisas, sejam feitos estudos sobre a reatividade dos materiais que serão utilizados e o comportamento desempenhado com a utilização do método preventivo adotado.

Entre os trabalhos realizados com o objetivo de desenvolver maneiras de combater a reação após a sua ocorrência e recuperar as estruturas já afetadas, constatou-se resultados satisfatórios para a utilização do lítio como inibidor das expansões residuais. Porém, em outros trabalhos não se observou a utilização desse

elemento entre as práticas adotadas na recuperação de estruturas reais, demonstrando ainda a necessidade do desenvolvimento de testes práticos sobre maneiras de aplicação do lítio em estruturas, além da elaboração de outras técnicas de recuperação.

Em relação aos métodos de ensaio analisados nas pesquisas, aquele que obteve maior êxito e desempenhou maior eficiência foi o método dos prismas de concreto, onde observou-se consistência na maioria dos resultados e funcionalidade nas análises, pelo fato de ser possível analisar a potencialidade reativa tanto de agregados graúdos quanto de agregados miúdos.

Sendo assim, conclui-se que existem diversos estudos publicados contendo valiosas informações sobre a reação álcali-agregado no Brasil, mas ainda necessitam-se avanços nos estudos sobre a eficiência das técnicas de combate a essa reação.

Através desse trabalho observa-se que no desenvolvimento e execução de projetos, precisa-se avaliar todas as questões que possam interferir ou acarretar problemas construtivos, utilizando-se de medidas preventivas e qualidade na execução, onde na maioria das vezes medidas simples podem evitar grandes contratempos após a concretização dos projetos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTINI, Paloma G. O. **Sistema de proteção superficial de estruturas de concreto de usinas hidrelétricas para controle da reação álcali-agregado**. 2014. 124 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2014.

ANDRADE, Tibério. **Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana do Recife**. II Simpósio sobre Reação Álcali-agregado em Estruturas de Concreto, IBRACON/CBGB. Rio de Janeiro, 2006.

ARRAIS, Miguel S. M. C. **Reação álcali-silicato: avaliação do comportamento de agregados graúdos da Região Metropolitana do Recife frente a diferentes tipos de cimentos**. 2011. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, UFPE, Recife, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro: 2008.

_____. **NBR 15577-5: Agregados - Reatividade álcali-agregado – Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro: 2008.

BAPTISTA, Allan S. et al. **Avaliação da reação álcali-agregado da areia natural da região metropolitana de Porto Alegre, Brasil e do uso de sílica ativa**. IX Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas – CINPAR 2013. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BARBOSA, Fred. R. **Reação Álcali-Agregado: Caracterização E Estudo 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.

BRUNO, Gabriela B. **Contribuição na caracterização de agregados comercializados no Rio Grande do Norte com ênfase na reação álcali-agregado**. 2014. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte. Rio Grande do Norte, 2014.

BULLETIN 79 (1991) - **Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Dams – Review and Recommendations**. CIGB/ICOLD. Paris: 1991.

CÂNDIDO, Wilson F. **Estudo de tratamentos com lítio no combate da reação álcali-agregado**. 2009. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2009.

CARDOSO, Anderson F. A. **Reação Álcali-Agregado – Verificação Da Reatividade Do Seixo, Frente Ao Álcalis Do Cimento, Das Principais Jazidas Fornecedoras De Agregado Graúdo Para A Região Metropolitana De Belém**. 2008. 132 f. Universidade Federal Do Pará – Curso De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, Belém. 2008.

CHIARO, Silvia M. X. **Reação álcali-agregado em concretos brancos com agregados miúdos reciclados de ágata**. 2012. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2012.

CICHINELLI, Gisele C. **Álcali-agregado, Reação perigosa**. Revista Técnica, São Paulo, 2007. Disponível em: < <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo/285390-5.aspx> >. Acesso em: 07 out. 2015.

CITY OF GREENSBORO, 2014. Disponível em: < <http://www.greensboro-nc.gov/index.aspx?page=2303> >. Acesso em: 21 nov. 2015.

COUTO, Tiago A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, 2008.

DE LUCCA, Ana C. K. **Reação álcali-agregado: efeito do uso de cinza volante**. 95 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010.

FARNY, James A. et al. **Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete**. Portland Cement Association, 1997.

FILLA, Julio C. **Estudo da utilização de pó ultrafino de basalto como adição na preparação de um cimento mitigador da reação álcali-sílica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2011.

FLORINDO, Renata N. **Estudo da reação álcali-sílica em concretos através de ressonância magnética nuclear de alta resolução**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

FORSTER, Stephen W. et al. **State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity**. American Concrete Institute Committee (ACI) 221, Farmington Hills, Michigan, p. 1-23, 1998.

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

FREIRE JUNIOR, Clóvis L. **Medidas preventivas da reação álcali-agregado nas edificações construídas na cidade de Caruaru – PE**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Faculdade do Vale do Ipojuca – FAVIP. Caruaru, 2012.

FREITAS, José A. **Materiais de Construção (TC-031) - Agregados**. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Departamento de Construção Civil, Curitiba, 2013.

GOMES, Eduardo A. O. **Recuperação Estrutural De Blocos De Fundação Afetados Pela Reação Álcali-Agregado - A Experiência Do Recife**. 2008. 136 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2008.

HASPARYK, Nicole P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2005.

JESUS, Gisele I. M. **Identificação E Análise Da Reação Álcali-Agregado Segundo Metodologia De Ensaios Laboratoriais**. 2008. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2008.

KITCHENHAM, Barbara et al. **Systematic literature reviews in software engineering—a systematic literature review**. Information and software technology, v. 51, n. 1, p. 7-15, 2009.

KUPERMAN, Selmo C. et al. **A CESP e a detecção da reação álcali-agregado**. In: 26º Seminário Nacional De Grandes Barragens, 2005, Goiânia. Anais do 26º Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2005.

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

LOPES, Luciana E. **Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação a barragens de concreto**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004.

MADUREIRA, Edmilson L. et al. **Simulação numérica do comportamento mecânico de elementos de concreto armado afetados pela reação álcali-agregado**. 2007. 217 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco, 2007.

MARQUES, Maria L. **Estudo da reação álcali-agregado na Tomada d'água da UHE Jaguari por meio de ensaios laboratoriais**. 2009. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

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

_____. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. New York: McGraw-Hill, 2006.

MIZUMOTO, Camilo. **Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**. 162 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2009.

MORAVIA, Weber G. **Influência dos parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida**. 2007. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MOURA, Lais S. et al. **O papel do sedimento na qualidade da água: uma revisão dos trabalhos publicados entre 2001 e 2011**. REEC – Revista Eletrônica de

Engenharia Civil, v. 7, n. 1, 2013. Disponível em: < <http://revistas.ufg.br/index.php/reec/article/view/22776> >. Acesso em: 07 out. 2015

MUNHOZ, Flávio A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2007.

NOBREGA, Luciano O. **Modelagem hidromecânica de estruturas de concreto afetada pela reação álcali-agregado**. 2008. 97 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008.

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

OLIVEIRA, Mirian. C. B. et al. **Identificação E Caracterização De Reação Álcali-Agregado Em Ponte De Concreto**. VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo, 2006.

PETERSEN, Kai et al. **Systematic mapping studies in software engineering**. In: 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, 2008.

RIBEIRO, Daniel. V. et al. **Estudo das reações álcali-silica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento**. Revista Cerâmica, v. 58, p. 90-98, 2012.

RODRIGUES, Edmilson C. **Análise Numérica do Efeito de Fatores Influentes da reação Álcali-Agregado no Desempenho de Estruturas de Concreto**. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

ROLIM, Paulo H. B. **Reação álcali-agregado: avaliação do método químico de ensaio**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2010.

SANCHEZ, Leandro. F. M. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregados em concretos.** 170 p. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

SILVA, Cristiane M. **Estudo da potencialidade de compostos a base de silanos no combate da reação álcali-agregado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

SILVA, Domingos J. F. **Estudo dos efeitos do nitrato de lítio na expansão de argamassas sujeitas a reação álcali-sílica.** Ilha Solteira, 2007. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

SILVA, Domingos J. F. et al. **Estudo dos efeitos do LiNO_3 na reação Álcali-Sílica e comparação com os efeitos da cinza volante na reação.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, p. 310-321, 2010.

SILVA, Everton J. et al. **Estudo de reações expansivas em argamassas de cimento Portland com cinza de casca de arroz (CCA).** Holos Environment, v. 7, n.1, p. 72-86, 2007.

SILVA, Geovani A. **Recuperação de blocos de coroamento afetados pela Reação Álcali-Agregado.** Recife, Dissertação de Mestrado, Universidade Católica de Pernambuco, 2007.

SILVA, Patricia N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso / CHESF.** Influência da reação nas propriedades do concreto. 220 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

SILVEIRA, Adriana A. **Contribuição ao Estudo do Efeito da Incorporação de Cinza de Casca de Arroz em Concretos Submetidos à Reação Álcali-Agregado.** 2007.

Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SILVEIRA, Ana L. Z. P. **Estudo da reação álcali-agregado em rochas carbonáticas**. 194 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SILVEIRA, Ana L. Z. P. et al. **Avaliação Da Reação Álcali-Carbonato Por Meio De Diferentes Métodos De Investigação**. Comitê Brasileiro De Barragens - Xxvii Seminário Nacional De Grandes Barragens. 2007.

TIECHER, Francieli. **Influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo no desencadeamento da reação álcali-agregado**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2010.

_____. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. 2006. 182p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

TRINDADE, Guilherme H. **Durabilidade Do Concreto Com Cinza De Casca De Arroz Natural Sem Moagem: Mitigação Da Reação Álcali-Sílica E Penetração De Cloretos**. 2011. 198 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 2011.

TRINDADE, Guilherme H. et al. **Estudo da mitigação da reação álcali-sílica entre cimento com adições e cinza da casca do arroz natural, pelo método acelerado em argamassas**. XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010.

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

Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2002.

VASCONCELOS, Sérgio E. **Reação Álcali-Agregado no Emboque do Túnel 06– Sabesp/SP**. 2005. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil com ênfase Ambiental). Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2005.

ZAMBOTTO, Danielle. **Estudo preliminar dos efeitos da reação álcali-agregado nas respostas estruturais de pavimentos de concreto**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2014.

ZOILO, Camila S. **Estudo de deslocamentos na tomada d'água da UHE Jaguari devidos à reação álcali-agregado**. 178 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2010.

ZOLETT, Elisa R.; SOUZA, Luciene. **Estudo de viabilidade da utilização da escória de aciaria na redução da expansão causada no concreto pela reação álcali-agregado**. 2012. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012.