

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**MODELOS PREDITIVOS DE DANO APLICADOS
A ESTRUTURAS DE CONCRETO ATACADAS
POR REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA: Uma Revisão
Sistemática da Literatura**

GEOVANNE CAETANO

D0149C17
GOIÂNIA
2017

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

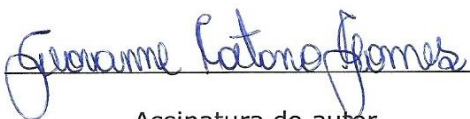
Nome completo do autor: Geovanne Caetano Gomes

Título do trabalho: MODELOS PREDITIVOS DE DANO APLICADOS A ESTRUTURAS DE CONCRETO ATACADAS POR REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA – Uma Revisão Sistemática da Literatura.

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do autor

Data: 19 / 05 / 17

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

GEOVANNE CAETANO

**MODELOS PREDITIVOS DE DANO APLICADOS A
ESTRUTURAS DE CONCRETO ATACADAS POR
REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA: Uma Revisão Sistemática
da Literatura**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Professora Doutora Helena Carasek

D0149C17
GOIÂNIA
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Caetano , Geovanne

MODELOS PREDITIVOS DE DANO APLICADOS A
ESTRUTURAS DE CONCRETO ATACADAS POR REAÇÃO ÁLCALI
SÍLICA [manuscrito] : Uma Revisão Sistemática da Literatura /
Geovanne Caetano . - 2017.

100 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Helena Carasek.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia,
2017.

Bibliografia. Anexos.

Inclui siglas, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista
de tabelas.

1. concreto. 2. durabilidade. 3. reação álcali-agregado. 4. reação
álcali-silica. 5. modelo previsão de dano. I. Carasek, Helena, orient. II.
Título.

CDU 624



PPG
GECON

Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia, Estruturas e Construção Civil



Ata de Nº 0149 da sessão de julgamento da
Dissertação do aluno Geovanne Caetano
Gomes da área de concentração Construção
Civil do PPG em Geotecnia, Estruturas e
Construção Civil.

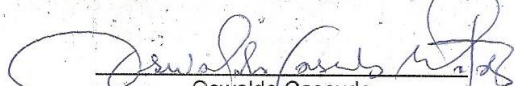
Aos 19 dias do mês de maio de 2017, às 08h30, na sala Caryocar, Bloco A, 2º Andar, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG, reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada **"Modelos Preditivos de Dano Aplicados a Estruturas de Concreto Atacadas por Reação Álcali-Silica: Uma Revisão Sistemática da Literatura"**, apresentado pelo aluno **Geovanne Caetano Gomes**, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de MESTRE, área de concentração Construção Civil. A Banca Examinadora foi Presidida pela Prof.^a Dr.^a Helena Carasek (GECON/UFG), tendo como membros o Prof. Dr. Oswaldo Cascudo (GECON/UFG) e o Prof. Dr. Marlos José Ribeiro Guimarães (FURNAS). Aberta a sessão pública, o candidato teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, o aluno foi arguido oralmente pelos membros da Banca, os quais concluíram pelos seguintes resultados:

Membro	Instituição	Função	Resultado
Helena Carasek	GECON/UFG	Presidente	<u>Aprovado</u>
Oswaldo Cascudo	GECON/UFG	Examinador Interno	<u>APROVADO</u>
Marlos José Ribeiro Guimarães	FURNAS	Examinador Externo	<u>Aprovado.</u>

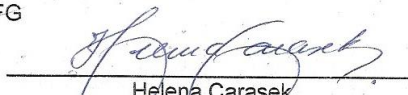
(X) Tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **aprovação** do candidato **sem restrições**.

() Não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **reprovação** do candidato, conforme as seguintes justificativas:

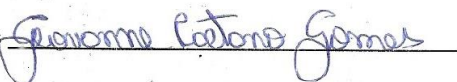
Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de pós-graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da **Banca Examinadora** e pelo **candidato**.


Oswaldo Cascudo
PPG-GECON/UFG


Marlos José Ribeiro Guimarães
FURNAS


Helena Carasek
PPG-GECON/UFG

Candidato: Geovanne Caetano Gomes



A Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Sou infinitamente grato a Deus pela oportunidade de alcançar esse título, pois somente pelo seu infinito e incondicional amor, pela força, ânimo, perseverança e fé concedidos por Ele, pude vencer cada um dos muitos desafios que se levantaram nessa caminhada.

À minha família, em especial aos meus pais, Joviano e Maria Eliane, e à minha irmã, Livia, que fizeram tudo que estava ao seu alcance para que eu pudesse completar mais essa etapa em minha vida.

À amiga, orientadora e professora Helena Carasek, por toda paciência e por acreditar em mim desde o início. Obrigado por me escolher como seu orientado, por todo o apoio e todos os ensinamentos durante esses dois anos de trabalho, e por me ajudar a crescer e a superar todas as dificuldades nesse caminho.

Aos professores do PPG-GECON com os quais tive a oportunidade de fazer disciplinas, Oswaldo Cascudo, Maria Carolina, Marcus Campos e Tatiana Amaral, que acrescentaram muito à minha vida profissional e pessoal.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da UFG, *Campus* Catalão, que foram responsáveis pela minha formação base, em especial ao professor Heber Martins de Paula pela amizade, incentivo e orientação em minha iniciação científica, pela qual pude descobrir minha aptidão para pesquisa, e ao professor Antover Panazzolo Sarmiento pela amizade e incentivo, como também pela orientação em meu Trabalho de Conclusão de Curso e em várias atividades durante minha graduação.

Aos meus colegas de mestrado com quem tive a oportunidade de realizar disciplinas e trabalhar junto, em especial aos meus amigos Flávio Araújo e Reginaldo Virgilio, pela força e incentivo durante as disciplinas e pesquisa, além do apoio em questões pessoais.

Aos meus amigos Lucas Santos e Myllena Camilo, pelas conversas, orações, acolhimento, cuidado e força; Jason Parreira pela preocupação e ajuda; Marco Emílio, Ana Carolina e família pela força, incentivo, carinho e preocupação; Philippe Barbosa pelas orações, conversas, preocupação e força; Monnike Yasmin pelas conversas e força.

Aos colegas do curso de Engenharia Civil, que se tornaram grandes amigos no decorrer do período da graduação, que mesmo estando longe, não poderia deixar de agradecê-los por tudo que fizeram em tantos momentos que tanto precisei: Paola, Lisandra, Gustavo, Luiz Augusto e Jéssica.

Às pessoas e famílias que me apoiaram durante minha trajetória de vida, que se fizeram presentes em diversos e distintos momentos, e tornaram possível chegar a esse título: Pastor Hamilton e família, Pastor Vanderli e família, Pastor Rodrigo e família, Pastor Wellington e família, Roberto e família, Sandro, Heloisa, Valdene, Maria, Saldanha, Tereza, Irene e Alcione Macedo.

À empresa Eletrobras Furnas, em especial aos engenheiros Alexandre Castro e Marlos José Guimarães pelo apoio na condução dessa pesquisa.

À CAPES pela bolsa concedida.

A todos que mesmo não mencionados neste texto sou grato, pois reconheço que contribuíram de forma significativa nessa fase da minha vida.

Muito Obrigado!

“Bem-aventurado o homem que acha
sabedoria, e o homem que adquire
conhecimento”

Provérbios 3:13

RESUMO

Dentre as várias ações deletérias que podem atacar elementos de concreto tem-se a reação álcali-agregado (RAA), a qual afeta principalmente as estruturas de barragens, pontes e fundações, sendo a reação do tipo álcali-sílica (RAS) a mais recorrente nelas. Um dos principais desafios no que tange à predição desse fenômeno é o desenvolvimento de modelos de previsão de dano específicos dessa reação, constituindo-se o tema da presente pesquisa. *A priori*, executou-se uma revisão sistemática da literatura a respeito dos modelos desenvolvidos, com a organização e classificação dos dados encontrados, apresentando-se o estado da arte de forma clara e detalhada. Em seguida, foram elencados os trabalhos publicados em periódicos indexados nos últimos cinco anos (2012-2016), executando-se a categorização dos modelos quanto à escala e natureza de análise, tipo de modelagem, e softwares necessários para executar as simulações, além da sintetização, agrupamento e análise de informações concernentes aos dados de entrada necessários para a execução de cada modelação, bem como dos resultados gerados por elas. Para os modelos que não preveem dano, isto é, modelos gerais que simulam a RAS, investigou-se sua contribuição para o melhor entendimento dos processos químico-físicos que ocorrem no concreto afetado por ela. Verificou-se, assim, que os modelos analisados são pautados em diferentes teorias e métodos de análise, demandando dados de entrada distintos e gerando dados de saída heterogêneos, os quais são discriminados minuciosamente neste trabalho.

Palavras-chave: concreto; durabilidade; reação álcali-agregado; reação álcali-sílica; modelo; previsão de dano.

ABSTRACT

Among the several deleterious actions may attack concrete elements, is the alkali-aggregate reaction (AAR), which affects, mainly, structures of dams, bridges and foundations, where the alkali-silica reaction (ASR) is the most common. One of the main challenges regarding the prediction of this phenomenon is the development of models that may predict damage specific for this reaction, which constitute the theme of this research. Firstly, a systematic literature review was conducted with respect to the models developed, with the organization and classification of the data found, presenting a clear and detailed state-of-art. Therefore, the studies published in journals in the last five years (2012-2016) were selected, in order to conduct their categorization regarding the scale and nature of the analysis, type of modeling, and the software necessary to execute the simulations, besides the summarizing, grouping and analysis of the information concerning the input data necessary to the execution of each modeling, as well as the results generated by each one of them. The models which do not predict damage, i.e. general models that simulate the ASR, were investigated to verify their contribution to a better understanding of the chemical and physical processes that occur in the concrete affect by the reaction. Finally, it was verified that the models analyzed are based on different theories and methods of analyses, demanding distinct input data and generating heterogeneous output data, which are meticulously explained in this paper.

Keywords: concrete; durability; alkali-aggregate reaction; alkali-silica reaction; model; damage prediction.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 – Estruturas de fundação afetadas pela RAA.....	15
Figura 1.2 – Fissuras causadas pela RAA investigadas por Stanton.....	16
Figura 1.3 – Principais fatores que influenciam a reação álcali-sílica	18
Figura 1.4 – Exemplo de escalas de análise dos modelos	20
Figura 1.5 – Trabalhos desenvolvidos sobre modelagem para RAA no Brasil.....	20

Capítulo 2

Fig. 1 – Representação da ocorrência da reação álcali-sílica, com formação do gel e fissuração do concreto	27
Fig. 2 – Etapas de uma revisão sistemática	30
Fig. 3 – Fluxograma seguido na aplicação dos critérios de seleção	32
Fig. 4 – Distribuição temporal das publicações sobre o tema	34
Fig. 5 – Principais dados de entrada referentes ao concreto.....	39
Fig. 6 – Principais dados de saída referentes às propriedades mecânicas do concreto	41

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 1 – Classificação dos artigos segundo natureza, escala, modelagem e linguagem computacional.....	36
Tabela 2 – Principais dados de entrada para as modelações	38
Tabela 3 – Principais resultados (dados de saída) dos modelos	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica

ACI – *American Concrete Institute* (Instituto Americano do Concreto)

BS – *Bachelor of Science* (Bacharelado)

CAPES – Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DEF – *Delayed ettringite formation* (Formação de etringita tardia)

K – Potássio

MS – *Master of Science* (Mestrado)

NBR – Normatização Brasileira

PhD – *Doctor of Philosophy* (Doutorado)

PostDoc – *Postdoctoral* (Pós-Doutorado)

PPG – GECON – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

PQ – Produtividade em Pesquisa

RAA – Reação álcali-agregado

RAC – Reação álcali-carbonato

RSL – Revisão Sistemática da Literatura

RVE – *Representative Volume Element* (elemento representativo de volume)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	15
1.1. JUSTIFICATIVA	19
1.2. OBJETIVOS	21
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	21
CAPÍTULO 2 – ARTIGO CIENTÍFICO	23
CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
3.1. CONCLUSÕES	52
3.1.1. Classificação geral dos modelos.....	52
3.1.2. Modelações preditivas de dano.....	53
3.1.3. Modelagem da reação álcali-sílica	54
3.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	54
REFERÊNCIAS	56
BIBLIOGRAFIA	65
ANEXOS	70

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil atualmente. Desde seu surgimento, obras das mais diferentes magnitudes e geometrias têm sido construídas graças às suas características. Por ser um material com grande disponibilidade e versatilidade, tem se tornado possível a construção de estruturas cada vez mais ousadas, tanto do ponto de vista arquitetônico quanto do tecnológico.

Independentemente do quão bom seja um determinado material, de sua aplicação ou características, todos têm uma vida útil, isto é, período no qual estes exercerão seu papel sem prejuízo à estrutura na qual estejam aplicados. Dentre os processos químicos deletérios que o concreto pode sofrer, pode-se citar a lixiviação, o ataque por sulfatos, a formação de etringita tardia (DEF), a reação álcali-agregado (RAA), entre outras.

A reação álcali-agregado está presente em várias construções de diversos países, incluindo-se o Brasil. Para sua ocorrência é necessário que o agregado usado na composição do concreto seja reativo, que se tenha um alto teor de álcalis na pasta de cimento e que a estrutura esteja em ambiente com alta umidade. As estruturas mais afetadas são as barragens, pontes e fundações, pois nestas é mais propensa a combinação desses fatores que dão início à reação. Uma vez iniciada, a RAA acarreta problemas tanto em nível estrutural como operacional, fazendo com que ocorra expansão da estrutura com consequente fissuração, o que leva à perda de estanqueidade, propiciando, por conseguinte, a ação de outros processos deletérios. Estão ilustrados na Figura 1.1 exemplos de estruturas de fundação afetadas pela RAA.

Figura 1.1 – Estruturas de fundação afetadas pela RAA (FIGUERÔA; ANDRADE, 2007)



Os primeiros relatos de reação álcali-agregado (RAA) foram registrados há mais de 75 anos. Stanton¹ (1940 *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2006) afirma que os primeiros casos dessa reação em estruturas de concreto foram registrados no estado da Califórnia (EUA), as quais apresentavam altos níveis de expansões e fissuras. Essa reação foi definida então como uma ação patológica decorrente dos constituintes do concreto e passou a ser alvo de estudo. Na Figura 1.2 são apresentados exemplos de estruturas investigadas por Stanton.

Figura 1.2 – Fissuras causadas pela RAA investigadas por Stanton (MEHTA; MONTEIRO, 2006)



A reação álcali-agregado (RAA) ocorre, e somente se, houver a ocorrência concomitante de três fatores: agregado utilizado na composição do concreto possuir minerais que sejam reativos, quantidade de álcalis suficientemente alta na pasta de cimento e umidade suficientemente alta para propiciar a reação.

Com base em diversos estudos e pesquisas realizadas, o fato da reação ser propiciada somente quando da combinação desses três fatores é um consenso no mundo científico (SILVEIRA, 1997; CAPRA; BOURNAZEL, 1998; PAPPALARDO; PAULETTI; PIMENTA, 1999; FARAGE; FAIRBAIRN; ALVES, 2000; MEHTA; MONTEIRO, 2006; HASPARYK, 2011; CARLES-GIBERGUES; HORNAIN, 2014).

Ela pode ocorrer como reação álcali-carbonato (RAC) ou reação álcali-sílica (RAS), sendo esta última mais comum devido à maior ocorrência de agregados contendo minerais de sílica reativa, e também por causar grande deterioração às estruturas de concreto (OWSIAK; ZAPALA-SLAWETA; CZAPIK, 2015).

¹ STANTON, T. E. Expansion of Concrete Through Reaction between Cement and Aggregate. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 66, pp. 1781-1811, 1940.

Relativo à normalização brasileira, a NBR 15577 (ABNT, 2008) classifica a RAA conforme o tipo e mineralogia do agregado reativo:

- a) **reação álcali-sílica (RAS):** é um tipo de RAA em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo. Constituem exemplos de sílica reativa: opala, tridimita, cristobalita, vidro vulcânico, entre outros;
- b) **reação álcali-silicato:** é um tipo específico de RAS em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas. Os silicatos reativos comuns são o quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos presentes em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos, entre outros;
- c) **reação álcali-carbonato (RAC):** é um tipo de RAA em que participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos. A forma mais conhecida de deterioração do concreto é devida à deslomitização da rocha e, consequente, enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Não há formação de gel expansivo, mas de compostos cristalizados como a brucita, carbonatos alcalinos, carbonato cálcico e silicato magnésiano.

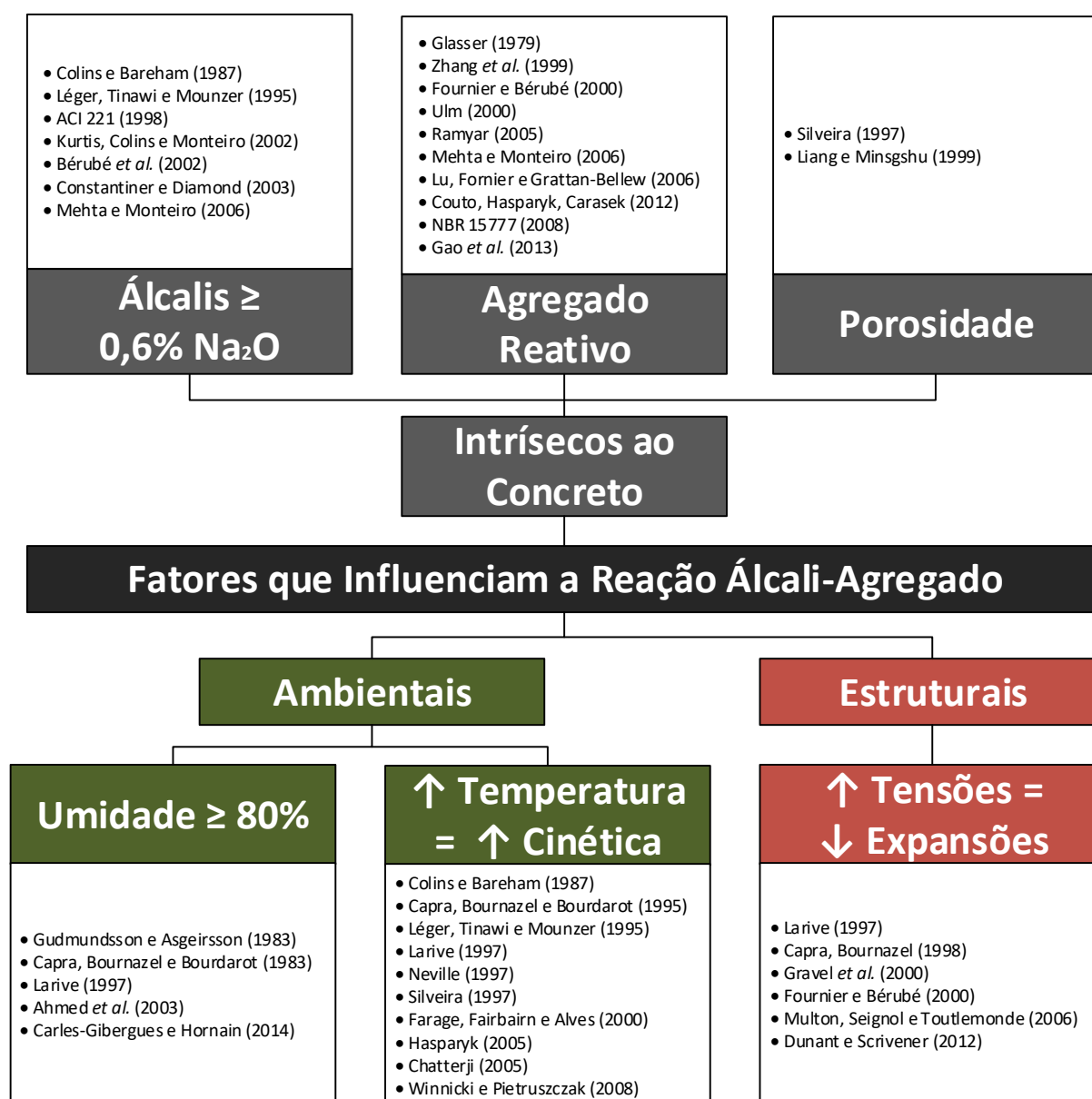
Conforme Hasparyk (2011), as reações do tipo álcali-sílica (RAS) é o tipo de reação mais comum relatada no meio técnico, sendo seu processo e mecanismos envolvidos já bastante discutidos e estudados. Hasparyk, Monteiro e Carasek (2000) salientam que uma alternativa para prevenir ou minimizar os efeitos da RAS é o uso de materiais pozolânicos como, por exemplo, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz.

Quanto ao mecanismo da RAS, de modo geral ocorre a reação de minerais contidos no agregado, sílica reativa, com a solução do poro do concreto que é rica em hidroxila e hidróxidos de sódio e potássio. A partir de então, ocorre a formação de um gel sílico-alcalino que se expande na presença de água, ocupando inicialmente os poros do concreto e a região periférica ao agregado; posteriormente, não havendo mais espaço vazio, causa tensões de tração que fissuram o concreto.

Independentemente do tipo, uma vez iniciada a RAA, tem-se como resultado a formação de produtos que na presença de umidade podem expandir, gerando fissurações e deslocamentos, sendo capazes de comprometer as estruturas de concreto (HASPARYK, 2005).

Salienta-se, todavia, que outros fatores também podem influenciar tanto na amplitude, como na cinética da reação. Tem-se como exemplo a temperatura, a porosidade, as tensões confinantes e a presença de armadura no concreto. Ademais, não podem ser desconsideradas as atuações conjuntas de outras reações químicas como o ataque por sulfatos produzido por sulfetos (HASPARYK *et al.*, 2016) ou resultante da formação de etringita tardia – DEF (THOMAS *et al.*, 2008). São exemplificados na Figura 1.3 os principais fatores que influenciam a RAA, bem como alguns autores que discutem essa influência.

Figura 1.3 – Principais fatores que influenciam a reação álcali-silica



1.1. JUSTIFICATIVA

A deterioração do concreto resultante da reação álcali-agregado (RAA) tem causado grandes transtornos na construção civil. Segundo Mehta e Monteiro (2006), esse fenômeno tem provocado a degradação de diversas estruturas de concreto, comprometendo *a priori* a resistência e elasticidade do material, e *a posteriori*, sua durabilidade. Tal fato tem levado à desativação de barragens, pontes e estruturas marinhas, acarretando um grande prejuízo econômico e de desenvolvimento das regiões afetadas.

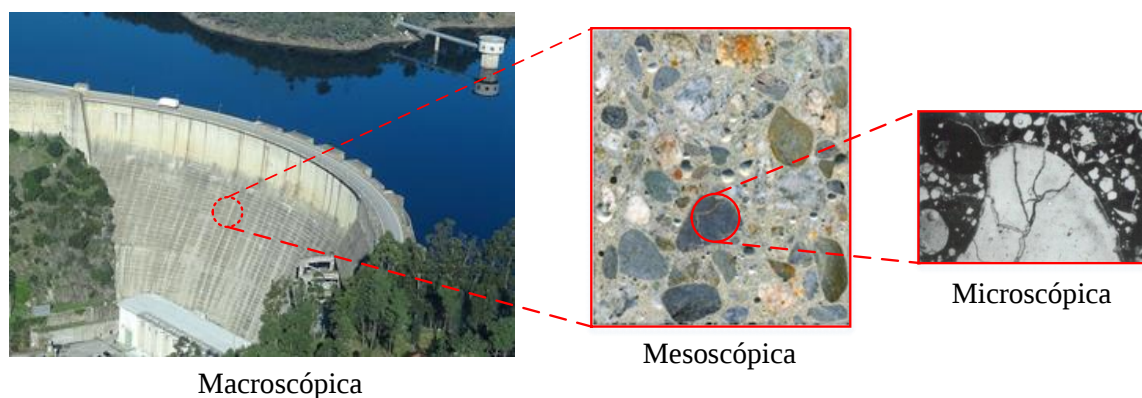
Uma vez iniciada a RAA, o gasto com ações mitigadoras é muito superior ao gasto com ações preventivas, caracterizando a prevenção como a forma mais eficiente no combate a esse fenômeno patológico. Para tanto, é recomendável que se faça um estudo prévio do agregado que será usado no preparo do concreto, que se tenha um controle rigoroso do teor de álcalis na mistura e que se faça um estudo para uso de adições minerais que serão benéficas ao material no que tange a reação estudada. No que se refere às ações mitigadoras, existem várias técnicas que podem ser aplicadas como, por exemplo, a aplicação de sais de lítio (CÂNDIDO *et al.*, 2012) e de compostos a base de silanos (SILVA, 2009).

Como ferramenta para o melhor entendimento da propagação dos efeitos patológicos advindos da RAA, e escolha do melhor tratamento para ela, alguns modelos de previsão de vida útil têm sido desenvolvidos especificamente para esse tipo de fenômeno. A modelagem tem sido aplicada para os vários mecanismos de deterioração do concreto, contudo no que tange à RAA ainda se mostra bastante tímida. Modelos referentes a outros fenômenos patológicos também têm sido desenvolvidos como, por exemplo, o ataque por sulfatos produzidos por sulfetos nos agregados (OLIVEIRA; CAVALARO; AGUADO, 2013); todavia os mais consolidados são para deterioração associada à corrosão das armaduras, principalmente por carbonatação (ANDRADE, 2001; CARMONA, 2005; POSSAN, 2010; CASCUDO; CARASEK, 2011).

Tem-se, por fim, que um grande desafio referente à previsão de vida útil de estruturas de concreto afetadas pela RAA é a análise de modelos específicos para ela. Estes modelos simulam a reação a partir de várias considerações referentes ao proporcionamento e materiais usados na confecção do concreto, das condições que o elemento foi construído e se encontra, tendo como principal resultado a degradação de suas propriedades mecânicas. Tal simulação pode ser desenvolvida em várias escalas como demonstrado na Figura 1.4, e é de suma

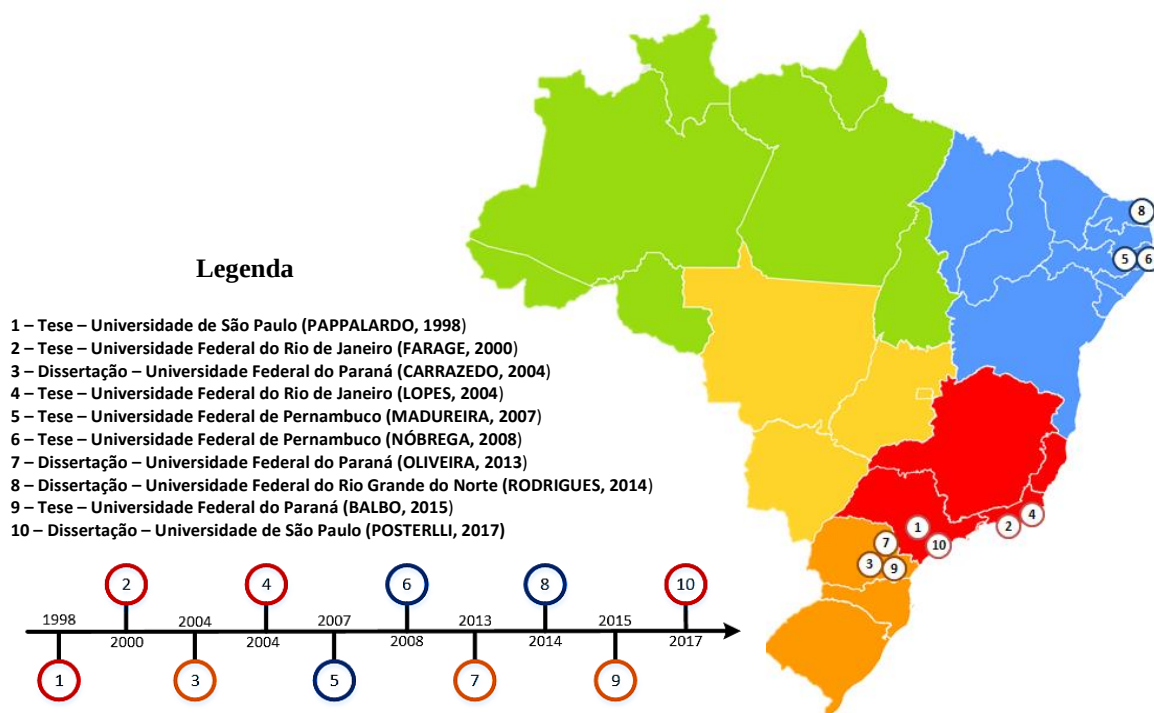
importância para a escolha de quais ações paliativas utilizar e o momento ideal para aplicá-las, tendo em vista a recuperação da estrutura e prolongamento de sua vida útil.

Figura 1.4 – Exemplo de escalas de análise dos modelos



Dentro do contexto brasileiro, a temática ainda é pouco explorada, tendo sido desenvolvidos um número ainda pouco expressivo de teses e dissertações, sendo que os 10 principais trabalhos estão ilustrados na Figura 1.5. Devido à carência de estudos mais aprofundados a esse respeito, a presente pesquisa é proposta.

Figura 1.5 – Trabalhos desenvolvidos sobre modelagem numérica para RAA no Brasil



1.2. OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo geral realizar uma revisão sistemática da literatura sobre modelos de previsão de dano para estruturas de concreto afetadas por reação álcali-sílica, verificando de forma detalhada o estado da arte da temática.

Os objetivos específicos, com base na sistematização dos dados das pesquisas publicadas em periódicos indexados nos últimos cinco anos (2012-2016), são:

- classificar os modelos quanto à previsão de dano e modelação geral da reação;
- categorizar os modelos preditivos de dano quanto à escala (micro, meso ou macroscópica) e natureza de análise, tipo de modelagem e softwares necessários para executar as simulações;
- sintetizar, agrupar e analisar informações concernentes aos dados de entrada necessários para a execução de cada modelação de dano, bem como dos resultados gerados por cada uma delas; analisar a contribuição dos modelos gerais da RAS para o melhor entendimento dos processos químico-físicos que ocorrem no concreto afetado por ela.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente capítulo apresenta uma introdução ao tema da dissertação, com um breve comentário sobre o uso do concreto e de possíveis ações deletérias que causam sua deterioração; a seguir o mecanismo da RAA é explicado detalhadamente, com posterior justificativa que motivou esta pesquisa; ao fim da seção são apresentados os objetivos e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 tem-se o produto final da pesquisa desenvolvida, o qual se configura nesse caso, como um artigo científico a ser submetido para um periódico de alto impacto na área de conhecimento. Essa nova forma de apresentação final foi aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, e vem sendo implantada em várias defesas de mestrado. Salienta-se que a fim de apresentar o artigo o mais próximo possível da versão final, sua formatação e seções foram feitas conforme exigências do periódico ao qual será submetido.

O terceiro capítulo trata das considerações finais do trabalho, trazendo como tópicos as conclusões do trabalho, apresentadas de forma mais detalhada do que no artigo e as sugestões para futuras pesquisas no tema.

Por fim, são apresentadas todas as referências utilizadas para o desenvolvimento desta dissertação, além da bibliografia consultada.

CAPÍTULO 2 – ARTIGO CIENTÍFICO

Neste capítulo será apresentado o artigo científico produzido como resultado da pesquisa realizada. Esse trabalho será submetido ao periódico *ACI Materials Journal do American Concrete Institute*, sendo que seu desenvolvimento, tópicos, quantidade de palavras e formatação em geral estão de acordo com exigências da revista, tendo sido empregado o *template* disponibilizado por ela.

MODELS FOR ALKALI-SILICA REACTION: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Geovanne Caetano¹, Helena Carasek² and Oswaldo Cascudo³

^{1,2,3} PPG-GECON - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 74605-220, Brazil

Geovanne Caetano is a Professor at Instituto Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brazil. He received his BS in civil engineering from Universidade Federal de Goiás – UFG, Catalão, GO, Brazil, in 2014; his MS from UFG, Goiânia, GO, Brazil, in 2017. His research interests include concrete durability and development of new sustainable materials.

Helena Carasek is a Professor at Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brazil. She received her B.Eng. from UNISINOS, RS, Brazil, in 1987; her MS from UFRGS, RS, Brazil in 1990; her PhD in civil engineering from USP, SP, Brazil, in 1996. She made postdoctoral research at Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse – INSA, France, in 2003-2004. Her research interests include microstructure and durability of concrete and mortar.

Oswaldo Cascudo is a Professor at Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brazil. He received his B.Eng from UFPB, PB, Brazil, in 1987; his MS and PhD from USP, SP, Brazil, in 1991 and 2000, respectively. He made postdoctoral research at Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse – INSA, France, in 2003-2004. His research interests include technology and durability of concrete, reinforcement corrosion and science of construction materials.

RESUMO

Dentre as várias ações deletérias que podem atacar elementos de concreto tem-se a reação álcali-agregado (RAA), a qual afeta principalmente as estruturas de barragens, pontes e fundações, sendo a reação do tipo álcali-sílica (RAS) a mais recorrente nelas. Um dos

principais desafios no que tange à predição desse fenômeno é o desenvolvimento de modelos de previsão de dano específicos dessa reação. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão sistemática da literatura a respeito dos modelos desenvolvidos para RAS, expondo um detalhado estado da arte das pesquisas realizadas ao longo dos anos nessa temática. Visa também a sistematização dos dados das pesquisas publicadas em periódicos indexados nos últimos cinco anos (2012-2016). Como principais conclusões, verificou-se que os modelos existentes são pautados em diferentes teorias e métodos de análise, demandando dados de entrada distintos e gerando dados de saída heterogêneos, os quais são discriminados minuciosamente neste trabalho.

Keywords: concreto; durabilidade; reação álcali-agregado; reação álcali-sílica; modelos; previsão de dano.

INTRODUÇÃO

Os primeiros relatos de reação álcali-agregado (RAA) foram registrados há mais de 75 anos, quando Stanton, em 1940, verificou casos dessa reação em estruturas de concreto no estado da Califórnia (EUA), as quais apresentavam altos níveis de expansão e fissuração. Essa reação foi definida, então, como uma manifestação patológica decorrente dos constituintes intrínsecos ao concreto e passou a ser alvo de estudo.¹⁻³

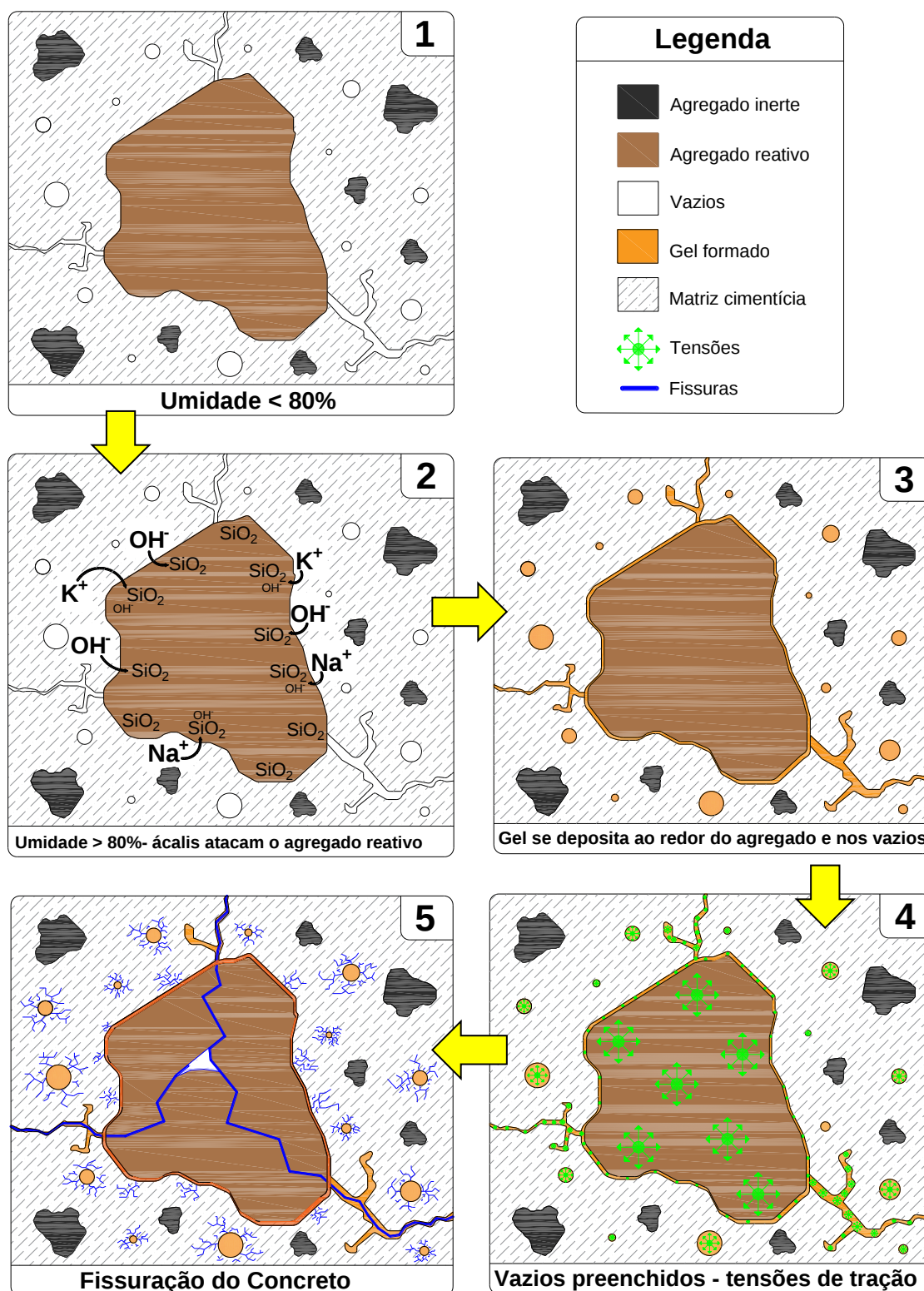
A RAA ocorre pela reação de minerais contidos no agregado com a solução intersticial dos poros do concreto, a qual é rica em íons sódio e potássio. Ela pode ocorrer como reação álcali-carbonato (RAC), reação álcali-silicato ou reação álcali-sílica (RAS), sendo esta última a mais comum devido à maior ocorrência de agregados contendo minerais de sílica reativa. Como resultado, todas causam grande deterioração às estruturas de concreto.

Para a ocorrência da RAS é necessário que o agregado usado na composição do concreto seja reativo, isto é, constituído por sílica amorfa, mal cristalizada ou microcristalina, que se tenha

um alto teor de álcalis na pasta de cimento ($> 0,6\%$ Na_2O equivalente) e que a estrutura esteja em ambiente com alta umidade ($> 80\%$), sendo que estes três fatores devem ocorrer simultaneamente. Inicialmente, a água transporta os íons alcalinos e as hidroxilas presentes na solução do poro até a superfície do agregado, onde ocorre o ataque à sílica reativa, propiciando a formação de um gel sílico-alcalino, se contiver Si, Na^+ e/ou K^+ , ou cálcio-sílico-alcalino, se contiver além desses elementos, a presença do Ca. Independentemente do tipo de gel formado, ele se expande na presença de água. Apesar de não existir ainda consenso sobre a origem do caráter expansivo dessa reação, pois são várias as teorias propostas para tal (teorias da pressão osmótica, da dissipação do gel, da dupla camada elétrica, do inchamento de corpos porosos, dentre outras),⁴ os pesquisadores concordam que a reação pode gerar altas taxas de expansão, as quais podem ser correlacionadas com a composição do gel formado.⁵ O mecanismo da RAS é ilustrado pela **Fig. 1**.

O gel da RAS é inicialmente depositado na região porosa do concreto e ao redor do agregado; não havendo mais espaço vazio para sua acomodação, surgem tensões de tração que rompem a estrutura do elemento, gerando fissuras. Tais fissuras fazem com que o concreto fique propício a outras ações deletérias, além de comprometerem as suas propriedades mecânicas.

As estruturas mais afetadas são as barragens, pontes e fundações, pois nelas é mais propensa a combinação dos fatores que dão início à reação. O colapso de qualquer dessas estruturas geraria consequências catastróficas, tanto do ponto de vista humano, quanto ambiental e financeiro. Embora não haja conhecimento de nenhuma estrutura que veio a colapso devido à RAS, existem casos de algumas que tiveram que ser demolidas e substituídas, pois sua segurança foi severamente comprometida pela reação, como é o caso do viaduto de Charrest no Canadá, e da barragem do Alto Ceira em Portugal.⁶



- 1 Fig. 1–Representação da ocorrência da reação álcali-sílica, com formação do gel e
- 2 fissuração do concreto.
- 3 Devido à relevância e magnitude das estruturas afetadas pela reação, é de imprescindível
- 4 importância aplicar ações preventivas para que esta não ocorra. No entanto, caso a RAA se

desenvolva, é necessário verificar a vida útil da estrutura atacada, a qual pode ser feita a partir de modelos de previsão de dano. Esses modelos simulam a reação a partir de várias considerações referentes ao proporcionamento e materiais utilizados no preparo do concreto, bem como das condições nas quais o elemento foi construído e se encontra; e têm como principal resultado a degradação das propriedades mecânicas do concreto atacado. Tal simulação é de suma importância para a escolha de quais ações paliativas utilizar, além do momento ideal para aplicá-las, tendo em vista a recuperação da estrutura e prolongamento de sua vida útil.

Vários são os modelos propostos para a simulação da RAA e, portanto, uma revisão bibliográfica detalhada do tema é de fundamental importância para o avanço das pesquisas; nesse contexto, surge uma poderosa ferramenta, a Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Esse tipo de revisão tem seus primórdios na área da Medicina, figurando Archie Cochrane como o pioneiro no seu emprego. Baseado em seus estudos, foi criada a “The Cochrane Collaboration” em 1993, a qual integra uma grande gama de pesquisadores e profissionais de diferentes partes do mundo.⁷ Logo após sua criação, foi lançado o primeiro guia sobre revisão sistemática, o “Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions” em 1994, o qual vem sendo atualizado desde então.⁸

Devido a seu rigor metodológico e caráter inovador, desde a criação da revisão sistemática da literatura, várias áreas do conhecimento vêm incorporando suas diretrizes para o desenvolvimento de suas revisões, chegando-se a publicações variadas que utilizam essa abordagem, principalmente nos últimos 5 anos.⁹⁻¹¹ Nesse sentido, o presente trabalho objetiva realizar uma revisão sistemática da literatura com respeito aos modelos de previsão de dano para estruturas de concreto afetadas por reação álcali-silica, produzindo, além da síntese e análise dos dados, a sistematização dos modelos estudados.

SIGNIFICÂNCIA DA PESQUISA

Existem vários modelos de previsão de dano para estruturas de concreto atacadas por reação álcali-sílica, no entanto, esses modelos, muitas vezes, não são descritos na literatura de forma clara no sentido de agrupá-los em torno de características comuns. Diante disso, a principal contribuição dessa pesquisa é a revisão sistemática da literatura em relação ao tema, com a organização e classificação dos dados encontrados. A segunda principal contribuição é a sistematização dos dados concernentes aos modelos analisados. O estudo sistemático da literatura é inédito no tema abordado e, portanto, o seu resultado é de grande utilidade para a continuidade das pesquisas sobre a RAA.

METODOLOGIA

Para condução da presente pesquisa, empregou-se a ferramenta de RSL, a qual propõe uma série de passos, desde a definição da necessidade da revisão sistemática até a disseminação dos resultados encontrados, conforme ilustrado na **Fig. 2**.

Planejamento

Verificou-se inicialmente que não havia uma publicação que trata de forma abrangente e completa do estado da arte sobre modelagem da reação álcali-sílica, sendo encontrado somente o trabalho de Pan *et al.*¹⁴ que aborda uma revisão narrativa tradicional.

O tema definido para a busca foi com respeito aos modelos que preveem a degradação das propriedades mecânicas do concreto atacado por reação álcali-agregado, especificamente a reação álcali-sílica. Com essa definição, tornou-se possível estipular as palavras chave utilizadas na varredura das bases de dados.

Para se chegar à busca mais refinada possível, ponderou-se em relação às *strings* de busca e suas combinações. Algumas tentativas foram realizadas e foi verificado que as que mais se adequaram à pesquisa proposta foram:

(1) *Model* AND (alkali-aggregate reaction OR AAR);*

(2) *Model* AND (alkali-silica reaction OR RAS) AND Concrete.*

As bases de dados selecionadas foram Scopus, Web of Science, Engineering Village e Science Direct, por se tratarem de bases consolidadas na área da pesquisa, como também por possuírem um critério de busca avançado.

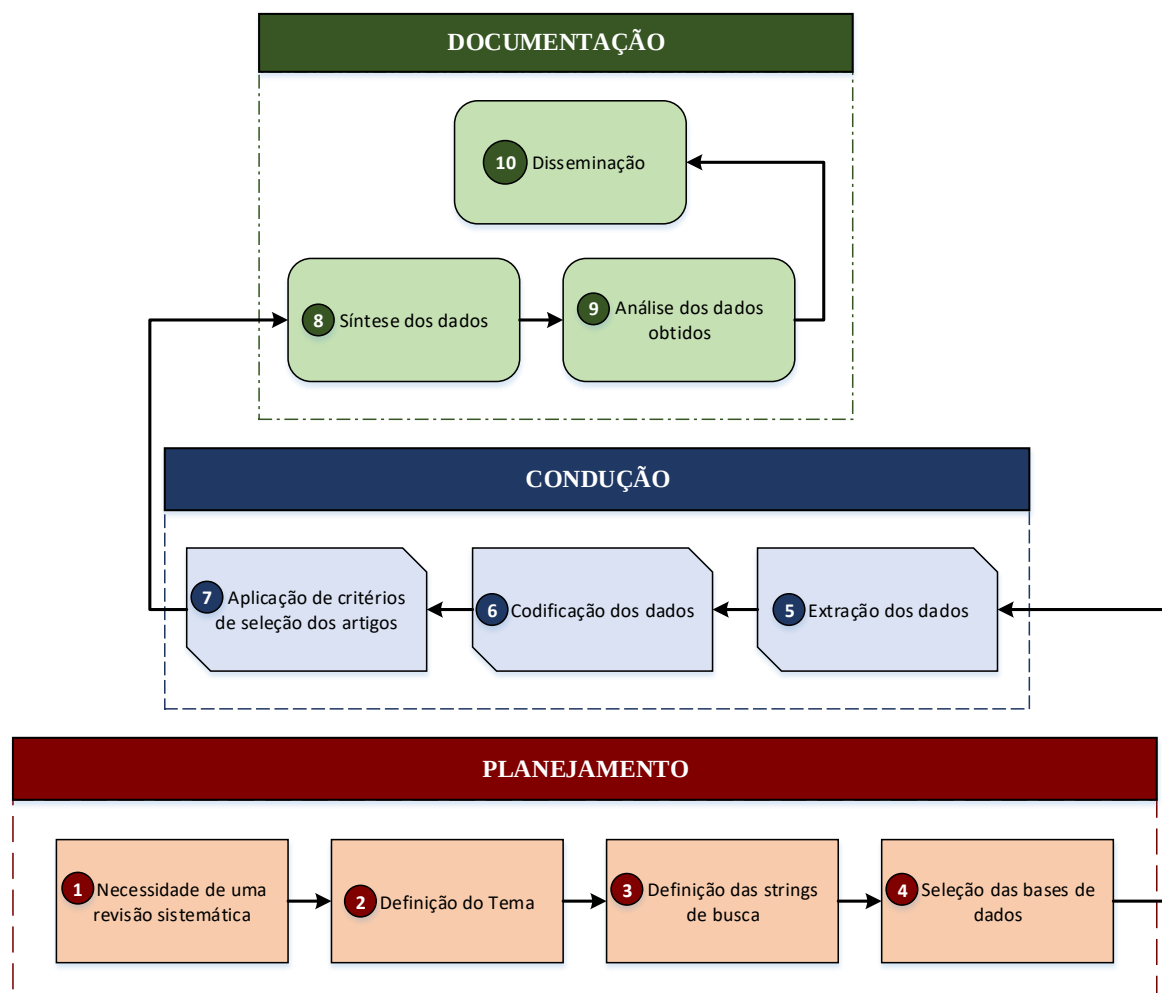


Fig. 2–Etapas de uma Revisão Sistemática da Literatura - Adaptado de Unterkalmsteiner et al.¹² e Vilela et al.¹³

Condução

Em setembro de 2016, aplicou-se a *string* de busca (1), sendo encontrados 22 artigos na base Engineering Village, 19 na Scopus, 37 na Web of Science e 875 na Science Direct, obtendo-se um total de 954 artigos. Conduziu-se a mesma busca com a *string* (2), obtendo-se o número

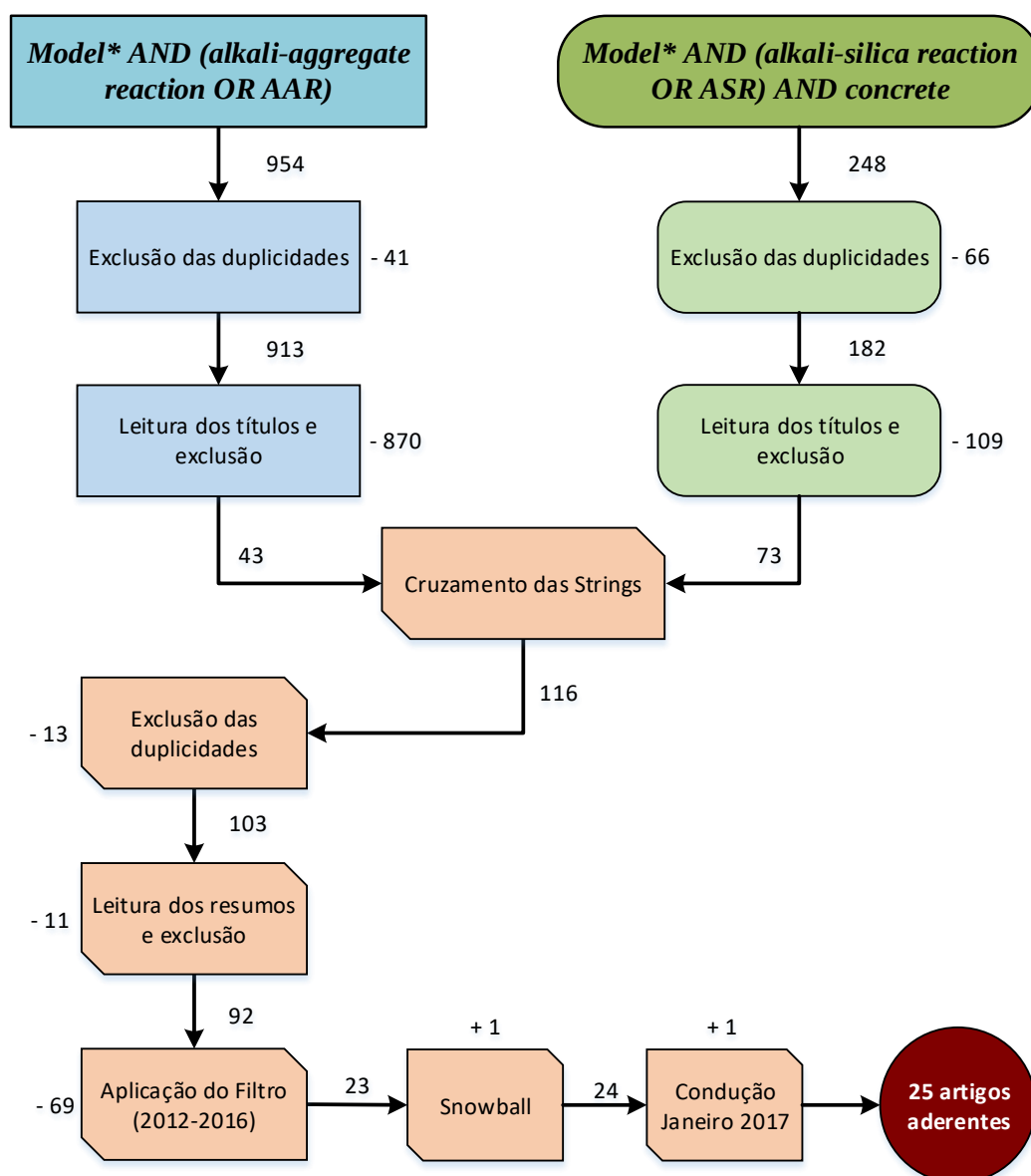
de 248 artigos ao total, sendo encontrados 59, 26, 28 e 135 artigos, distribuídos nas bases *Engineering Village*, *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*, respectivamente.

Por conseguinte, foram extraídos dados referentes ao título, autores, ano de publicação, fonte e resumo de cada artigo, inserindo-os em uma planilha eletrônica para condução de sua posterior análise.

Para codificação dos dados, fez-se sua organização de forma a apresentarem os autores, título, fonte, volume, fascículo, páginas, ano, cidade e país da publicação, dentro da planilha eletrônica onde foram inicialmente inseridos. Essa etapa permitiu, então, a aplicação de critérios para seleção dos artigos aderentes à pesquisa.

Com o intuito de se chegar aos artigos para análise, estabeleceu-se critérios para refinamento da busca, excluindo-se inicialmente os artigos com duplicidade entre as bases de dados para cada *string*; posteriormente, fez-se a leitura de seus títulos, excluindo-se outro número significativo de artigos. A partir daí os resultados das *strings* foram cruzados, excluíram-se as duplicidades e analisaram-se os resumos dos artigos restantes, resultando na exclusão de mais alguns. Por fim, estabeleceu-se como filtro os últimos 5 anos (2012-2016) de artigos publicados em periódicos, devido ao número expressivo de publicações nesse período e por se compreender que, nos últimos anos, houve um aprofundamento no entendimento do mecanismo da reação e também da modelagem numérica. Após a aplicação do filtro foram encontrados 29 artigos, sendo que destes, somente 23 estavam disponíveis para análise; verificando-se suas referências bibliográficas, método *snowball*, chegou-se ao número de 11 artigos adicionados manualmente ao total inicial da busca, isto é, aos 92 artigos encontrados antes da aplicação do filtro, totalizando 103 artigos passíveis de análise, sendo apenas um desses pertencente ao filtro aplicado, ou seja, pertencente ao período entre 2012 e 2016. Dessa forma, foram selecionados 24 artigos para estudo. A **Fig. 3** ilustra o processo de aplicação dos critérios de seleção.

1 Salienta-se que todo o processo de condução foi executado novamente em Janeiro de 2017,
 2 restringindo a busca para os anos de 2016 e 2017 visando verificar se houve alguma
 3 publicação posterior à data da primeira busca, sendo encontrado mais 1 artigo aderente à
 4 pesquisa. Assim, resultou um total de 25 artigos para análise detalhada.



5

6 *Fig. 3–Fluxograma seguido na aplicação dos critérios de seleção.*

7 **Documentação**

8 Encontrou-se um total de 104 artigos na varredura da literatura, os quais foram organizados
 9 na planilha eletrônica para sua síntese. Essa etapa permitiu ter uma visão abrangente a
 10 respeito da distribuição temporal das publicações, dos veículos de publicação (periódicos ou

congressos), dos principais pesquisadores, dentre uma série de outras considerações, as quais são discutidas na seção de resultados.

Posteriormente à síntese, tem-se a etapa de análise dos artigos. Nessa fase foram analisados de modo detalhado os 25 artigos selecionados, e as informações dos modelos neles propostos foram organizadas e sistematizadas, de forma a se permitir a ponderação a respeito dos tipos de modelagem, escalas de análise, dados de entrada, dados de saída, dentre outras. Essa sistematização permite que o leitor tenha uma visão aprofundada e crítica do que vem sendo estudado e proposto nos últimos anos.

Por fim, propõe-se a disseminação dessa revisão sistemática da literatura em um periódico de alto impacto na área estudada, permitindo aos demais pesquisadores do tema o acesso às análises feitas. A última etapa do processo se finda com a publicação do presente artigo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da organização e síntese dos dados obtidos nas etapas de planejamento e condução, é possível tecer várias considerações que evidenciam a distribuição das publicações existentes a respeito da modelagem da reação álcali-sílica e suas implicações nas propriedades do concreto atacado. Como primeira análise, a distribuição de publicações ao longo dos anos está apresentada na **Fig. 4**.

Pela análise da **Fig. 4** é possível perceber que os primórdios dos estudos sobre modelagem da RAA se deu no início dos anos 1980, tendo sua continuidade somente nos anos 1990, podendo-se relacionar essa constatação com o fato do entendimento da reação ainda ser incipiente em comparação com os próximos anos de pesquisa sobre o tema, e principalmente com o desenvolvimento dos computadores, aprimoramento do método de elementos finitos e sua implementação em *software*. Houve então, um aumento significativo de estudos em 1992 e 1995, com um posterior decréscimo e linearidade até o início dos anos 2000. A posteriori, ocorreu novamente um aumento no número de publicações, chegando-se a seu ápice no

1 quadriênio de 2012 a 2015, atingindo-se o número total de 104 pesquisas ao longo dos anos.
 2 Verifica-se assim que o tema tem sido objeto de estudo há mais de 3 décadas, com oscilações
 3 do número de publicações no decorrer deste período, sendo que a maioria dos artigos foram
 4 publicados nos últimos 5 anos, se tratando, assim, de uma temática atual e passível de
 5 considerações.

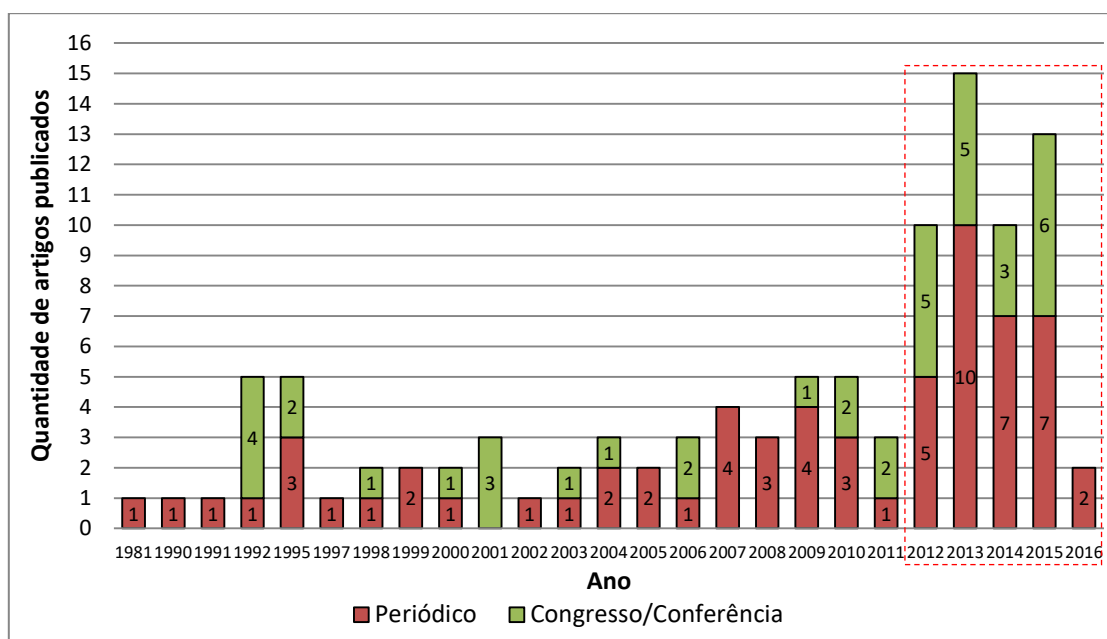


Fig. 4–Distribuição temporal das publicações sobre o tema.

8 As publicações estão distribuídas de forma aleatória em diversos periódicos de diferentes
 9 países, tendo seu conhecimento compartilhado em várias partes do mundo. Devido à maior
 10 acessibilidade, difusividade e padrão rigoroso de avaliação, os periódicos, os quais somam o
 11 número de 64 trabalhos,¹⁴⁻⁷⁸ foram selecionados como objeto de estudo desta pesquisa.
 12 Partindo-se para a análise dos artigos aderentes à pesquisa, dos quais 25 se encontraram
 13 disponíveis, compreendidos entre os anos de 2012 e 2016, após a leitura completa de cada
 14 um, verificou-se que o trabalho de Pan *et al.*¹⁴ não se encaixa na pesquisa por se tratar de uma
 15 revisão narrativa de artigos publicados até a data, sem dados suficientes para a análise
 16 proposta; a pesquisa de Islam¹⁵ foi retirada pois não se aplica diretamente a estruturas de
 17 concreto, tendo seu enfoque no ensaio com barras de argamassa, e não se propõe um modelo

para a reação estudada; Huang et al.¹⁶ foi excluída por não tratar de um modelo para deterioração do concreto mediante a RAS, mas especificamente da interação entre o aço e o concreto durante o fenômeno; o trabalho de Karthik *et al.*¹⁷ também foi retirado da análise detalhada por se tratar de uma modelagem da ação concomitante da RAS com a formação de etringita tardia (DEF), fugindo do escopo da análise proposta. Por fim, chegou-se, então, ao número de 21 artigos para sistematização.

Artigos Sistematizados

Com a leitura dos trabalhos aderentes, percebeu-se que dos 21 artigos selecionados, apenas 16 tratam da simulação da reação e seu impacto nas propriedades do concreto. Os 5 artigos restantes também simulam a reação, mas trazem como resposta a correlação entre constituintes do concreto e a formação do gel, influência da pressão, potencial reativo de agregados, dentre outros; por esta razão, esses artigos são discutidos separadamente.

Após sistematização dos modelos preditivos de dano, verificou-se que, em sua maioria, a natureza e escala de análise nem sempre estão expostas de forma clara, sendo necessário fazer a compilação de suas afirmações e um estudo mais profundo para classificá-los quanto a estes aspectos. Salienta-se que em alguns modelos também não está evidente o tipo de modelagem utilizada, tendo sido necessária uma investigação mais complexa para sua categorização; nem todos os modelos mencionaram se utilizaram e quais foram os softwares usados em seu desenvolvimento. Após o estudo detalhado dos trabalhos publicados foi, então, gerada a **Tabela 1** visando o agrupamento dessas informações.

Pela análise da **Tabela 1** é notório que a maioria dos estudos desenvolveram uma modelagem químico-mecânica, a qual, de forma geral, verifica o desenvolvimento da reação e a resposta do concreto quanto a este acontecimento, considerando, todavia, as particularidades de cada modelagem. Para tanto, grande parte dos modelos utilizaram software de elementos finitos em suas formulações.

1 **Tabela 1 – Classificação dos artigos segundo natureza, escala, modelagem e linguagem**
 2 **computacional**

Natureza	Escala	Ref	Modelagem	Software/ Linguagem / Técnica Numérica
Numérica	Micro	21	Modelagem químico-mecânica	Software de computação numérica e científica – FORTRAN
		29	Modelagem químico-mecânica	(1) Software de análise de deterioração através do código de transferência de Calor (CDAP); (2) Software de Programação Matemática (Código C++) - SIMSAR (3) Código MERLIN
		33	Modelagem mecânica	Software de Elementos Finitos
	Meso	19	Modelagem discreta de partículas em rede (LDPM)	Não informado
		20	Modelagem de dano químico	Software de Programação Matemática e Gráfica com base Matricial - MATLAB
		22	Modelagem elastoplástica de dano	Não informado
		24	Modelagem mecânica	Software de Elementos Finitos
		25	Modelagem química e de dano	Software de Elementos Finitos
		26	Modelagem químico-mecânica	Software de Elementos Finitos - FORTRAN
		27	Modelagem discreta de partículas em rede (LDPM)	Software de análise dinâmica de estruturas - MARS code
		30	Modelagem mecânica	Software de Elementos Finitos – código de fluido de partícula (PFC2D)
	Macro	23	Modelagem químico-mecânica	Software de Elementos Finitos – CESAR-LCPC Subprogramas: RGIB e TCNL
		28	Modelagem mecânica	Software de Elementos Finitos
		31	Modelagem químico-mecânica	Software de Elementos Finitos - Código comercial Abaqus em subrotinas FORTRAN
		32	Modelagem químico-mecânica	Software de Elementos Finitos
Analítica	Micro e Macro	18	Modelagem micromecânica baseada em pressão	Não informado

3 Quanto à natureza de análise, os modelos foram classificados como analíticos ou numéricos.

4 O primeiro grupo tem como vantagem a simplicidade e boa representatividade global dos
 5 fenômenos, porém não é capaz de efetuar operações matemáticas mais complexas e
 6 representar de modo mais detalhado as reações. Os modelos numéricos propõem-se a
 7 descrever detalhadamente a física e a química dos fenômenos, levando em conta,
 8 principalmente, os mecanismos de transporte em meio poroso não saturado, o equilíbrio
 9 químico, a cinética das reações e a modificação da porosidade do material.

Consequentemente, o grau de dificuldade envolvido requer a implantação de métodos numéricos, devido ao grande esforço de cálculo.

Conforme a escala de análise, os modelos podem ser classificados em micro, meso e macroscópicos. Na escala microscópica, o material concreto é caracterizado como uma matriz sólida com porosidade e solução intersticial, a qual responde à ação de um gel expansivo, sendo a análise feita no nível dos minerais, em uma escala de 10^{-6} m. Na escala mesoscópica, por meio de resultados obtidos com corpos de prova em laboratório, em uma ordem de dimensão de 10^{-2} m, explica-se a relação da formação do gel e a expansão das amostras. Na modelização macroscópica, escala de 10^1 m, realiza-se o cálculo dos efeitos da expansão na estrutura real, a partir de experimentos laboratoriais.⁴

Modelos de previsão de dano

Os modelos de previsão de dano simulam a reação álcali-sílica e, posteriormente, apresentam o decaimento das propriedades do concreto provocado pelo fenômeno. Para tanto, eles se baseiam em diferentes conceitos e teorias para o desenvolvimento de suas modelagens, as quais, por conseguinte, exigem diferentes dados de entrada para suas formulações. Após uma extensiva e profunda análise de cada modelo, chegou-se ao agrupamento exposto na **Tabela 2**, o qual apresenta os principais dados de entrada de cada modelo.

Dependendo do tipo de modelagem e da base utilizada para seu desenvolvimento, os dados de entrada são bastante heterogêneos de um modelo para outro. Alguns são concernentes às propriedades intrínsecas ao concreto, advindas de seu proporcionamento e substâncias contidas em seu interior; outros vêm de condições externas na qual as estruturas estão expostas. Salienta-se que, de forma geral, os dados de entrada mais usados nos modelos são relacionados às propriedades mecânicas e composição física do concreto, **Fig. 5**, e que as nomenclaturas sobre o mesmo dado são diferentes de um modelo para o outro, por essa razão foi necessário executar uma padronização da terminologia, como pode ser observado na

- 1 **Tabela 2.** Também, para facilitar a consulta à tabela, os símbolos foram agrupados em três
- 2 categorias: letras maiúsculas, letras minúsculas e letras gregas.
- 3 **Tabela 2 – Principais dados de entrada para as modelações**

Ref	Concreto			Condições de exposição e dados da estrutura			Outros		
	Mai.	Min.	Grega	Mai.	Min.	Grega	Mai.	Min.	Grega
18	E, Ea, Ec	fc, ft	v, va, vc					ci	
19	E	a/c, c, d, fc, fs, ft, r, w/c		T		ρ_w	Da	ca, cs, w/s	
20			η , ρ				Dab	ca, ch, cs, csI, m	τ
21	E	d, fc, ft, tc, w/c	η				Da, Vg	ca, cs	
22	E	fc, ft	v		t				
23	E	ft	ρ , v	L, RU, T	e, t				ε , τ_c , τ_l
24	E	ft	v		t				ε
25	E	ft, k	v	T	t	α	Gf, K		ε , τ_c , τ_l
26	E, Sw	ft		V			Kg, Ks		ζ
27	E	a/c, c, d, fc, ft, p, r, w/c		T		ρ_w	Gf	ca, cs, z	δ_c
28	E		ρ , v		t	ρ_w	P		ε , τ_c , τ_l
29	Ea, Ec	D, fc, ft,	η , va, vc	T			Ci, Cg, Gf, Pi, Va, Vp	pa	ε , τ_c , τ_l , ν_g
30	E, Kc	fc, fs, ft	η , v	T	t	α			ε , τ_c , τ_l
31	E, Sw	Ev, ft, p, w	η , v			γ_w			γ_s , ε , τ_c , τ_l
32	E, Sw	p, w/c	η	T	t				ε , τ_c , τ_l
33	E, Ec	ft, r	v, vc,	K			Eg, P	tc, x	ζ , ρ_p , ν_g

Legenda:

Cg – concentração de gel na borda do agregado; **Ci** – concentração de íons nos poros; **Da** – coeficiente de difusão de álcalis na matriz cimentícia; **Dab** – coeficiente de difusão do gel; **E** – módulo de Young do concreto; **Ec** – módulo de Young da matriz cimentícia; **Ea** – módulo de Young dos agregados; **Eg** – módulo de Young do gel; **Gf** – energia da fratura; **K** – deformação máxima medida; **Kc** – rigidez do concreto; **Kg** – rigidez do gel da RAS; **Ks** – rigidez da matriz cimentícia; **L** – largura da barragem; **P** – pressão; **Pi** – pressão na zona de transição; **R** – constante universal dos gases; **RU** – umidade relativa; **Sw** – grau de saturação; **T** – temperatura; **V** – volume do Elemento Representativo de Volume (RVE); **Va** – volume do agregado; **Vg** – volume molar do gel da RAS; **Vp** – volume dos poros ao redor do agregado.

a/c – relação agregado/cimento; **c** – teor de cimento; **ca** – teor de álcalis; **ch** – concentração dos íons hidroxila; **ci** – raio da fissura; **cs** – teor de sílica; **csI** – concentração do silanol; **cw** – difusividade de água no agregado; **d** – diâmetro do agregado; **e** – espessura do corte feito da barragem; **ev** – índice de vazios; **fc** – resistência à compressão; **ft** – resistência à tração; **fs** – resistência ao cisalhamento; **k** – condutividade térmica; **m** – massa específica da espécime em análise; **n** – porosidade do concreto; **p** – permeabilidade no concreto; **pa** – permeabilidade de íons no agregado; **r** – raio do agregado; **t** – tempo analisado; **tc** – espessura da zona porosa ao redor do agregado; **w** – teor de água; **w/c** – relação água/cimento; **w/s** – relação água/sílica; **x** – tamanho da fissura; **z** – raio da partícula sem reação.

α – coeficiente de dilatação térmica; **γ_w** – peso específico da água; **γ_s** – peso específico do sólido; **δ_c** – espessura na qual os poros estão acessíveis ao gel; **ε** – expansão volumétrica; **ζ** – extensão da reação; **η** – porosidade do concreto; **ρ** – densidade do concreto; **ρ_p** – fração de volume do agregado substituído pelo gel; **ρ_w** – densidade da água; **τ** – tortuosidade da partícula em análise **τ_c** – tempo característico; **τ_l** – tempo de latência; **v** – coeficiente de Poisson do concreto; **vc** – coeficiente de Poisson da matriz cimentícia; **va** – coeficiente de Poisson do agregado; **ν_g** – coeficiente de Poisson do gel.

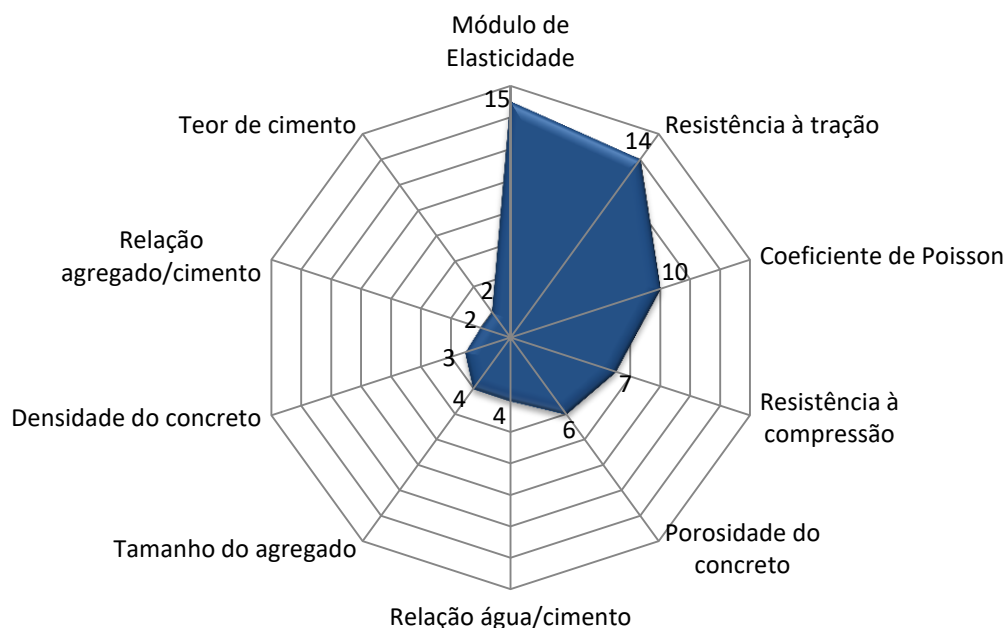


Fig. 5 – Principais dados de entrada referentes ao concreto.

Pela análise da **Fig. 5**, percebe-se, como esperado, que o parâmetro de entrada presente em maior número nos modelos é o módulo de elasticidade; essa propriedade representa a rigidez do concreto analisado, a qual se relaciona, por sua vez, à sua composição química e microestrutura, propriedades diretamente afetadas pela RAS. O único modelo de previsão de dano que não considera esse parâmetro é o desenvolvido por Balbo,²⁰ por tratar somente da previsão do dano químico; o segundo parâmetro mais utilizado é a resistência à tração do concreto, novamente em coerência com o mecanismo da reação analisada, uma vez que as tensões geradas pelo gel no interior do concreto são de tração, havendo, inicialmente, o decaimento dessa propriedade. O coeficiente de Poisson é necessário em 10 dos 16 modelos estudados, relacionando-se com tendência de expansão nas diferentes direções possíveis, o que influencia no padrão de fissuras gerado pela reação na estrutura. Por fim, tem-se a resistência à compressão e as demais propriedades e parâmetros de proporcionamento em menor número nos modelos, mas ainda assim sendo parâmetros necessários para algumas das simulações.

De posse dos dados de entrada anteriormente mencionados, parte-se para sua implementação nos modelos, os quais processam suas informações de forma analítica e/ou numérica através de um procedimento de cálculo que utiliza, em sua maioria, software de elementos finitos, e gera como resultado diferentes tipos de informações, como pode ser verificado na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Principais resultados (dados de saída) dos modelos

Ref.	Ano	Dados	
18	2016	- expansão x módulo de Elasticidade - expansão x resistência à compressão	- expansão x resistência à tração - tensão x deformação
19	2015	- expansão x tempo - deformação x tempo	- padrão de fissuras - tensão x deformação
20	2015	dano químico no RVE considerado a partir da densidade de gel formada	
21	2014	- expansão x tempo - expansão x resistência à tração	- expansão x resistência à compressão - expansão x módulo de Elasticidade
22	2014	tensão x deformação	
23	2014	- tensões x tempo - deslocamentos verticais - deslocamentos transversais	- deslocamentos longitudinais - expansão x módulo de Elasticidade
24	2014	deformação x tempo	
25	2013	- deformação x tempo - deformação x rigidez - deformação x resistência à tração	- deslocamento horizontal x tempo - deslocamento vertical x tempo - padrão de fissuras
26	2013	- dano químico x deformação longitudinal - deformação x tempo - pressão do gel da RAS x tempo - deformação axial x tempo	- deformação radial x tempo - tensão x deformação - módulo de Elasticidade x tempo - carga x deflexão
27	2013	- deformação axial x tempo - deformação radial x tempo - padrão de fissuras - deformação volumétrica x tempo - resistência à compressão x expansão	- resistência à tração x expansão - expansão x módulo de Elasticidade - expansão x tempo - expansão x teor de álcalis
28	2013	pressão interna produzida pelo gel x fissuras	
29	2013	- coeficiente de expansão da RAS x tempo - variação do volume de gel x tempo - coeficiente de expansão da RAS x agregados	- pressão x tempo - expansão x tempo - deformação no elemento
30	2013	- tensão x deformação - padrão de fissuras - expansão x módulo de Elasticidade	- deformação x resistência à compressão - número de fissuras x deformação - deformação x tempo
31	2012	- deformação x tempo - módulo de Elasticidade x tempo - deformação longitudinal x tempo	- deformação transversal x tempo - padrão de fissuras
32	2012	- deformação x tempo - extensão da reação x tempo	- variação de massa x tempo - dano químico x expansão volumétrica
33	2012	- pressão antes e após a primeira fissura - profundidade do ataque na primeira fissura - deformação volumétrica	- evolução do tamanho da fissura x tamanho de agregados - pressão x diferentes tamanhos de agregados

Os resultados dos modelos são gerados conforme tipo de modelagem utilizada, o que, por sua vez, depende da base usada para fundamentar o modelo e das diferentes informações de entrada necessárias. Dessa forma, a maioria dos dados se refere ao decaimento das propriedades mecânicas do concreto, outros levam em consideração o dano químico provocado pela reação, e ainda outros consideram a correlação entre pressão, grau de saturação, tipo e granulometria dos agregados, dentre uma série de outros fatores.

No que se refere aos dados de saída concernentes às propriedades mecânicas do concreto, estes foram agrupados em 5 parâmetros principais, ilustrados pela **Fig. 6**.

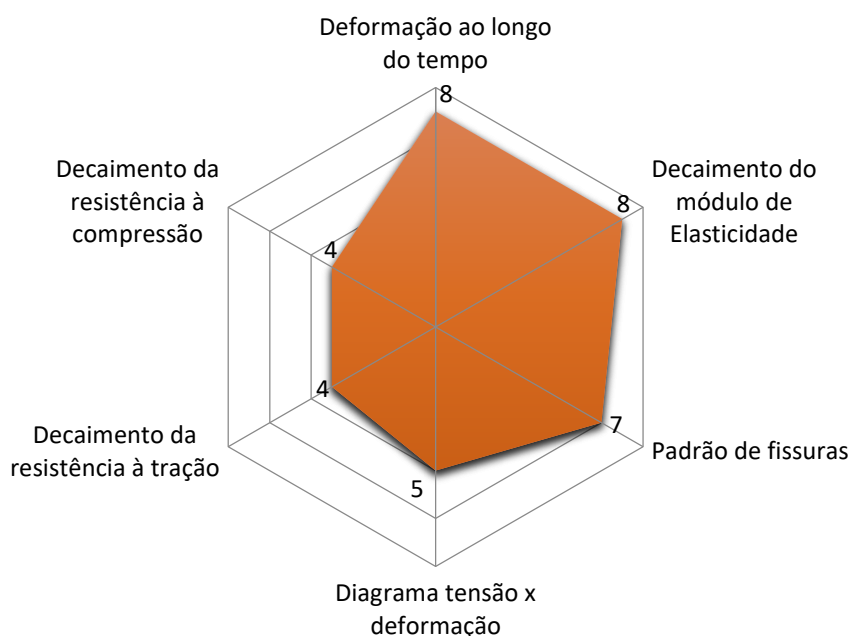


Fig. 6–Principais dados de saída referentes às propriedades mecânicas do concreto.

Os principais dados de saída gerados pelos modelos investigados são deformação do elemento de concreto ao longo do tempo e decaimento do módulo de elasticidade. O primeiro é de grande importância para verificação da vida útil de serviço do elemento afetado, pois prevê o acréscimo de volume na estrutura; o segundo demonstra o quanto a reação afeta a rigidez do concreto e, conseqüentemente, a sua capacidade de resistir às tensões impostas sem se deformar. Na sequência, tem-se o padrão de fissuração, o qual estabelece o local onde surgirão as fissuras e, em alguns casos, a profundidade em que elas vão ocorrer, sendo

1 possível estabelecer onde intervir e o tipo de tratamento mais adequado para a estrutura;
2 vários modelos simularam esse padrão. Por fim, tem-se o decaimento das resistências à tração
3 e compressão, podendo-se prever o quanto a estrutura poderá suportar até que chegue ao
4 colapso.

5 Vários dos modelos analisados fizeram a comparação de suas simulações com dados
6 experimentais a fim de validar o trabalho desenvolvido, o que resultou em considerações
7 sobre a eficiência de suas modelações e propostas para posterior melhoria. As conclusões
8 obtidas foram bastante diversificadas devido às particularidades de cada modelagem.

9 **Modelos de desenvolvimento da reação álcali-sílica**

10 Além dos modelos de previsão de dano, conforme citado anteriormente, na RSL foram
11 encontrados outros que simulam a reação álcali-sílica com o intuito de verificar a correlação
12 entre os parâmetros intrínsecos ao concreto, antes, durante e após a reação, para melhor
13 entendimento do processo reativo; como também servindo de base para o desenvolvimento de
14 outros modelos.³⁴⁻³⁸ Nesse sentido, na sequência, são resumidos os principais aspectos desses
15 modelos.

16 O modelo proposto por Guthrie e Carey³⁴ trata de uma modelagem geoquímica aplicada em
17 um elemento representativo de volume, em que é executada uma análise termodinâmica e
18 cinética da reação a partir dos valores de pressão, temperatura, grau de saturação, tempo,
19 dentre outros dados; extrai-se como resultado relações entre o pH e os produtos de hidratação
20 e a formação do gel da RAS. Com base nesses estudos, os autores concluem que mudanças na
21 temperatura e desidratação da solução são possíveis mecanismos adicionais que podem
22 interferir nas condições do sistema para favorecer a formação do gel da reação.

23 Saouma *et al.*³⁵ propuseram uma modelação cinética que leva em consideração os teores de
24 siloxano, íons alcalinos, ácido silício, silicato alcalino e água como variáveis de entrada. Eles
25 analisaram a evolução do gel e sua correlação com essas variáveis; a partir desses estudos,

pôde-se observar similaridades entre a concentração do gel e a expansão do concreto atacado pela RAS.

O modelo numérico desenvolvido por Charpin e Ehrlaher³⁶ analisa a difusão do gel da reação e a pressão no interior do concreto, baseando-se na equação da conservação de massa, na equação da poromecânica e na Lei de Darcy para seu desenvolvimento; os principais parâmetros de entrada estão relacionados à porosidade e densidade do concreto, tamanho do agregado, permeabilidade da pasta de cimento, espessura da zona de transição, dentre outros. Nesse caso, os autores determinaram a pressão que leva ao aparecimento das fissuras e propuseram um gráfico que correlaciona pressão em função do tempo e da fissura.

Kim e Olek³⁷ desenvolveram um modelo termodinâmico que se baseia na Lei da Cinética e na Teoria do Estado Transitório. Valores quantitativos da água, hidróxido de cálcio, temperatura, concentrações dos íons alcalinos (sódio e potássio), hidroxila e sílica, são os principais dados de entrada necessários para a simulação, a qual apresenta como resultado o consumo de determinados elementos e mudanças nos valores das concentrações, predizendo, principalmente, o limite de concentração de K abaixo do qual a RAS não ocorre. Segundo os autores, os dados simulados demonstraram boa correlação com dados experimentais, evidenciando a potencialidade de uso do modelo.

Por fim tem-se a modelação proposta por Islam e Ghafoori,³⁸ a qual se desenvolve no campo da cinética e tem como principal parâmetro a expansão medida e o tempo no qual ela ocorreu, possibilitando que se chegue em sua correlação com o tipo de agregado, o que resulta na classificação dos agregados quanto à sua reatividade.

CONCLUSÕES

Com base na RSL, observou-se que a modelação da RAS vem sendo estudada em diferentes partes do mundo com abordagens bastante distintas, promovidas por uma gama diversificada de pesquisadores. Todavia, não há uma padronização para os termos usados em seus

desenvolvimentos e nem para os resultados gerados, o que dificulta suas análises e correlações.

A modelação da reação álcali-sílica pode ser classificada em: modelos preditivos de dano nos elementos de concreto analisados e modelos que somente simulam o desenvolvimento da reação.

Dentre as pesquisas sistematizadas, os modelos que preveem o dano foram desenvolvidos em várias escalas de análise, micro, meso (maior concentração de trabalhos) e macroscópica e, em sua quase totalidade, fazem uso de ferramentas numéricas devido à grande complexidade das análises propostas, como software de elementos finitos.

A maioria das análises são químico-mecânicas e demandam dados de entrada principalmente ligados às propriedades mecânicas do concreto, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, resistências à compressão e à tração, dentre outras. Como principais resultados, tem-se o decaimento dessas propriedades, podendo-se chegar à previsão da vida útil dessas estruturas.

Os modelos que não se categorizam como preditivos de dano fornecem dados essenciais para o entendimento da reação; uma vez que esta afeta os constituintes do concreto, os modelos servem como base para o desenvolvimento de outros tipos de modelos, como, por exemplo, os de previsão de dano, e também para execução de análises mais profundas com respeito ao fenômeno.

Salienta-se, por fim, que um grande avanço para a modelação da RAS seria o estabelecimento de critérios para condições de serviço das estruturas afetadas em nível macroscópico. Com a inserção de um limite de serviço para o decaimento das propriedades do concreto e deformações geradas pela reação, no desenvolvimento dos modelos, poder-se-ia estabelecer conclusões diretas e práticas para casos reais de elementos de concreto atacados, a partir dos resultados das simulações executadas. Todavia, é importante enfatizar que existe uma grande

complexidade para a condução de pesquisas nesse sentido, pois estas dependem da geometria e tipo de estrutura onde a reação ocorre, propriedades de cada concreto utilizado, comportamento mecânico estrutural particular de cada peça em relação às suas características e funções, verificação de dependência entre fatores e uma série de outras condições. Observando-se toda essa heterogeneidade, sugere-se que esse seria o caminho para o desenvolvimento de novos modelos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, do Brasil, pela concessão das bolsas PQ e de mestrado, respectivamente.

REFERÊNCIAS

1. Glasser, L. S. D., and Kataoka, N., “The Chemistry of ‘Alkali-aggregate’ Reaction,” *Cement and Concrete Research*, V. 11, 1981, pp. 1-9.
2. Parvini, M.; Pietruszczak, S.; and Gocevski, V., “Seismic Analysis of Hydraulics Structures Affected by Alkali-aggregate Reaction: a Case Study,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 28, 2001, pp. 332-338.
3. Sanchez, L. F. M.; Fournier, B.; Jolin, M.; Bedoya, M. A. B.; Bastien, J.; and Duchesne, J., “Use of Damage Rating Index to Quantify Alkali-Silica,” *ACI Materials Journal*, V. 113, No. 4, Jul.-Aug. 2016, pp. 395-407.
4. Ollivier, J. P., and Vichot, A., “Durabilidade do Concreto,” 1st Edition, IBRACON, São Paulo, Brazil, 2014, 615pp.
5. Hasparyk, N. P.; Monteiro, P. J. M.; and Carasek, H., “Effect of silica fume and rice husk ash on alkali-silica reaction,” *ACI Materials Journal*, V. 97, No. 4, 2000, pp. 486-492.
6. Fernandes, I., and Broekman M. A. T. M., “Alkali-Silica Reactions: An Overview. Part I,” *Metallography, Microstructure, and Analysis*, V. 2, 2013, pp. 257-267.
7. Shah, H. M., and Chung, K. C., “Archie Cochrane and His Vision for Evidence-based Medicine,” *Plastic Reconstruction Surgery*, V. 124, No. 3, 2010, pp. 982-988.

8. Higgins, J. P. T., and Green, S., "Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions," The Cochrane Collaboration and John Wiley & Sons, Chichester, England, 2011, 673 pp.
9. Hall, T.; Beecham, S.; Bowes, D.; Gray, D.; and Counsell, S., "A Systematic Literature Review on Fault Prediction Performance," *IEEE Transactions on Software Engineering*, V. 38, No. 6, Nov.-Dec. 2012, pp. 1276-1304.
10. Nascimento, K. R., and Alencar, M. H., "Management of Risks in Natural Disasters: A Systematic Review of the Literature," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, V. 44, 2016, pp. 347-359.
11. Iden, J.; Methlie, L. B.; and Christensen, G. E., "The Nature of Strategic Foresight Research: A Systematic Literature Review," *Technological Forecasting & Social Change*, V. 116, 2017, pp. 87-97.
12. Unterkalmsteiner, M.; Gorschek, T.; Islam, A. K. M. M.; Cheng, C. K.; Permadi, R. B.; and Feldt, R., "Evaluation and Measurement of Software Process Improvement – A Systematic Literature Review," *IEEE Transactions On Software Engineering*, V. 38, No. 2, Mar.-Apr. 2012, pp. 398-424.
13. Vilela, J.; Castro, J.; Martins, L. E. G.; and Gorschek, T., "Integration Between Requirements Engineering and Safety Analysis: A Systematic Literature Review," *The Journal of Systems and Software*, V. 125, 2017, pp. 68-92.
14. Pan, J. W.; Feng, Y. T.; Wang, J. T.; Sun, Q. C.; Zhang, C. H.; and Owen, D. R. J., "Modeling of Alkali-Silica Reaction in Concrete: a Review," *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, V. 6, No. 1, 2012, pp. 1-18.
15. Islam, M. S., "Prediction of Ultimate Expansion of ASTM C 1260 for Various Alkali Solutions Using the Proposed Decay Model," *Construction and Building Materials*, V. 77, 2015, pp. 317-326.
16. Huang, Q.; Gardoni, P.; Trejo, D.; and Pagnotta, A., "Probabilistic Model for Steel-concrete Bond Behavior in Bridge Columns Affected by Alkali-silica Reactions," *Engineering Structures*, V. 71, 2014, pp. 1-11.
17. Karthik M. M.; Mander, J. B.; and Hurlebaus, S., "ASR/DEF Related Expansion in Structural Concrete: Model Development and Calibration" *Construction and Building Materials*, V. 128, 2016, pp. 238-247.
18. Esposito, R., and Hendriks, M. A. N., "A Multiscale Micromechanical Approach to Model the Deteriorating Impact of Alkali-silica Reaction on Concrete," *Cement and Concrete Composites*, V. 70, 2016, pp. 139-152.
19. Alnaggar, M.; Liu, M.; Qu, J.; and Cusatis, G., "Lattice Discrete Particle Modeling of Acoustic Nonlinearity Change in Accelerated Alkali Silica Reaction (ASR) Tests," *Materials and Structures*, V. 49, No. 9, 2015, pp. 3523-3545.

20. Balbo, F. A. N.; Pianezzer, G. A.; Gramani, L. M.; Kaviski, E.; and Teixeira, M. R., "An Application to the Diffusion Equation in a Model for the Damage in Concrete due to Alkali-silica Reaction," *Applied Mathematical Sciences*, V. 9, No. 83, 2015, pp. 4135-4147.
21. Sanchez, L. F. M.; Multon, S.; Sellier, A.; Cyr, M.; Fournier, B.; and Jolin, M., "Comparative Study of a Chemo-mechanical Modeling for Alkali Silica Reaction (ASR) with Experimental Evidences," *Construction and Building Materials*, V. 72, 2014, pp. 301-315.
22. Liao, Y.; Chen, D.; Liu, Z.; Ouyang, F.; and Hou, L., "Elastoplastic-damage Compression Constitutive Model for Cementitious Material Subjected to Alkali-silica Reaction," *Journal of Advanced Concrete Technology*, V. 12, No. 5, 2014, pp. 158-166.
23. Metalssi, O. O.; Seignol, J. F.; Rigobert, S.; and Toutlemonde, F., "Modeling the Cracks Opening-closing and Possible Remedial Sawing Operation of AAR-affected Dams," *Engineering Failure Analysis*, V. 36, 2014, pp. 199-648.
24. Yanagihara, K., and Yoshida, H., "Modeling of Expansion Behavior due to Alkali-silica Reaction under Complicated Stress," *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, V. 62, 2014, pp. 211-217.
25. Pan, J.; Feng, Y.; Xu, Y.; Jin, F.; Zhang, C.; and Zhang, B., "Chemo-damage modeling and cracking analysis of AAR-affected concrete dams," *Science China Technological Sciences*, V. 56, No. 6, 2013, pp. 1449-1457.
26. Pignatelli, R.; Comi, C.; and Monteiro, P. J. M., "A Coupled Mechanical and Chemical Damage Model for Concrete Affected by Alkali-silica Reaction," *Cement and Concrete Research*, V. 53, 2013, pp. 196-210.
27. Alnaggar, M.; Cusatis, G.; and Di Luzio, G., "Lattice Discrete Particle Modeling (LDPM) of Alkali-silica Reaction (ASR) Deterioration of Concrete Structures," *Cement and Concrete Composites*, V. 41, 2013, pp. 41-45.
28. Ferreira, A. P. G.; Farage, M. C. R.; and Barbosa, F. D., "Modelling of the Mechanical Behavior of Concrete Affected by Alkali-aggregate Reaction," *REM – Revista Escola de Minas*, V. 66, No. 1, 2013, pp. 35-40.
29. Puatatsananon, W., and Saouma, V., "Chemo-mechanical Micro Model for Alkali-silica Reaction," *ACI Materials Journal*, V. 110, 2013, pp. 67-78.
30. Pan, J.; Feng, Y. T.; Jin, F.; Xu, Y.; Sun, Q.; Zhang, C.; and Owen, D. R. J., "Meso-scale Particle Modeling of Concrete Deterioration Caused by Alkali-aggregate Reaction," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, V.37, No.16, 2013, pp. 2690-2705.

- 1 31. Comi, C.; Kirchmayr, B.; and Pignatelli, R., “Two-phase Damage Modeling of Concrete Affected by Alkali–
- 2 silica Reaction under Variable Temperature and Humidity Conditions,” *International Journal of Solids and*
- 3 *Structures*, V. 49, No. 23-24, 2012, pp. 3367-3380.
- 4 32. Pesavento, F.; Gawin, D.; Wyrzykowski, M.; Schrefler, B. A.; and Simoni, L., “Modeling Alkali–silica
- 5 Reaction in Non-isothermal, Partially Saturated Cement Based Materials,” *Computer Methods in Applied*
- 6 *Mechanics and Engineering*, V. 225-228, 2012, pp. 95-115.
- 7 33. Charpin, L., and Ehrlicher, A., “A Computational Linear Elastic Fracture Mechanics-based Model for
- 8 Alkali–silica Reaction,” *Cement and Concrete Research*, V. 42, No. 4, 2012, pp. 613-625.
- 9 34. Guthrie, G. D., and Carey, J. W., “A Thermodynamic and Kinetic Model for Paste–aggregate Interactions
- 10 and the Alkali–silica Reaction,” *Cement and Concrete Research*, V. 76, 2015, pp. 107-120.
- 11 35. Saouma, V. E.; Martin, R. A.; Hariri-Ardebili, M. A.; and Katayama, T., “A Mathematical Model for the
- 12 Kinetics of the Alkali–silica Chemical Reaction,” *Cement and Concrete Research*, V. 68, 2015, pp. 184-195.
- 13 36. Charpin, L., and Ehrlicher, A., “Simplified Model for the Transport of Alkali-silica Reaction Gel in
- 14 Concrete Porosity,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, V. 12, No. 1, 2013, pp. 1-6.
- 15 37. Kim, T., and Olek, J., “Chemical Sequence and Kinetics of Alkali-silica Reaction Part II – A
- 16 Thermodynamic Model,” *Journal of the American Ceramic Society*, V. 97, No. 7, 2014, pp. 2204-2212.
- 17 38. Islam, M. S., and Ghafoori, N., “Evaluation of Alkali-silica Reactivity using ASR Kinetic Model,”
- 18 *Construction and Building Materials*, V. 45, 2013, pp. 270-274.
- 19 39. Hobbs, D. W., “The Alkali-silica Reaction – a Model for Predicting Expansion in Mortar,” *Magazine of*
- 20 *Concrete Research*, V. 33, No. 117, 1981, pp. 208-220.
- 21 40. Chatterji, S., and Christensen, P., “Studies of Alkali-silica Reaction, ‘Part 7,’ Modelling of Expansion,”
- 22 *Cement and Concrete Research*, V. 20, 1990, pp. 285-290.
- 23 41. Clark, L. A., “Modeling the Structural Effects of Alkali-aggregate Reactions on Reinforced-concrete,” *ACI*
- 24 *Materials Journal*, V. 88, No. 3, 1991, pp. 271-277.
- 25 42. Mather, B., “Modeling the Structural Effects of Alkali-aggregate Reactions on Reinforced-concrete,” *ACI*
- 26 *Materials Journal*, V. 89, No. 2, 1992, pp. 211-212.
- 27 43. Capra, B.; and Bournazel, J. P., “Perspectives Nouvelles pour la prise en compte des alcali-réactions dans le
- 28 calcul des structures,” *Materials and Structures*, V. 28, 1995, pp. 71-73.
- 29 44. Sellier, A.; Bournazel, J. P.; and Mebarki, A., “Modeling the Alkali-aggregate Reaction with Descriptions of
- 30 the Local Destructive Phenomena Involved,” *Materials and Structures*, V. 28, No. 181, 1995, pp. 373-383.

- 1 45. Moranville-Regourd, M. "Modelling of Expansion Induced by ASR — New Approaches," *Cement and*
2 *Concrete Composites*, V. 19, 1997, pp. 415-425.
- 3 46. Capra, B., and Bournazel, J. P., "Modeling of Induced Mechanical Effects of Alkali-aggregate Reactions,"
4 *Cement and Concrete Research*, V. 28, No. 2, 1998, pp. 251-260.
- 5 47. Pantazopoulou, S. J., and Thomas, M. D. A., "Modeling Stress-strain Behavior of Concrete Damaged by
6 Alkali-aggregate Reaction (AAR)," *ACI Structural Journal*, V. 96, No. 5, 1999, pp. 790-799.
- 7 48. Huang, M., and Pietruszczak, S., "Modeling of Thermomechanical Effects of Alkali-Silica Reaction,"
8 *Journal of Engineering Mechanics*, V. 125, No. 4, 1999, pp. 476-485.
- 9 49. Bazant, Z. P., and Steffens, A., "Mathematical Model for Kinetics of Alkali-silica Reaction in Concrete,"
10 *Cement and Concrete Research*, V. 30, 2000, pp. 419-428.
- 11 50. Li, K., and Coussy, O., "Concrete ASR Degradation: from Material Modeling to Structure Assessment,"
12 *Concrete Science and Engineering*, V. 4, 2002, pp. 35-46.
- 13 51. Capra, B., and Sellier, A., "Orthotropic Modelling of Alkali-aggregate Reaction in Concrete Structures:
14 Numerical Simulations," *Mechanics of Materials*, V. 35, No. 8, 2003, pp. 817-830.
- 15 52. Farage, M. C. R.; Alves, J. L. D.; and Fairbairn, E. M. R., "Macroscopic Model of Concrete Subjected to
16 Alkali-aggregate Reaction," *Cement and Concrete Research*, V. 34, No. 3, 2004, pp. 495-505.
- 17 53. Bangert, F.; Kuhl, D.; and Meschke, G., "Chemo-hygro-mechanical Modelling and Numerical Simulation of
18 Concrete Deterioration Caused by Alkali-silica Reaction," *International Journal for Numerical and*
19 *Analytical Methods in Geomechanics*, V. 28, No. 7-8, 2004, pp. 689-714.
- 20 54. Fairbairn, E. M. R.; Ribeiro, F. L. B.; Lopes, L. E.; Toledo-Filho, R. D.; and Silvano, M. M., "Modelling the
21 Structural Behaviour of a Dam Affected by Alkali-silica Reaction," *Communications in Numerical Methods*
22 *in Engineering*, V. 22, No. 1, 2005, pp. 1-12.
- 23 55. Kirkpatrick, R. J.; Kalinichev, A. G.; Hou, X.; and Struble, L., "Experimental and Molecular Dynamics
24 Modeling Studies of Interlayer Swelling: Water Incorporation in Kanemite and ASR Gel," *Materials and*
25 *Structures*, V. 38, No. 278, 2005, pp. 449-458.
- 26 56. Saouma, V., and Perotti, L., "Constitutive Model for Alkali-aggregate Reactions," *ACI Materials Journal*,
27 V. 103, No. 3, 2006, pp. 194-202.
- 28 57. Ichikawa, T., and Miura, M., "Modified Model of Alkali-silica Reaction," *Cement and Concrete Research*,
29 V. 37, No. 9, 2007, pp. 1291-1297.

58. Oka, K.; Yoshida, H.; Matsushima, M.; and Yokota, M., "Modeling of Crack Occurrence in Concrete Deteriorated by Alkali Aggregate Reaction and Proposal of Analysis Method," *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, V. 63, No. 4, 2007, pp. 744-757.
59. Copuroglu, O., and Schlangen, E., "Modelling of Effect of ASR on Concrete Microstructure," *Key Engineering Materials*, V. 348-349, 2007, pp. 809-812.
60. Poyet, S.; Sellier, A.; Capra, B.; Foray, G.; Torrenti, J. M.; Cognon, H.; and Bourdarot, E., "Chemical Modelling of Alkali Silica Reaction: Influence of the Reactive Aggregate Size Distribution," *Materials and Structures*, V. 40, No. 2, 2007, pp. 229-239.
61. Grimai, E.; Sellier, A.; Pape, Y. L. E.; and Bourdarot, E., "Creep, Shrinkage, and Anisotropic Damage in Alkali-aggregate Reaction Swelling Mechanism – Part II: Identification of Model Parameters and Application," *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 3, 2008, pp. 236-242.
62. Grimal, E.; Sellier, A.; Pape, Y. L. E.; and Bourdarot, E., "Creep, Shrinkage, and Anisotropic Damage in Alkali-aggregate Reaction Swelling Mechanism – Part I: A Constitutive Model," *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 3, 2008, pp. 227-235.
63. Carrazedo, R., and Lacerda, L. A., "Parametric Model for the Analysis of Concrete Expansion due to Alkali-aggregate Reaction," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, V. 43, No. 2, 2008, pp. 229-239.
64. Grimal, E.; Sellier, A.; Multon, S.; and Bourdarot, E., "Modeling of Structures Affected by Alkali Aggregate Reaction," *ACI Special Publication*, V. 266, 2009, pp. 101-108.
65. Multon, S.; Sellier, A.; and Cyr, M., "Chemo-mechanical Modeling for Prediction of Alkali Silica Reaction (ASR) Expansion," *Cement and Concrete Research*, V.39, No. 6, 2009, pp. 490-500.
66. Herrador, M. F.; Martínez-Abella, F.; and Fernández-Gago, R. D. H., "Mechanical Behavior Model for ASR-affected Dam Concrete under Service Load: Formulation and Verification," *Materials and Structures*, V. 42, No. 2, 2009, pp. 201-212.
67. Comi, C.; Fedele, R.; and Perego, U., "A Chemo-thermo-damage Model for the Analysis of Concrete Dams Affected by Alkali-silica reaction," *Mechanics of Materials*, V. 41, No. 3, 2009, pp. 210-230.
68. Dunant, C. F., and Scrivener, K. L., "Micro-mechanical Modelling of Alkali-silica-reaction-induced Degradation using the AMIE Framework," *Cement and Concrete Research*, V. 40, No. 4, 2010, pp. 517-525.
69. Grimal, E.; Sellier, A.; Multon, S.; Le Pape, Y.; and Bourdarot, E., "Concrete Modelling for Expertise of Structures Affected by Alkali Aggregate Reaction," *Cement and Concrete Research*, V. 40, No. 4, 2010, pp.502-507.

70. Bourdarot, E.; Sellier, A.; Multon, S.; and Grimal, E., "A Review of Continuum Damage Modelling for Dam Analysis: Main Steps of a Fruitful University-industry Collaboration Leading to an Integrated Model Applicable to AAR Affected Structures," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, V. 10, No. 1-10, 2010, pp. 805-822.
71. Comi, C., and Perego, U., "Anisotropic Damage Model for Concrete Affected by Alkali-Aggregate Reaction," *International Journal of Damage Mechanics*, V. 20, No. 4, 2011, pp. 598-617.
72. Pan, J. W.; Xu, Y. J.; and Jin, F., "Chemo-damage Model for Concrete Anisotropic Expansion caused by Alkali-aggregate Reaction," *Applied Mechanics and Materials*, V. 204-208, 2012, pp. 3230-3235.
73. Pan, J. W.; Feng, Y. T.; Wang, J. T.; Sun, Q. C.; Zhang, C. H.; and Owen, D. R. J., "Modeling of Alkali-silica Reaction in Concrete: A Review," *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, V. 6, No. 1, 2012, pp. 1-18.
74. Pietruszczak, S.; Ushaksaraei, R.; and Gocevski, V., "Modelling of the Effects of Alkali-aggregate Reaction in Reinforced Concrete Structures," *Computers and Concrete*, V. 12, No. 5, 2013, pp. 627-650.
75. Pan, J. W.; Feng, Y. T.; Jin, F.; and Zhang, C., "Numerical Prediction of Swelling in Concrete Arch Dams Affected by Alkali-aggregate Reaction," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, V. 17, No. 4, 2013, pp. 231-247.
76. Pan, J.; Xu, Y.; Jin, F.; and Zhang, C., "Modeling of Long-term Behavior of Concrete Dams Affected by Alkali-aggregate Reaction," *Journal of Hydroelectric Engineering*, V. 33, No. 5, 2014, pp. 169-176.
77. Zahira, S. N., and Aissa, A., "Modeling the Alkali-aggregate Reaction Expansion in Concrete," *Computers and Concrete*, V. 16, No. 1, 2015, pp. 37-48.
78. Duan, A.; Zhang, D. W.; and Alnaggar, M., "Microplane Modeling of ASR Effects on Concrete Structures," *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, V. 49, No. 10, 2015, pp. 1939-1945.

CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura com respeito aos modelos de previsão de dano para estruturas de concreto afetadas por reação álcali-sílica, verificando de forma detalhada o estado da arte da temática, além de sintetizar essas informações e sistematizar os dados dos modelos selecionados para o estudo.

Foram encontrados um total de 104 artigos que tratam sobre o tema em periódicos e congressos ou conferências, sendo seus dados sintetizados e agrupados em planilha eletrônica. Na sequência, estudou-se de forma detalhada 21 artigos, os quais tratam das modelações desenvolvidas nos últimos anos. Seus dados foram categorizados e correlacionados, obtendo-se um padrão de informações e análises que resultaram nas conclusões listadas a seguir.

3.1. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos conduziram para três linhas de conclusões distintas: a classificação geral dos modelos encontrados conforme RSL, a análise das modelações preditivas de dano e das modelações somente do desenvolvimento da reação.

3.1.1. Classificação geral dos modelos

A modelação da RAS vem sendo estudada em diferentes partes do mundo com abordagens bastante distintas promovidas por uma gama diversificada de pesquisadores. Todavia, não há uma padronização para os termos usados em seus desenvolvimentos e nem para os resultados gerados, o que dificulta suas análises e correlações.

A temática surgiu há mais de três décadas, contudo o número de publicações se mostrou pouco expressivo até o início dos anos 2000. O ápice dos estudos se deu nos últimos cinco anos (2012-2016), chegando-se à quase 50% do número total das publicações nesse período. Atribui-se essa discrepância ao avanço do entendimento da reação no decorrer desse espaço de tempo, como também ao avanço das ferramentas que permitem executar uma análise mais detalhada do fenômeno, como, por exemplo, softwares de elementos finitos.

Percebeu-se também que a maioria dos estudos foi divulgada em periódicos internacionais, aproximadamente 60%, e o restante foi apresentado em congressos e conferências. A partir da correlação dos dados, verificou-se que parte das publicações em periódicos também foi divulgada em congressos, contudo sendo ainda um estudo mais incipiente. Nota-se, então, uma preferência por parte dos pesquisadores pela divulgação de suas pesquisas e principais conclusões em periódicos indexados, podendo esse fato estar ligado ao alto rigor de avaliação desse meio de divulgação, além da maior difusividade da pesquisa e prestígio no meio científico.

3.1.2. Modelações preditivas de dano

Os modelos sistematizados que preveem o dano foram desenvolvidos em várias escalas de análise, sendo a maioria a nível mesoscópico, 50%, e aproximadamente 25% para os níveis micro e macroscópicos; em sua quase totalidade, fazem uso de ferramentas numéricas devido à grande complexidade dos cálculos propostos, sendo que somente 1 dos modelos usou solução analítica.

Os modelos microscópicos verificam o comportamento do elemento representativo de volume frente à reação para executar suas predições, e em alguns casos trata-se de um modelo somente teórico, isto é, não há verificação de suas simulações com dados reais. A escala mesoscópica, já extrapola a análise para corpos de prova, sendo possível a comparação de seus resultados com testes laboratoriais. Já os modelos macroscópicos se baseiam nessas análises para simularem estruturas reais afetadas pela reação. Salienta-se, todavia, que ainda não há o estabelecimento de critérios para condições de serviço das estruturas afetadas pela reação, a partir dos quais se possa estabelecer conclusões diretas e práticas para casos reais de elementos de concreto atacados.

As análises, em sua maioria, são químico-mecânica, as quais demandam dados de entrada principalmente ligados às propriedades mecânicas do concreto, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, resistências à compressão e à tração, dentre outras. Grande parte destes dados pode ser obtida a partir de testes laboratoriais, contudo em vários artigos não está claro como obter certas informações, sendo necessário a análise de outros trabalhos correlatos ou até mesmo entrar em contato com os autores para eventuais esclarecimentos.

Como principais dados de saída, ou resultados dos modelos, tem-se o decaimento das propriedades mecânicas do concreto, como a rigidez da peça; padrão de fissuras; e resistências à tração e à compressão. A partir dessas informações é possível verificar quais medidas paliativas podem ser usadas na estrutura, onde e quando aplicá-las, a fim do prolongamento do serviço e da vida útil da estrutura. Os modelos que geram esse tipo de dado a nível estrutural ainda são poucos, sendo necessários estudos mais abrangentes nessa escala.

3.1.3. Modelagem da reação álcali-sílica

Os modelos que não se categorizam como preditivos de dano fornecem dados essenciais para o entendimento da reação, realizando uma correlação entre os constituintes intrínsecos ao concreto, antes, durante e após a reação, como teor de álcalis, produtos intermediários, produtos finais, pressão, pH, dentre outros; servem, então, como base para o desenvolvimento de outros tipos de modelos, como modelos que preveem o dano, por exemplo, e análises mais aprofundadas com respeito ao fenômeno.

As modelações analisadas são diversas, se tratando de modelagens químicas, termodinâmicas, cinéticas e numéricas. De modo geral, esses modelos tratam do consumo e formação de novos materiais, se atendo na correlação entre eles, e sua influência no desenvolvimento da RAS. Para cada tipo de modelagem, se tem um enfoque diferente, como a pressão e reatividade de agregados, dentre outros.

Verifica-se que esses modelos possuem um grande potencial para serem aplicados em outros modelos que preveem o dano à estrutura, podendo-se chegar a modelagens mais refinadas e eficazes para a reação estudada.

3.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

No decorrer deste trabalho, verificou-se a possibilidade de aprofundamento na temática, a qual pode ser realizada em trabalhos posteriores:

- avançar na classificação e agrupamento das informações das modelagens desenvolvidas, estendendo-se a análise desde os primeiros anos de estudo sobre o

assunto até o ano de 2011, o qual é imediatamente anterior aos anos analisados na presente pesquisa;

- elaborar correlações que analisem todos os modelos desenvolvidos, padronizando suas informações e ponderando-se a respeito de suas tendências conforme o período de seu desenvolvimento;
- catalogar os modelos com os parâmetros requeridos, fazendo correlações entre eles a fim de se obter faixas características e respostas comuns;
- definir programas experimentais que sejam capazes de fornecer os dados de entrada necessários aos modelos analisados, a fim de verificar seu comportamento por meio da comparação dos resultados das simulações com os experimentos;
- verificar as modelagens em nível macroscópico que simulam o comportamento de estruturas reais para o estabelecimento de estados limites de serviço e último, estabelecendo-se dados práticos para análise de elementos afetados pela reação;
- criar um modelo que incorpore as informações das diferentes modelações preditivas de dano analisadas, como também das que simulam somente a reação, para se obter um estudo mais refinado que aborde os aspectos positivos adquiridos de cada um.

REFERÊNCIAS

- ACI Committee 221. State-of-art Report on Alkali-Aggregate Reactivity (221.1R-8), *Géotechnique*, v. 40, p. 405-430, 1998.
- AHMED, T.; BURLEY, E.; RIGDEN, S.; ABU-TAIR, A. I. The effect of alkali reactivity on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, USA, v. 17, n. 2, p. 123 – 144, 2003.
- ALNAGGAR, M.; CUSATIS, G.; DI LUZIO, G. Lattice discrete particle modeling (LDPM) of alkali-silica reaction (ASR) deterioration of concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 41, p. 41-45, 2013.
- ALNAGGAR, M.; LIU, M.; QU, J.; CUSATIS, G. Lattice discrete particle modeling of acoustic nonlinearity change in accelerated alkali silica reaction (ASR) tests. **Materials and Structures**, v. 49, n. 9, p. 3523-3545, 2015.
- ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 15577: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.
- BALBO, F. A. N. **Um modelo matemático para a formação, difusão e dano químico causado pelo gel formado na reação álcali-silica no concreto de Cimento Portland**. 2015. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2015.
- BALBO, F. A. N.; PIANEZZER, G. A.; GRAMANI, L. M.; KAVISKI, E.; TEIXEIRA, M. R. An application to the diffusion equation in a model for the damage in concrete due to alkali-silica reaction. **Applied Mathematical Sciences**, v. 9, n. 83, p. 4135 - 4147, 2015.
- BANGERT, F.; KUHL, D.; MESCHKE, G. Chemo-hygro-mechanical modelling and numerical simulation of concrete deterioration caused by alkali-silica reaction. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 28, n. 7-8, p. 689–714, 2004.
- BAZANT, Z. P.; STEFFENS, A. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 419-428, 2000.
- BÉRUBÉ, M. A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 32, n. 8, p. 1215-1227, 2002.
- BOURDAROT, E.; SELLIER, A.; MULTON, S.; GRIMAL, E. A review of continuum damage modelling for dam analysis: Main steps of a fruitful university-industry collaboration leading to an integrated model applicable to AAR affected structures. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 10, n. 1-10, p. 805-822, 2010.
- CÂNDIDO, W. F. **Estudo De Tratamentos Com Lítio No Combate Da Reação Álcali-Agregado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, 2009.

- CANDIDO, W. F.; HASPARYK, N. P.; CARASEK, H.; MONTEIRO, P. Study of lithium treatments in mitigating alkali-aggregate reaction. *In: 14th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, 2012, Austin, Estados Unidos. **Proceedings...** Austin, 2012. p. 1-10.
- CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P. Modelling of Induced Mechanical effects of Alkali-Aggregate Reactions. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 28, n.2, p. 251-260, 1998.
- CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P. Perspectives nouvelles pour la prise en compte des alcali-réactions dans le calcul des structures (Finite-element analysis of alkali-aggregate reactions in structure modeling of concrete). **Materials and Structures**, v. 28, p. 71-73, 1995.
- CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P.; BOURDAROT, E. Alkali-aggregate reaction effects in concrete dams. *In: Second International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Hydroelectric Plants and Dams*, 1983, Chatanooga, Tennessee, EUA. **Proceedings...** Chatanooga, 1983. p. 441-455.
- CAPRA, B.; SELLIER, A. Orthotropic modelling of alkali-aggregate reaction in concrete structures: numerical simulations. **Mechanics of Materials**, v. 35, n. 8, p. 817-830, 2003.
- CARLES-GIBERGUES, A; HORNAIN, H. **A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena**. *In: OLLIVIER, J-P.; VICHOT, A. Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Ed. Tradução: Cascudo, O.; Carasek, H. 1. ed., São Paulo: IBRACON, 2014.
- CARMONA, T. G. **Modelo de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- CARRAZEDO, R. **Modelagem numérica da expansão do concreto devido à reação álcali-agregado**. 2004. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2004.
- CARRAZEDO, R.; LACERDA, L. A. Parametric model for the analysis of concrete expansion due to alkali-aggregate reaction. **Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 43, n. 2, p. 229-239, 2008.
- CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ações da carbonatação no concreto**. *In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. ed., São Paulo: IBRACON, 2011.
- CHARPIN, L.; EHRLACHER, A. A computational linear elastic fracture mechanics-based model for alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 4, p. 613-625, 2012.
- CHARPIN, L.; EHRLACHER, A. Simplified model for the transport of alkali-silica reaction gel in concrete porosity. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 12, n. 1, p. 1-6, 2013.
- CHATTERJI, S. Chemistry of Alkali-silica Reaction and Testing of Aggregates. **Cement & Concrete Composites**, USA, v. 27, p. 788-795, 2005.
- CHATTERJI, S.; CHRISTENSEN, P. Studies of alkali-silica reaction. Part 7. Modelling of expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 285-290, 1990.
- CLARK, L. A. Modeling the structural effects of alkali-aggregate reactions on reinforced-concrete. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 3, p. 271-277, 1991.

- COLLINS, R. J.; BAREHAM, P. D. Alkali-silica reaction: Suppression of expansion using porous aggregate. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 17, n. 1, p. 89-96, 1987.
- COMI, C.; FEDELE, R.; PEREGO, U. A chemo-thermo-damage model for the analysis of concrete dams affected by alkali-silica reaction. **Mechanics of Materials**, v. 41, n. 3, p. 210-230, 2009.
- COMI, C.; KIRCHMAYR, B.; PIGNATELLI, R. Two-phase damage modeling of concrete affected by alkali-silica reaction under variable temperature and humidity conditions. **International Journal of Solids and Structures**, v. 49, n. 23-24, p. 3367-3380, 2012.
- COMI, C.; PEREGO, U. Anisotropic Damage Model for Concrete Affected by Alkali-Aggregate Reaction. **International Journal of Damage Mechanics**, v. 20, n. 4, p. 598-617, 2011.
- CONSTANTINER, D.; DIAMOND, S. Alkali release from feldspars into pore solutions. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 33, n. 4, p. 549-554, 2003.
- COPUROGLU, O.; SCHLANGEN, E. Modelling of effect of ASR on concrete microstructure. **Key Engineering Materials**, v. 348-349, p. 809-812, 2007.
- COUTO, T. A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, 2008.
- COUTO, T.; HASPARYK, N. P.; CARASEK, H.; Chemical and Mineralogical Behavior of Brazilian Aggregates in Expansive ASR. In: 14th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, 2012, Austin, Estados Unidos. **Proceedings...** Austin, 2012. p. 1-10.
- DUAN, A.; ZHANG, D. W.; ALNAGGAR, M. Microplane modeling of ASR effects on concrete structures. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, v. 49, n. 10, p. 1939-1945, 2015.
- DUNANT, C. F.; SCRIVENER, K. L. Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 42, p. 567-576, 2012.
- DUNANT, C. F.; SCRIVENER, K. L. Micro-mechanical modelling of alkali-silica-reaction-induced degradation using the AMIE framework. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 517-525, 2010.
- ESPOSITO, R.; HENDRIKS, M. A. N. A multiscale micromechanical approach to model the deteriorating impact of alkali-silica reaction on concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 70, p. 139-152, 2016.
- FAIRBAIRN, E. M. R.; RIBEIRO, F. L. B.; LOPES, L. E.; TOLEDO-FILHO, R. D.; SILVOSO, M. M. Modelling the structural behaviour of a dam affected by alkali-silica reaction. **Communications in Numerical Methods in Engineering**, v. 22, n. 1, p. 1-12, 2005.
- FARAGE, M. C. R. **Modelagem numérica da expansão por reação álcali-agregado do concreto**. 2000. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
- FARAGE, M. C. R.; ALVES, J. L. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Macroscopic model of concrete subjected to alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 3, p. 495-505, 2004.

- FARAGE, M. C. R.; FAIRBAIRN, E. M. R.; ALVES, J.L.D.: Modelagem e Implementação Computacional do Concreto Sujeito à Reação Álcali Agregado. *In: XXIX JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL*, 2000.
- FERNANDES, I.; BROEKMAN M. A. T. M., Alkali-Silica Reactions: An Overview. Part I. **Metallography, Microstructure, and Analysis**, v. 2, p. 257-267, 2013.
- FERREIRA, A. P. G.; FARAGE, M. C. R.; BARBOSA, F. D. Modelling of the mechanical behavior of concrete affected by alkali-aggregate reaction. **REM – Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 1, p. 35-40, 2013.
- FIGUERÔA, J. P.; ANDRADE, T. **O ataque da Reação Álcali Agregado sobre as estruturas de Concreto**: a descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de pontes e edifícios na Região Metropolitana do Recife. Recife, Ed. Universitária da UFPE, 2007. 228 p.
- FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. A. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A Review of Basic Concepts and Engineering Implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, p. 167-191, 2000.
- GAO, X. X.; MULTON, S.; CYR, M.; SELIER, A. Alkali-silica reaction (ASR) expansion: Pessimism effect versus scale effect. **Cement and Concrete Research**, v. 44, p. 25-33, 2013.
- GLASSER, L. Osmotic pressure and the swelling of gels. **Cement and Concrete Research**, v. 9, n. 4, p. 515 – 517, 1979.
- GLASSER, L. S. D.; KATAOKA, N. The Chemistry of ‘Alkali-aggregate’ Reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 1-9, 1981.
- GRAVEL, C.; BALLIVY, G.; KHAYAT, K.; QUIRION, M.; LACHEME, M. Expansion of AAR concrete under triaxial stresses: Simulation with instrumented concrete block. *In: 11th International Conference of the Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, 2000. **Proceedings...** 2000, p. 959–968.
- GRIMAL, E.; SELIER, A.; PAPE, Y. L. E.; BOURDAROT, E. Creep, shrinkage, and anisotropic damage in alkali-aggregate reaction swelling Mechanism-Part II: Identification of model parameters and application. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 3, p. 236-242, 2008.
- GRIMAL, E.; SELIER, A.; MULTON, S.; BOURDAROT, E. Modeling of structures affected by alkali aggregate reaction. **American Concrete Institute, ACI Special Publication**, v. 266, p. 101-108, 2009.
- GRIMAL, E.; SELIER, A.; MULTON, S.; LE PAPE, Y.; BOURDAROT, E. Concrete modelling for expertise of structures affected by alkali aggregate reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 502-507, 2010.
- GRIMAL, E.; SELIER, A.; PAPE, Y. L. E.; BOURDAROT, E. Creep, shrinkage, and anisotropic damage in alkali-aggregate reaction swelling Mechanism-Part I: A constitutive model. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 3, p. 227-235, 2008.
- GUDMUNDSSON, G.; ASGEIRSSON, H. Parameters affecting alkali expansion in Icelandic concretes. *In: 6th International Congress on Alkali- Silica Reactions*, 1983, Copenhagen, Denmark. **Proceedings...** Denmark, 1983.
- GUTHRIE, G. D.; CAREY, J. W. A thermodynamic and kinetic model for paste-aggregate interactions and the alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 107-120, 2015.

HALL, T.; BEECHAM, S.; BOWES, D.; GRAY, D.; COUNSELL, S. A Systematic Literature Review on Fault Prediction Performance. **IEEE Transactions on Software Engineering**, v. 38, n. 6, p. 1276-1304, 2012.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

HASPARYK, N. P. **Reação Álcali-Agregado no Concreto**. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Volume II.

HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M.; CARASEK, H. Effect of silica fume and rice husk ash on alkali-silica reaction. **ACI Materials Journal**, USA, v. 97, n. 4, p.486-492, 2000.

HASPARYK, N. P.; SILVA, P. N.; BATISTA, D. G.; CARASEK, H.; CAVALCANTI, A. J. T. Assessment of Alkali Silica Reaction in some Concretes from Brazilian Hydroelectric Power Plants. In: 15th International Conference on Alkali Aggregate Reaction, 2015, São Paulo, Brasil. **Proceedings...** São Paulo, 2015. p. 1-10.

HERRADOR, M. F.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; DEL HOYO FERNÁNDEZ-GAGO, R. Mechanical behavior model for ASR-affected dam concrete under service load: formulation and verification. **Materials and Structures**, v. 42, n. 2, p. 201-2012, 2009.

HIGGINS, J. P. T.; GREEN, S. **Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions**. England: The Cochrane Collaboration and John Wiley & Sons, 2011. 673 p.

HOBBS, D. W. The alkali-silica reaction - a model for predicting expansion in mortar. **Magazine of Concrete Research**, v.33, n. 117, p. 208-220, 1981.

HUANG, M.; PIETRUSZCZAK, S. Modeling of Thermomechanical Effects of Alkali-Silica Reaction. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 125, n. 4, p. 476-485, 1999.

HUANG, Q.; GARDONI, P.; TREJO, D.; PAGNOTTA, A. Probabilistic model for steel–concrete bond behavior in bridge columns affected by alkali-silica reactions. **Engineering Structures**, v. 71, p. 1-11, 2014.

ICHIKAWA, T.; MIURA, M. Modified model of alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1291-1297, 2007.

IDEN, J.; METHLIE, L. B.; CHRISTENSEN, G. E. The Nature of Strategic Foresight Research: A Systematic Literature Review. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 116, p. 87-97, 2017.

ISLAM, M. S. Prediction of ultimate expansion of ASTM C 1260 for various alkali solutions using the proposed decay model. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 317-326, 2015.

ISLAM, M. S.; GHAFOORI, N. Evaluation of alkali-silica reactivity using ASR kinetic model. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 270-274, 2013.

KARTHIK M. M.; MANDER, J. B.; HURLEBAUS, S. ASR/DEF related expansion in structural concrete: model development and validation. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 238-247, 2016.

KIM, T.; OLEK, J. Chemical sequence and kinetics of alkali-silica reaction Part II. A thermodynamic model. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, n. 7, p. 2204-2212, 2014.

- KIRKPATRICK, R. J.; KALINICHEV, A. G.; HOU, X.; STRUBLE, L. Experimental and molecular dynamics modeling studies of interlayer swelling: water incorporation in kanemite and ASR gel. **Materials and Structures**, v. 38, n. 278, p. 449-458, 2005.
- KURTIS, K. E., COLLINS, C. L., MONTEIRO, P. J. M. The Surface Chemistry of the Alkali-Silica Reaction: a Critical Evaluation and X-Ray Microscopy, **Concrete Science and Engineering**, v. 4, p. 2-11, 2002.
- LARIVE, C. **Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques**. 1997. Tese (Doutorado) — École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1997.
- LÉGER, P., TINAWI, R. e MOUNZER, N. Numerical Simulation of Concrete Expansion Dams Affected by Alkali-Aggregate Reaction: State-of-the-Art. **Canadian Journal of Civil Engineering**. Canada, v. 22, pp. 692-713, 1995.
- LI, K.; COUSSY, O. Concrete ASR degradation: from material modeling to structure assessment. **Concrete Science and Engineering**, v. 4, p. 35-46, 2002.
- LIANG, T.; MINGSHU, T. Expansion mechanism of alkali-dolomite and alkali-magnesite reaction. **Cement and Concrete Composites**, USA, v. 21, n. 5-6, pp. 361-373, 1999.
- LIAO, Y.; CHEN, D.; LIU, Z.; OUYANG, F.; HOU, L. Elastoplastic-damage compression constitutive model for cementitious material subjected to alkali-silica reaction. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 12, n. 5, p. 158-166, 2014.
- LOPES, L. E. **Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação a barragens de concreto**. 2004. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- LU, D.; FOURNIER, B; GRATAN-BELLEW, P.E. Evaluation of Accelerated Test Methods for Determining Alkali-silica reactivity of Concretes Aggregates. **Cement & Concrete Composites**, USA, v. 28, p. 546-554, 2006.
- MADUREIRA, E. L. O. **Simulação numérica do comportamento mecânico de elementos de concreto armado afetados pela reação álcali-agregado**. 2007. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2007.
- MATHER, B. Modeling the structural effects of alkali-aggregate reactions on reinforced-concrete. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 2, p. 211-212, 1992.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3. ed. United State of America: McGraw-Hill, 2006. 660 p.
- METALSSI, O. O.; SEIGNOL, J. F.; RIGOBERT, S.; TOUTLEMONDE, F. Modeling the cracks opening-closing and possible remedial sawing operation of AAR-affected dams. *Engineering Failure Analysis*, v. 36, p. 199-648, 2014.
- MORANVILLE-REGOURD, M. Modelling of expansion induced by ASR — New approaches. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 415-425, 1997.
- MULTON, S.; SELIER, A.; CYR, M. Chemo-mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion. **Cement and Concrete Research**, v.39, n. 6, p. 490-500, 2009.
- MULTON, S.; TOUTLEMONDE, F. Effect of Applied Stresses on Alkali-silica-Reaction-induced Expansions. **Cement and Concrete Research**, USA, v.36, p.912-920, 2006.

NASCIMENTO, K. R.; ALENCAR, M. H. Management of Risks in Natural Disasters: A Systematic Review of the Literature. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 44, p. 347-359, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo, Brasil: PINI, 1997.

NÓBREGA, L. O. **Modelagem hidro-mecânica de estruturas de concreto afetadas pela reação álcali-agregado**. 2008. 99 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

OKA, K.; YOSHIDA, H.; MATSUSHIMA, M.; YOKOTA, M. Modeling of crack occurrence in concrete deteriorated by alkali aggregate reaction and proposal of analysis method. **Journal of the Japan Society of Civil Engineering**, v. 63, n. 4, p. 744-757, 2007.

OLIVEIRA, I.; CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. New Unreacted-Core Model to Predict Pyrrhotite Oxidation in Concrete Dams. **Journal of Materials in Civil Engineering**, USA, v. 25, p. 372-381, 2013.

OLIVEIRA, J. R. S. **Modelagem da expansão do concreto devido à RAA com decaimento do módulo de elasticidade**. 2013. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2013.

OWSIAK, Z.; ZAPALA-SLAWETA, J.; CZAPIK, P. Diagnosis of concrete structures distress due to alkali-aggregate reaction. **Bulletin of the polish academy of sciences - Technical sciences**, Kielce, Poland, v. 63, n. 1, 2015.

PAN, J. W.; FENG, Y. T.; JIN, F.; ZHANG, C. Numerical prediction of swelling in concrete arch dams affected by alkali-aggregate reaction. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 17, n. 4, p. 231-247, 2013.

PAN, J. W.; FENG, Y. T.; WANG, J. T.; SUN, Q. C.; ZHANG, C. H.; OWEN, D. R. J. Modeling of alkali-silica reaction in concrete: a review. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1 -18, 2012.

PAN, J. W.; XU, Y. J.; JIN, F. Chemo-damage model for concrete anisotropic expansion caused by alkali-aggregate reaction. **Applied Mechanics and Materials**, 204-208, p. 3230-3235, 2012.

PAN, J.; FENG, Y. T.; JIN, F.; XU, Y.; SUN, Q.; ZHANG, C.; OWEN, D. R. J. Meso-scale particle modeling of concrete deterioration caused by alkali-aggregate reaction. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v.37, n.16, p. 2690-2705, 2013.

PAN, J.; FENG, Y.; XU, Y.; JIN, F.; ZHANG, C.; ZHANG, B. Chemo-damage modeling and cracking analysis of AAR-affected concrete dams. **Science China Technological Sciences**, v. 56, n. 6, p. 1449-1457, 2013.

PAN, J.; XU, Y.; JIN, F.; ZHANG, C. Modeling of long-term behavior of concrete dams affected by alkali-aggregate reaction. **Journal of Hydroelectric Engineering**, v. 33, n. 5, p. 169-176, 2014.

PANTAZOPOULOU, S. J.; THOMAS, M. D. A. Modeling stress-strain behavior of concrete damaged by alkali-aggregate reaction (AAR). **ACI Structural Journal**, v. 96, n. 5, p. 790-799, 1999.

- PAPPALARDO JR., A. **Uma metodologia para a modelagem matemática de barragens de concreto afetadas pela reação álcali-agregado**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1998.
- PAPPALARDO JR., A.; PAULETTI, R. M. O.; PIMENTA, P. M. Simulação Numérica da Reação Álcali-Agregado em Barragens de Concreto. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, Ano 1, n. 1, p. 169-180, 1999.
- PARVINI, M.; PIETRUSZCZAK, S.; GOCEVSKI, V. Seismic Analysis of Hydraulics Structures Affected by Alkali-aggregate Reaction: a Case Study. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 28, p. 332-338, 2001.
- PESAVENTO, F.; GAWIN, D.; WYRZYKOWSKI, M.; SCHREFLER, B. A.; SIMONI, L. Modeling alkali-silica reaction in non-isothermal, partially saturated cement based materials. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 225-228, p. 95-115, 2012.
- PIETRUSZCZAK, S.; USHAKSARAEI, R.; GOCEVSKI, V. Modelling of the effects of alkali-aggregate reaction in reinforced concrete structures. **Computers and Concrete**, v. 12, n. 5, p. 627-650, 2013.
- PIGNATELLI, R.; COMI, C.; MONTEIRO, P. J. M. A coupled mechanical and chemical damage model for concrete affected by alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 53, p. 196-210, 2013.
- POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão da vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**, 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- POSTERLLI, M. C. **Modelagem da expansão devido à reação álcali-agregado (RAA) de concreto armado e reforçado com fibras**. 2017. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 2017.
- POYET, S.; SELLIER, A.; CAPRA, B.; FORAY, G.; TORRENTI, J. M.; COGNON, H.; BOURDAROT, E. Chemical modelling of Alkali Silica reaction: Influence of the reactive aggregate size distribution. **Materials and Structures**, v. 40, n. 2, p. 229-239, 2007.
- PUATATASANANON, W.; SAOUMA, V. Chemo-mechanical micro model for alkali-silica reaction. **ACI Materials Journal**, v. 110, p. 67-78, 2013.
- RAMYAR, K.; TOPAL, A.; ANDIÇ, O. Effects of Aggregate Size and Angularity on Alkali-Silica Reaction. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 35, p. 2165-2169, 2005.
- RODRIGUES, E. C. **Análise numérica do efeito de fatores influentes da reação álcali-agregado no desempenho de estruturas de concreto**. 2014. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BEDOYA, M. A. B.; BASTIEN, J.; DUCHESNE, J. Use of Damage Rating Index to Quantify Alkali-Silica. **ACI Materials Journal**, v. 113, n. 4, p. 395-407, 2016.
- SANCHEZ, L. F. M.; MULTON, S.; SELLIER, A.; CYR, M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M. Comparative study of a chemo-mechanical modeling for alkali silica reaction (ASR) with experimental evidences. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 301-315, 2014.

SAOUMA, V. E.; MARTIN, R. A.; HARIRI-ARDEBILI, M. A.; KATAYAMA, T. A mathematical model for the kinetics of the alkali-silica chemical reaction. **Cement and Concrete Research**, v.68, p. 184-195, 2015.

SAOUMA, V.; PEROTTI, L. Constitutive model for alkali-aggregate reactions. **ACI Materials Journal**, v. 103, n. 3, p. 194-202, 2006.

SELLIER, A.; BOURNAZEL, J. P.; MEBARKI, A. Modeling the alkali-aggregate reaction with descriptions of the local destructive phenomena involved. **Materials and Structures**, v. 28, n. 181, p. 373-383, 1995.

SHAH, H. M.; CHUNG, K. C. Archie Cochrane and His Vision for Evidence-based Medicine. **Plastic Reconstruction Surgery**, v. 124, n. 3, p. 982-988, 2010.

SILVA, C. M. **Estudo da potencialidade de compostos a base de silanos no combate da reação álcali-agregado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

SILVEIRA, J. F. A. A expansão do concreto em barragens afetadas pela RAA e a importância das tensões confinantes. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: 1997. 380 f. p. 285-291.

ULM F. J.; COUSSY O.; KEFEI L.; LARIVE C. Thermo-chemo-mechanics of ASR expansion in concrete structures. **Journal of Engineering Mechanics**, USA, v. 126, p. 233–242, 2000.

UNTERKALMSTEINER, M.; GORSCHKE, T.; ISLAM, A. K. M. M.; CHENG, C. K.; PERMADI, R. B.; FELDT, R. Evaluation and Measurement of Software Process Improvement – A Systematic Literature Review. **IEEE Transactions On Software Engineering**, v. 38, n. 2, p. 398-424, 2012.

VILELA, J.; CASTRO, J.; MARTINS, L. E. G.; AND GORSCHKE, T., Integration Between Requirements Engineering and Safety Analysis: A Systematic Literature Review. **The Journal of Systems and Software**, v. 125, p. 68-92, 2017.

WINNICKI, A.; PIETRUSZCZAK, S. On Mechanical Degradation of Reinforced Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 134, n. 8, p. 611–627, 2008.

YANAGIHARA, K.; YOSHIDA, H. Modeling of expansion behavior due to alkali-silica reaction under complicated stress. *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, v. 62, p. 211-217, 2014.

ZAHIRA, S. N.; AISSA, A. Modeling the alkali-aggregate reaction expansion in concrete. **Computers and Concrete**, v. 16, n. 1, p. 37-48, 2015.

ZHANG, C.; WANG, A.; TANG, M.; WU, B.; ZHANG, N. Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 29, n. 9, p. 1393-1396, 1999.

BIBLIOGRAFIA

- ALNAGGAR, M.; CUSATIS, G.; DI LUZIO, G. A discrete model for alkali-silica reaction in concrete. *In: 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 2013, Toledo, Espanha. **Proceedings...** Toledo, 2013. p. 1315-1326.
- ANAÇ, C.; SCHLANGEN, E.; ÇOPUROĞLU, O. Lattice model implementation on alkali silica reaction gel expansion in a reacted concrete medium. *In: 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, 2012, Cape Town, África do Sul. **Proceedings...** Cape Town, 2012. p. 464-469.
- BANGERT, F.; KUHL, D.; MESCHKE, G. Modeling of concrete deterioration by alkali-silica reaction. *In: Computational Modelling of Concrete Structures, EURO-C 2003 Conference*, 2003, St. Johann im Pongau, Áustria. **Proceedings...** St. Johann im Pongau, 2003. p. 361-371.
- BATISTA, D. G. **Investigação da deterioração de concretos de UHES por reações com os agregados**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, 2013.
- BAZANT, Z. P.; STEFFENS, A. A mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete. **Cemente and Concrete Research**, USA, v. 30, n. 3, p. 419–428, 2000.
- Bazant, Z. P.; Zi, G.; Meyer, C. Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 126, n. 3, p. 226–232, 2000.
- BÉRUBÉ, M. A.; DURAND, B.; VÉZINA, D.; FOURNIER, B. Alkali-Aggregate Reactivity in Québec (Canada). **Canadian Journal of Civil Engineering**, Canada, v. 27, p. 226-245, 2000.
- BURLION, N.; SELLIER, A.; BOURNAZEL, J. P. Pessimism modeling of alkali-aggregate reaction with heterogeneities description. *In: 7th International Conference on Applications of Statistics and Probability to Civil Engineering*, 1992, Paris, França. **Proceedings...** Paris, 1992. p. 261-268.
- CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P.; BOURDAROT, E. Modeling of Alkali Aggregate Reaction effects in concrete dams. *In: 2nd International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams*, 1995, Chattanooga, Estados Unidos. **Proceedings...** Chattanooga, 1995. p. 441-455.
- CAPRA, B.; SELLIER, A. Mechanical modelling of Alkali-Aggregate Reaction in concrete structures. *In: 4th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 2001, Cachan, França. **Proceedings...** Cachan, 2001. p. 183-190.
- COMBY, I.; BAY, F.; BOUCHARD, P. O.; BERNARD, E.; GARCIA-DIAZ, E. 3D numerical modeling of damage and fracture due to alkali-silica reaction in concrete structures. *In: Computational Modelling of Concrete Structures, EURO-C 2006 Conference*, 2006, Mayrhofen, Áustria. **Proceedings...** Mayrhofen, 2006. p. 523-532.
- COMBY-PEYROT, I.; BERNARD, F.; BOUCHARD, P. O.; BAY, F.; GARCIA-DIAZ, E. Development and validation of a 3D computational tool to describe concrete behaviour at mesoscale. Application to the alkali-silica reaction. **Computational Materials Science**, v. 46, n.4, p. 1163–1177, 2009.

- COMI, C.; PIGNATELLI, R. A three-phase model for damage induced by ASR in concrete structures. *In: 4th International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*, 2011, Kos, Grécia. **Proceedings...** Kos, 2011. p. 55-66.
- COMI, C.; PIGNATELLI, R. On damage modeling of concrete affected by alkali-silica reaction in the presence of humidity gradient. *In: XVIII GIMC Conference*, 2010, Siracusa, Itália. **Proceedings...** Siracusa, 2010.
- CURTIS, D. D. Modeling of AAR affected structures using the GROW3D FEA program. *In: 2nd International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams*, 1995, Chattanooga, Estados Unidos. **Proceedings...** Chattanooga, 1995. p. 457-478.
- DE BEAUCHAMP, T.; GOGUEL, B. Gonflement et projet de confortement du barrage de Chambon. *In: International Conf. AAR Hydro. Plants and dams*, 1992, Fredericton, Canada. **Proceedings...** Fredericton, 1992.
- DIAB, Y.; PRIN, D. Alkali-aggregate reaction structural effects - a finite-element model. *In: 9th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete*, 1992, Londres, Inglaterra. **Proceedings...** London, 1992. p. 261-268.
- DIAMOND S., THAULOW N. A study of expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate, **Cement and Concrete Research**, USA, v.44, p. 591-607, 1974.
- ELGES, H.; GEERTSEMA, A.; LECOCQ, P.; OOSTHUIZEN, C. Detection, monitoring and modelling of alkali-aggregate reaction in Kouga Dam (South Africa). *In: 2nd International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams*, 1995, Chattanooga, Estados Unidos. **Proceedings...** Chattanooga, 1995. p. 161-172.
- ESPOSITO, R.; HENDRIKS, M. A. N. Simulating the deteriorating effect of the alkali-silica reaction in concrete via a micro-poro fracture mechanical model. *In: CONCREEP 10*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015, Vienna, Áustria. **Proceedings...** Vienna, 2015. p. 118-127.
- ESPOSITO, R.; HENDRIKS, M. A. N. Modeling of alkali-silica reaction in concrete: a multiscale approach for structural analysis. *In: Computational Modelling of Concrete Structures - EURO-C 2014*, 2014, St. Anton am Arlberg, Áustria. **Proceedings...** St. Anton am Arlberg, 2014. p. 87-95.
- ESPOSITO, R.; HENDRIKS, M. A. N. Multiscale material model for ASR-affected concrete structures. *In: 12th International Conference on Computational Plasticity - Fundamentals and Applications*, 2013, Barcelona, Espanha. **Proceedings...** Barcelona, 2013. p. 490-501.
- FENG N.Q.; HAO T. H.; FENG X. K. Study of the alkali reactivity of aggregates used in Beijing. **Magazine of Concrete Research**, v. 54, n. 4, p. 233-237, 2002.
- FURUSAWA Y.; OHGA, H.; UOMOTO, T. An analytical study concerning prediction of concrete expansion due to alkali-reaction. *In: 3rd International Conference on Durability of Concrete*, 1994, Nice. **Proceedings...** ACI SP145, 1994, p. 757-779.
- GAWIN, D.; GRYMIN, W.; PESAVENTO, F.; SIMONI, L.; SCHREFLER, B. A. Modelling of concrete degradation due to alkali-silica reaction in variable hygro-thermal conditions. *In: 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 2012, Vienna, Áustria. **Proceedings...** Vienna, 2012. p. 7802-7821.

GROVES, G.; ZHANG, X. A dilatation model for the expansion of silica glass/opc mortars. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 20, n. 3, p. 453 – 460, 1990.

HUANG, M.; PIETRUSZCZAK, S. Modeling of thermomechanical effects of alkali-silica reaction. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 125, n. 4, p. 476-485, 1999.

HUANG, Q.; GARDONI, P.; TREJO, D.; PAGNOTTA, A. Probabilistic model for steel-concrete bond behavior of bridge columns considering the effect of alkali-silica reaction. In: 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, 2013, Nova York, Estados Unidos. **Proceedings...** New York, 2013. p. 3717-3724.

KARTHIK, M. M.; MANDER, J. B.; HURLEBAUS, S. C-STM modeling of bridge piers without and with ASR/DEF deterioration. In: Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession, 2013, Pittsburgh, Estados Unidos. **Proceedings...** Pittsburgh, 2013. p. 447-456.

LAGERBLAD, B.; TRÄGARDH, J. Slowly reacting aggregates in Sweden – Mechanisms and conditions for reactivity in concrete. In: 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 1992, London, 1992, UK. **Proceedings...** London, UK: The Concrete Society Ed., 1992, p. 570-578.

LEMARCHAND, E.; DORMIEUX, L.; ULM, F. J. A micromechanical approach to the modeling of swelling due to alkali-silica reaction. In: International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials, 2001, Austin (Texas), Estados Unidos. **Proceedings...** Austin, 2001.

LI, K.; COUSSY, O.; LARRIVE, C. Modélisation chimico-mécanique du comportement des bétons affectés par la réaction d'alcali-silice. Expertise numérique des ouvrages d'art dégradés. In: Etudes et recherches des LPC, OA43, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2004, Paris, França. **Proceedings...** Paris, 2004.

LIAUDAT, J. L.; CAROL, I. Diffusion-reaction model for alkali-silica reaction in concrete. Computational Plasticity XII: Fundamentals and Applications. In: 12th International Conference on Computational Plasticity - Fundamentals and Applications, 2013, Barcelona, Espanha. **Proceedings...** Barcelona, 2013. p. 479-489.

LIAUDAT, J. L.; CAROL, I. Diffusion-reaction model for ASR: formulation and 1D numerical implementation. In: Computational Modelling of Concrete Structures - EURO-C 2014, 2014, St. Anton am Arlberg, Áustria. **Proceedings...** St. Anton am Arlberg, 2014. p. 639-648.

LIAUDAT, J.; MARTÍNEZ, A.; LÓPEZ, C. M.; CAROL, I. Numerical modelling of ASR expansions in concrete. In: CONCREEP 10 Reston. VA: American Society of Civil Engineers, 2015, Viena, Áustria. **Proceedings...** Vienna 2015. p. 445-454.

LIU, M.; JACOBS, L. J.; QU, J. A chemo-mechanical model for the acoustic nonlinearity change in concrete with alkali-silica reactions. In: 39th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), 2012, Denver, Estados Unidos. **Proceedings...** Denver, 2012. p. 1325-1332.

MATSUSHIMA, M.; YOKOTA, M.; NAKAGAWA, H. Study on numerical model of cracking induced alkali silica reaction. In: 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2009, Iseshima, Japão. **Proceedings...** Iseshima, 2009. p. 1045-1050.

- MAY, I.M.; WEN, H.X.; COPE, R. J. The modeling of the effects of AAR expansion on reinforced-concrete members. *In: 9th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete*, 1992, Londres, Inglaterra. **Proceedings...** London, 1992. p. 638-647.
- ORLOWSKI, E. A. G.; LACTEC; LACERDA, E. L. A. Avaliação e Monitoramento de Trincas em Barragens de Concreto Estudo de Caso UHE Mascarenhas. *In: II CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA*, 2003, Bahia. **Anais do II CITENEL**. p. 462-464.
- PARVINI, M.; PIETRUSZCZAK, S.; GOCEVSKI, V. Seismic Analysis of Hydraulics Structures Affected by Alkali-aggregate Reaction: a Case Study. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 28, p. 332-338, 2001.
- PETERSON, M. G.; ULM, F-J. Chemoplasticity of the Alkali-Silica Reaction in Concrete: Modeling of Stress-Induced Anisotropy. **Report, Department of Civil & Environmental Engineering** – School of Engineering, Massachusetts, EUA, 2000.
- ROELFSTRA, P. E.; SADOUKI, H.; WITTMANN, F. H. Le béton numérique. **Materials and structures**, v. 107, p. 309-383, 1985.
- SCHLANGEN, E.; COPUROGLU, O. Modeling of expansion and cracking due to ASR with a 3D lattice model. *In: Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FramCos7)*, 2010, Seoul, Coréia. **Proceedings...** Seoul, 2010.
- SEIGNOL, J-F.; GODART, B. A collective effort to propose practical guidance on use of numerical models to re-assess AAR-affected structures. *In: 14th International Conference on AAR in concrete*, 2012, Austin (Texas), Estados Unidos. **Proceedings...** Austin, 2012.
- SEIGNOL, J-F.; OMIKRINE-METALSSI O.; BAGHADADI, N.; TOUTLEMONDE, F. From AAR to DEF: numerical modeling of structures affected by expansive reactions in concrete, *In: 14th International Conference on AAR in concrete*, 2012, Austin (Texas), Estados Unidos. **Proceedings...** Austin, 2012.
- SERÊGA, S.; WINNICKI, A.; NORYS, F. Modelling of alkali-silica reaction (ASR)—concrete structures. *In: CONCREEP 10* Reston. VA: American Society of Civil Engineers, 2015, Vienna, Áustria. **Proceedings...** Vienna, 2015. p. 270-279.
- SHAH, H. M.; CHUNG, K. C. Archie Cochrane and His Vision for Evidence-based Medicine. **Plastic Reconstruction Surgery**, v. 124, n. 3, p. 982-988, 2010.
- SHIN, J. H.; JEE, N. Y.; STRUBLE, L. J.; KIRKPATRICK, R. J. Modeling alkali-silica reaction using image analysis and finite element analysis. *In: 1st International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials*, 2011, Haikou, China. **Proceedings...** Haikou, 2011. p. 1050-1053.
- SILVEIRA, A. L. Z. P. **Estudo da reação álcali-agregado em rochas carbonáticas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 2006.
- SUWITO, A.; JIN, W.; XI, Y.; MEYER, C. A mathematical model for the pessimum effect of ASR in concrete. **Concrete Science and Engineering**, USA, v. 4, p. 23–34, 2002.
- TAKAHASHI, Y.; SHIBATA, K.; MARUNO, M.; MAEKAWA, K. Uniaxial restraint tests under high-stress conditions and a chemo-hygral model for ASR expansion. *In: CONCREEP 10*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015, Viena, Áustria. **Proceedings...** Vienna, 2015. p. 1061-1065.

TAKAHASHI, Y.; TANAKA, Y.; MAEKAWA, K. Chemo-Hygral model for ASR expansion and its effects on fatigue lives of bridge slabs. *In: 8th International Conference on Computational Plasticity - Fundamentals and Applications*, 2015, Barcelona, Espanha. **Proceedings...** Barcelona, 2015. p. 944-955.

TIMOTHY, J. J.; NGUYEN, M. N.; MESCHKE, G. Computational modeling of concrete degradation due to alkali-silica reaction. *In: CONCREEP 10*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015, Vienna, Áustria. **Proceedings...** Vienna 2015. p. 194-201.

UOMOTO, T.; FURUSAWA, Y.; OHGA, H. A Simple Kinetics Based Model for Predicting Alkali-Silica Reaction. *In: 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, 1992, Londres, Inglaterra. **Proceedings...** Londres, 1992. p. 1077-1084.

WEN, H. X. Plasticity and damage mechanics models for concrete with alkali-aggregate reaction. *In: 4th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 2001, Cachan, França. **Proceedings...** Cachan, 2001. p. 293-299.

WIEKER, W.; HUBERT, D.; HEIDEMANN, D.; EBERT, R. Some Experiences in Chemical Modelling of the Alkali-Silica Reaction. *In: 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, 2000, Québec, Canadá. **Proceedings...** Québec, 2000. p. 119-128.

WINNICKI, A.; PIETRUSZCZAK, S. A material model for alkali-silica reaction in reinforced concrete. *In: Computational Modelling of Concrete Structures, EURO-C 2006 Conference*, 2006, Mayrhofen, Áustria. **Proceedings...** Mayrhofen, 2006. p. 657-664.

WINNICKI, A.; SERE; NORYS, F. Chemoplastic modelling of Alkali-Silica Reaction (ASR). *In: Computational Modelling of Concrete Structures - EURO-C 2014*, 2014, St. Anton am Arlberg, Áustria. **Proceedings...** St. Anton am Arlberg, 2014. p. 765-774.

XI, Y.; SUWITO, A.; WEN, X.; MEYER, C.; JIN, W. Testing and modeling alkali-silica reaction and the associated expansion of concrete. *In: International Workshop in Honor of Professor Z. P. Bazant 60th Birthday*, 1998, Paris, França. **Proceedings...** Paris, 1998.

XI, Y.; SUWITO, A.; MEYER, C.; HIN, W. Testing and modeling of alkali-silica reaction and the associated expansion of concrete. **Mechanics of quasi-brittle materials and structure**, Paris, p. 217-232, 1999.

ANEXOS

Neste anexo será apresentado a sistematização dos 21 modelos selecionados e analisados para a composição da presente dissertação, sendo os 16 primeiros referentes às modelações preditivas de dano, e o restante, do modelo 17 ao 21, referentes à modelação geral da reação álcali-sílica.

1 - A multiscale micromechanical approach to model the deteriorating impact of alkali-silica reaction on concrete	
Autores (Ano)	Esposito e Hendriks (2016)
Modelagem	Modelagem Micromecânica baseada em pressão
Natureza da Análise	Analítica
Escala de Análise	Micro e Macroscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE)
Base	Teoria mecânica da fratura e dos microporos
Tipo de Análise	Carregamento uniaxial externo e pressão interna
Software	Não informado
Principais dados de entrada	<u>Propriedades macroscópicas do concreto intacto</u> Y_{in} – módulo de Young do Concreto (MPa) $f_{t,in}$ – resistência à tração do concreto (MPa) <u>Propriedades da matriz sólida</u> Y_{cem} – módulo de Young da pasta de cimento (MPa) Y_{agg} – módulo de Young dos agregados (MPa) $\nu_{cem} = \nu_{agg}$ – coeficiente de Poisson ϕ_{agg} – fração de volume dos agregados Y_m – módulo de Young da matriz sólida (MPa) ν_m – coeficiente de Poisson da matriz sólida <u>Estado inicial das fissuras</u> $\phi_{in} = 3\phi_{ci,in}$ – fração inicial de volume das fissuras c_i – espessura/raio das fissuras (mm) $2c_i$ – abertura das fissuras (mm)
Dados calibrados	a_i – plano do raio da fissura n_i – número de fissuras por unidade de volume (mm^{-3}) X_i – proporção do raio da fissura – $f(c_i, a_i, Y_{in})$ Φ_{ci} – fração de volume – $f(c_i, a_i, n_i)$ ϵ_i – densidade da fratura – $f(a_i, n_i)$ g_f – energia da fratura microscópica (N/mm) – $f(\epsilon_i, a_i, n_i, f_{t,in})$
Considerações dos dados de entrada	g_f – parâmetro constante do material Y_{in} e $f_{t,in}$ – teste de compressão cúbica aos 28 dias Y_{agg} – teste de nanoindentificação Y_{cem} – adotado como duas vezes menor que o Y_{agg} $\nu_{cem} = \nu_{agg}$ – adotado 0,20 ϕ_{agg} – proporcionamento $2c$ – adotado constante 0,10 mm ϕ_{in} – 70% da capilaridade porosa calculada ν_m – adotado como igual ao do cimento e agregado
Dados de Saída	Caracterização da deterioração macroscópica do concreto: • diagrama expansão x degradação do módulo de elasticidade, resistência à compressão e à tração • diagrama tensão x deformação
Validação	• Comparação dos resultados com testes laboratoriais com amostras retiradas da ponte Nautesund na Noruega, e com amostras com o mesmo proporcionamento • Comparação com Model Codes CEB-FIP (1993) e Fib (2010)
Conclusões dos autores	• Superestima a degradação das propriedades mecânicas em função da expansão • A relação entre rigidez e decaimento da resistência é corretamente aproximada
Principais referências para o modelo	Dormieux <i>et al.</i> (2006)

2 – Lattice Discrete Particle Modeling of acoustic nonlinearity change in accelerated alkali silica reaction (ASR) tests	
Autores (Ano)	Alnaggar <i>et al.</i> (2015)
Modelagem	Modelagem discreta de partículas em rede (LDPM)
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Mesoscópica
Aplicação do Modelo	Barras de Argamassa
Base	Teoria da acústica linear
Tipo de Análise	Medições ultrassônicas não lineares para a detecção de danos no concreto
Software	Não informado
Principais dados de entrada	<u>Propriedades do comportamento do concreto</u> d_0 – tamanho mínimo do agregado (mm) d_a – tamanho máximo do agregado (mm) n_F – fuller curve exponent c – teor de cimento (Kg/m^3) w/c – relação água cimento a/c – relação agregado cimento <u>Parâmetros LDPM</u> E_0 – módulo elástico normal E_d – módulo normal densificado α – taxa entre a rigidez elástica normal e de cisalhamento σ_t – força de tração (MPa) n_t – softening exponent σ_s – força de cisalhamento σ_{c0} – força de compressão H_{c0} – módulo de enrijecimento inicial k_{c0} – taxa de deformação transicional μ_0 – atrito inicial μ_{∞} – atrito assintótico σ_{N0} – tensão transitória (MPa) k_{c1} – parâmetro de deformação k_{c2} – parâmetro de dano <u>Parâmetros da difusão de íons</u> T – temperatura atual analisada T_0 – temperatura de referência D – diâmetro do agregado R – constante universal dos gases ρ_w – densidade da água r_w – relação água-sílica c_s – teor de sílica k_g – parâmetro do material (kg/m^3) D_{a0} – coeficiente de difusão mín. com a concentração zero de sílica (m^2/dia) D_{al} – coeficiente de difusão máx. com a concentração máx. de sílica (m^2/dia) c^a – concentração de álcali c^{max} – concentração específica de álcali com D_{al} (mol/l) ca_0 – teor de álcali calculado onde não ocorreu expansão (kg/m^3) cal – teor de álcali suficiente para completar a reação álcali-sílica (kg/m^3) C_i – difusividade da água próxima ao agregado (m^2/dia) z – posição da frente de difusão E_{ag} – energia de ativação para processo de difusão k_a e k_g – parâmetros do material k_i – constante de proporcionalidade E_{ai} – energia de ativação do processo de absorção δ – distância média para transporte da água do concreto em volta do agregado para o gel da RAS

2 – Lattice Discrete Particle Modeling of acoustic nonlinearity change in accelerated alkali silica reaction (ASR) tests	
Dados calibrados	l_t – comprimento característico da tração (mm) - $f(E0, Gt, \sigma)$ w_e – teor de água ao redor do agregado - $f(w/c)$ k_s – parâmetro do material - $f(w_e, r_w, c_s)$ ($m^5 \cdot kg^{-1}/dia$) M_g – massa de gel gerada - $f(k_a, k_g, D, z_k)$ M_i – teor de água absorvida pelo gel - $f(C_i, \delta, N, M_g, E_{ai}, R, T)$ r_i – aumento do raio do agregado - $f(M_i, \rho_w, r)$ D_a – coeficiente de difusão não-linear - $f(D_{al}, D_{ao}, c^a, c^{max}, n)$
Considerações dos dados de entrada	Os parâmetros do LDPM são obtidos através das curvas carregamento-deslocamento referentes a 5 testes diferentes: (1) compressão hidrostática (2) Compressão não confinada (3) testes de ruptura (4) compressão triaxial com baixo confinamento (5) compressão triaxial com alto confinamento
Dados de Saída	• Padrão e evolução das fissuras a partir da correlação com o Parâmetro Acústico Não-Linear • Correlação da energia da fratura e força de tração no grau de fissuração • Deterioração das propriedades mecânicas do concreto para expansão livre e com aplicação de carga
Validação	• Comparação dos resultados com testes laboratoriais • Vários dados utilizados já foram validados em outros estudos
Conclusões dos autores	• O LPDM pode prever propriamente a expansão induzida pela RAS com a variação dos teores de álcali em espaço e tempo • Correlações mais precisas quando se considera carregamento
Principais referências para o modelo	• Alnaggar, Cusatis e Luzio (2013) • Cusatis <i>et al.</i> (2011)

3 – An application to the diffusion equation in a model for the damage in concrete due to alkali-silica reaction	
Autores (Ano)	Balbo <i>et al.</i> (2015)
Modelagem	Modelagem de dano químico
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Mesoscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE)
Base	• Princípios da cinética química • Método das diferenças finitas
Tipo de Análise	Análise é dividida em 3 etapas: 1) formação do gel; 2) difusão do gel; 3) dano químico
Software	Software de Programação Matemática e Gráfica com base Matricial - MATLAB
Principais dados de entrada	A0 – concentração inicial de sílica X0 – concentração inicial de silanol [B]0 – concentração dos íons hidroxila [C]0 – concentração de álcalis (sódio ou potássio) k1 e k2 – constantes de velocidade D_{AB} – binário de difusividade de massa (m²/s) ρA – massa específica das espécimes A (gel) (Kg/m³) ρ – densidade do concreto intacto (kg/m³) ρc – densidade do concreto ρA – densidade de gel formado devido à RAS εp – porosidade da partícula τ – tortuosidade da partícula
Dados calibrados	[Xsil] – concentração de silanol formado – $f(A0, k1, k2, [B]0, [C]0, X0)$ [Xgel] – concentração de gel formado – $f(A0, k1, k2, [B]0, [C]0, X0)$ nA – taxa de massa das espécimes por unidade de volume devido às reações químicas kg/(s*m³) – $f([Xgel])$ ρ~ - densidade no estado de deterioração – $f(ρA, ρc)$ Δv – variação volumétrica – $f(ρ, ρc, ρA)$ d – dano químico – $f(Δv)$
Considerações dos dados de entrada	k1 e k2 – obtidos experimentalmente por meio do gráfico de variação de massa x tempo [Xsil] – proporcional à sua formação na primeira etapa da reação química e consumo na segunda etapa [Xgel] – formado em ambos os estágios da reação química D_{AB} – adotado devido a falta de dados experimentais ρ = ρc
Dados de Saída	Dano químico no RVE considerado a partir da densidade de gel formada e variação de volume
Conclusões dos autores	• Quanto maior a quantidade de agregados, a quantidade de gel formada é maior, ocasionando um aumento no dano químico no VER; • a quantidade de gel encontrada pode ser usada para estipular a tensão e deformação associadas com o processo químico.
Principais referências para o modelo	• Larive (1997) • Pesavento <i>et al.</i> (2012) • Pienezzer (2013)

4 – Comparative study of a chemo–mechanical modeling for alkali silica reaction (ASR) with experimental evidences	
Autores (Ano)	Sanchez <i>et al.</i> (2014)
Modelagem	Modelagem químico-mecânica
Natureza da Análise	Númerica
Escala de Análise	Microscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE)
Software	Software de computação numérica e científica – FORTRAN
Principais dados de entrada	Agregados Nível de reatividade (quantidade de sílica disponível); Granulometria das partículas; Módulo de elasticidade e resistência à tração. Pasta de cimento relação água/cimento; teor de álcalis; porosidade; Módulo de elasticidade e resistência à tração. Concreto tc – espessura da zona porosa em volta das partículas de agregado Dagg – difusão de álcalis F – coeficiente de fixação Vgel – volume molar do gel da RAS Ei – módulo de elasticidade no tempo i Eo – módulo de elasticidade para concreto não afetado (ex.: 28 dias)
Dados calibrados	Porosidade da pasta de cimento – adotada como 15%; tc – valor em função das curvas de expansão vs. tempo; Dagg – conforme trabalhos da literatura, valor adotado de 4.0E-13m²/s; F – valor em função das curvas de expansão vs. tempo; Vgel – conforme literatura, valor adotado de 0.49E-4m³/mol dt – fator de dano na tração = $1 - (Ei/Eo)$ dc – fator de dano na compressão = $1 - (1 - dt)^{0.15}$
Considerações dos dados de entrada	Para obtenção dos dados, foram realizados os seguintes testes: • teste de rigidez e módulo de elasticidade • índice de classificação dos danos (análise petrográfica semi-quantitativa) • teste de resistência à compressão • teste de resistência à tração
Dados de Saída	Dano às propriedades físicas do concreto: • gráficos de expansão vs. tempo • gráficos do dano a resistência à tração e à compressão vs. tempo
Validação	Comparação com testes laboratoriais
Conclusões dos autores	• Quanto maior a resistência do concreto e teor de álcalis por m³ de concreto, mais rápido deu-se o desenvolvimento das expansões • Os resultados do modelo podem claramente se encaixar com o comportamento da expansão e predizem razoavelmente bem o dano (resultados da compressão e tração) das misturas de concreto estudadas • Em termos de danos devido à tensão de tração, comparando os resultados do modelo com os de laboratório, verifica-se que o modelo previu bem as perdas de resistência para expansões baixas e médias, enquanto que para as altas, os resultados de laboratório se estabilizaram e os do modelo continuaram crescendo • Quanto ao dano à compressão, o modelo mostrou resultados de acordo com os testes de laboratório para altos níveis de expansão, enquanto que para os menores mostrou uma correlação um pouco menos em consonância para agregados graúdos

4 – Comparative study of a chemo–mechanical modeling for alkali silica reaction (ASR) with experimental evidences

Observações	• Trabalho mostra a correlação da utilização de diferentes tipos de agregados e concretos de diferentes resistências com a RAS • Modelo prediz o dano às propriedades físicas do concreto (resistência à tração e compressão), bem como correlação entre os parâmetros utilizados em seu desenvolvimento
Principais referências para o modelo	• Furusawa <i>et al.</i> (1994) • Nielsen <i>et al.</i> (1993) • Suwito <i>et al.</i> (2002) • Poyet <i>et al.</i> (2007)

5 – Elastoplastic-damage compression constitutive model for cementitious material subjected to alkali-silica reaction	
Autores (Ano)	Liao <i>et al.</i> (2014)
Modelagem	Modelagem elastoplástica de dano
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Mesoscóica
Base	• Teoria do dano • Teoria plástica
Tipo de Análise	Termodinâmica
Software	Não informado
Principais dados de entrada	ω_c – dano à compressão ω_t – dano à tração ω_c – valor de dano crítico b – variável associada ao desenvolvimento da velocidade da expansão t – tempo da reação C_{so} – resistência à tração antes da RAS A_o – resistência à compressão antes da RAS
Dados calibrados	ω – dano total = $(1 - \alpha t) * \omega_t + \alpha t * \omega_c$ αt – parâmetro relacionado ao estado de tensão $-f(\sigma^+, \sigma) - 0 < \alpha t < 1$ (0 – estado puro de compressão, 1 – estado puro de tensão) ω_g – variável de dano químico C_s – resistência à tração após a RAS = $C_{so} (1 - \omega_g)$ A – resistência à compressão após a RAS = $A_o (1 - \omega_g)$
Considerações dos dados de entrada	σ^+, σ – obtidos a partir da decomposição espectral baseado nos valores e vetores de Pietruszczak <i>et al.</i> (1988); b – obtido a partir da análise da regressão da curva de evolução do tempo de expansão da reação testada; v, E e f_{co} – obtidos a partir do teste de compressão uniaxial; A_o e B – obtidos a partir da análise de regressão da função de falha da superfície; α_{so} e b_1 – curva de compressão uniaxial; ω_c e b – regressão linear de resultados experimentais de expansão linear; Trabalho de Chen (2005) mostra detalhadamente o processo complexo de determinação dos parâmetros.
Dados de Saída	Curvas tensão x deformação
Validação	Comparação dos resultados simulados com dados experimentais publicados
Conclusões dos autores	• A relação entre tensão e deformação simulada mostra-se em acordo com os dados de testes • Modelo é capaz de capturar o comportamento das propriedades mecânicas principais com a combinação da RAS e cargas aplicadas • Modelo provê um método efetivo para a predição da curva constitutiva de materiais cimentícios danificados
Observações	• Considera-se o dano à tensão como resultado do aumento da deformação elástica e propagação de fissuras, enquanto o dano à compressão está relacionado com o escorregamento friccional entre as superfícies das fissuras • Autor é claro e didático em suas explicações, e o modelo se comporta bem se comparado a dados experimentais
Principais referências para o modelo	Yurtdas <i>et al.</i> (2013)

6 – Modeling the cracks opening–closing and possible remedial sawing operation of AAR-affected dams	
Autores (Ano)	Metalssi <i>et al.</i> (2014)
Modelagem	Modelagem químico-mecânica
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Macroscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE)
Software	Software de Elementos Finitos – CESAR-LCPC Subprogramas: RGIB e TCNL
Principais dados de entrada	ε_{∞} - expansão final τ_c - tempo característico τ_l - tempo de latência E - módulo de Young E_o - módulo de Young do concreto intacto ε_x - nível da expansão ε_o - limite da expansão química acima do qual ocorrem as fissuras ω - parâmetro do material φ - ângulo de fricção $d_{\max}$ - dano máximo observado no fim da reação Y - Coeficiente de Poisson ρ - densidade T - temperatura (°C) UR - Umidade relativa (%) T_f - tempo de análise (anos) e - espessura do corte L - largura da barragem
Dados calibrados	$\varepsilon(t)$ - expansão no tempo $t = f(\varepsilon_{\infty}, \tau_c, \tau_l)$ σ_r - deslocamento transversal caso referência = $E_c \cdot \varepsilon_{\infty}$ σ_c - deslocamento transversal caso com corte = $E_c \cdot \varepsilon_{\infty} - E_c \cdot e/L$ d - variável de dano = $f(d_{\max}, \omega, \varepsilon_o, \varepsilon_x)$ $E(d)$ - módulo de Young após dano = $(1-d) \cdot E_o$
Considerações dos dados de entrada	ε_{∞} , τ_c e τ_l - obtidos através do teste de expansão livre Não está claro como encontrar alguns parâmetros de entrada.
Dados de Saída	- Tensões ao longo do tempo - Deslocamentos verticais, transversais e longitudinais - Redução da rigidez do elemento
Validação	- Aplicação em um modelo de barragem simplificado - Avaliação preliminar de uma barragem real na Suíça
Conclusões dos autores	Os resultados do modelo podem claramente se encaixar com o comportamento da expansão e predizem razoavelmente bem o dano (resultados da compressão e tração) das misturas de concreto estudadas
Observações	- Foram utilizados modelos como base para o desenvolvimento de um módulo para um software que permita a avaliação de estruturas afetadas pela RAA quanto às tensões, deslocamentos e rigidez; - Comparou-se então esses resultados referência, com outros obtidos com o um corte na estrutura (alívio de tensão), para verificar a eficiência desse procedimento - Aplica-se essa ferramenta em uma barragem simplificada e posteriormente com um estudo preliminar de uma barragem real e verifica-se a eficiência do método desenvolvido
Principais referências para o modelo	- Li <i>et al.</i> (2004) - Baghdadi <i>et al.</i> (2008)

7 – Modeling of expansion behavior due to alkali-silica reaction under complicated stress	
Autores (Ano)	Yanagihara e Yoshida (2014)
Modelagem	Modelagem mecânica
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Mesoscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE)
Base	Lei de Norton
Software	Software de Elementos Finitos
Principais dados de entrada	A, n, q – constantes do material σ – tensão axial t – tempo
Dados calibrados	ε^{σ} - deformação – $f(A, n, q, \sigma, t)$
Considerações dos dados de entrada	A, n, q – constantes obtidas a partir de estudo de Yoshida, Okumura e Kato (2003)
Dados de Saída	Deformação x tempo Padrão de fissuras
Validação	Comparação dos resultados simulados com dados experimentais publicados
Conclusões dos autores	• O comportamento do concreto é aproximadamente reproduzido pelo modelo com parâmetros apropriados • A localização da argamassa, elementos de expansão e não expansão tem uma influência na análise dos resultados já que a análise de deformação x tempo são diferentes com a mudança da localização de elementos • A ocorrência e crescimento das fissuras da estrutura pode também ser reproduzido pelo modelo proposto
Observações	• Modelo desenvolvido para concreto pré-tensionado (protendido), fazendo a análise através de software de elementos finitos a partir de um elemento representativo de volume e posterior comparação com os valores obtidos de uma viga a partir de dados experimentais da literatura • Resultados não ficaram muito próximos aos dados reais, contudo seguem a mesma tendência
Principais referências para o modelo	Sasaki <i>et al.</i> (2008)

8 – Chemo-damage modeling and cracking analysis of AAR-affected concrete dams	
Autores (Ano)	Pan <i>et al.</i> (2013a)
Modelagem	Modelagem química e de dano
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Mesoscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE)
Base	Modelo elasto-plástico de dano químico; teoria da cinética
Tipo de Análise	Térmica e cinética
Software	Software que utiliza Elementos Finitos
Principais dados de entrada	t – tempo físico T – temperatura τ_c – tempo característico τ_l – tempo de latência T_{ini} – temperatura inicial $\varepsilon_{v\infty}$ – expansão volumétrica máxima de deformação ε_{pl} – deformação plástica ε_p – deformação plástica uniaxial σ – tensão efetiva σ – fator de dano E_0 – Módulo de Young inicial (GPa) E – Módulo de Young atual (GPa) ν – Coeficiente de Poisson f_{to} – resistência à tração inicial (MPa) G_f – Energia da fratura ($N \cdot m^{-1}$) K – deformação máxima histórica disponível k – condutividade térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) c – calor específico ($KJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) α – coeficiente de dilatação térmica (10^{-5})
Dados calibrados	ξ – extensão da RAA – $f(t, T, \tau_c, \tau_l)$ $daar$ – dano devido à RAA – $f(E, E_0)$ f_t – resistência à tração da peça atacada pela RAA (MPa) – $f(f_{to}, daar)$ ε_u – deformação última – $f(G_f, f_t, l_c)$ ε_o – deformação inicial – $f(f_t, E)$ dm – fator de dano mecânico – $f(f_t, \sigma, \varepsilon_{pl})$ ou 0-1, ou $f(f_t, \varepsilon_u, \varepsilon_o, K, \varepsilon_p, E_0)$ d – fator de dano – $f(daar, dm)$
Considerações dos dados de entrada	τ_c, τ_l e $\varepsilon_{v\infty}$ – obtidos a partir de testes de expansão livre
Dados de Saída	• Evolução da expansão do concreto afetado por RAA • Gráfico correlacionando a deformação causada pela RRA e a rigidez • Perda de resistência à tração • Curva de deformação para o concreto afetado pela RAA • Padrão de fissuras na barragem analisada
Validação	• Teste de expansão livre da RAA • Barragem Fontana (EUA)
Conclusões dos autores	• Para um teste de expansão livre da RAA os resultados mostraram que o modelo proposto tem precisão suficiente para prever a expansão de estruturas de concreto afetadas pela reação • O padrão de fissuras alcançado para a barragem está em consonância com observações de campo
Observações	• Trabalho considera a umidade constante • Foi tomado um tempo de 20 anos para análise • Modelo consegue prever o dano e o padrão de fissuras
Principais referências para o modelo	Ulm <i>et al.</i> (2013) e Larive (1997)

9 - A coupled mechanical and chemical damage model for concrete affected by alkali-silica reaction	
Autores (Ano)	Pignatelli, Comi e Monteiro (2013)
Modelagem	Modelagem química e mecânica
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Mesoscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE)
Base	Teoria da difusão elétrica em dupla camada
Tipo de Análise	• Carregamento externo • Pressão interna • Dano mecânico • Dano químico
Software	Software de Elementos Finitos - FORTRAN
Principais dados de entrada	<u>Dados gerais</u> S_w – grau de saturação V – volume do Elemento Representativo de Volume ξ – extensão da reação <u>Parâmetros elásticos do concreto</u> G_s – módulo de cisalhamento K_s – rigidez da matriz de concreto K_g – rigidez do gel que preenche a porosidade do concreto <u>Parâmetros da expansão devido à RAS</u> U_i – energia de ativação (K) $\tau_i(T, 1)$, $\tau_i(T, 0)$, $c_{1,i}$, $c_{2,i}$ – (dias) ASR_∞, b_1 e b_2 <u>Parâmetros do dano químico</u> r_1, r_2, r_3 e ω <u>Parâmetros do dano mecânico</u> ai_0, ai_1, ai_2 – parâmetros do material que governam o formato e dimensões do domínio elástico (MPa)
Dados calibrados	d – dano químico - $f(r_1, r_2, r_3, \xi)$ $\epsilon_{\max}(S_w)$ – expansão máxima possível - $f(ASR_\infty, b_1, b_2, S_w)$
Considerações dos dados de entrada	• Testes de cilindros “reagidos” carregados axialmente e anéis de metal confinados • Testes de compressão em curvas de 3 pontos • G_s, K_s e K_g - obtidos a partir dos valores experimentais de módulo de Young e Coeficiente de Poisson • $\tau_i(T, 1)$, $\tau_i(T, 0)$, $c_{1,i}$, $c_{2,i}$ - parâmetros obtidos das curvas de expansão de livre em condições variadas de umidade de Larive (1998) - detalhes sobre a calibração em Comi, Kirchmayr e Perego (2012) - obs.: parâmetros dependem do tipo e tamanho dos agregados usados no concreto • ASR_∞, b_1 e b_2 - parâmetros calibrados a partir da expansão máxima mensurada por Larive (1998) e Multon (2003) em testes isotermais em espécimens reativas com diferentes graus de saturação • r_1, r_2, r_3 e ω - obtidos usando valores da pressão do gel obtida com a teoria de dupla camada em condições totalmente saturadas, e valores experimentais da redução do módulo de elasticidade em função da deformação causada pela RAS em testes de expansão livre • ai_0, ai_1, ai_2 - obtenção segue restrições estabelecidas por Comi e Perego (2001)

9 - A coupled mechanical and chemical damage model for concrete affected by alkali-silica reaction	
Dados de Saída	Modelo descreve a deterioração das propriedades mecânicas do concreto em relação à RAS e várias correlações: • dano químico x deformação longitudinal • deformação x tempo (dias) • pressão do gel da RAS x tempo (dias) • deformações axial e radial x tempo (dias) • tensão x deformação • extensão da RAS x tempo (meses) • dano químico x tempo (meses) • redução do módulo de elasticidade x tempo (dias) • carga (MPa) x deflexão (mm)
Validação	Comparação dos resultados simulados com dados experimentais publicados
Conclusões dos autores	• Os resultados mostram que o modelo é capaz de reproduzir qualitativamente a anisotropia de tensão induzida devido à aplicação de cargas externas de compressão e confinamento • Modelo representa corretamente a redução da rigidez inicial devido à evolução da reação • Modelo capaz de reproduzir o aumento em ductilidade experimentalmente observados, mas não é capaz de representar corretamente a redução da resistência à tração • Comparação entre os resultados experimentais e a análise numérica se mostrou em concordância • O modelo fornece resultados de dano mais realísticos do que modelos propostos anteriormente, com valores da pressão do gel da RAS em concordância com dados experimentais, sem sacrificar os resultados em termos de deformação • A variável de dano químico depende apenas da extensão da reação e sua evolução pode ser facilmente identificada com base testes de expansão livre • Modelo reproduz corretamente o efeito de carnos e confinamento na resposta do concreto reagido
Observações	• Não está claro a respeito da obtenção de vários dados de entrada usados no modelo, sendo que em alguns casos outros trabalhos são necessários para maiores esclarecimentos, e em outros não há a definição do que se trata as variáveis, somente que as usou • As comparações feitas entre os resultados experimentais e o modelo proposto são próximas, mostrando que a modelagem proposta consegue simular bem o comportamento real das amostras analisadas
Principais referências para o modelo	Larive (1998)

10 – Lattice Discrete Particle Modeling (LDPM) of Alkali Silica Reaction (ASR) deterioration of concrete structures	
Autores (Ano)	Alnaggar, Cusatis e Di Luzio (2013)
Modelagem	Modelagem discreta de partículas em rede (LDPM)
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Mesoscópica
Software	Software de análise dinâmica de estruturas - MARS code
Principais dados de entrada	<u>Propriedades do comportamento do concreto</u> d0 – tamanho mínimo do agregado (mm) da – tamanho máximo do agregado (mm) nF – fuller curve exponente c – teor de cimento (Kg/m³) w/c – relação água cimento a/c – relação agregado cimento fc – resistência à compressão ft – resistência à tração E – módulo de Young <u>Parâmetros LDPM</u> E0 – módulo elástico normal Ed – módulo normal densificado α – taxa entre a rigidez elástica normal e de cisalhamento σ_t – força de tração (MPa) nt – softening exponent σ_s – força de cisalhamento σ_{c0} – força de compressão Hco – módulo de enrijecimento inicial kco – taxa de deformação transicional μ_0 – atrito inicial μ_{∞} – atrito assintótico Gt – energia da fratura σ_{N0} – tensão transitória (MPa) kc1 – parâmetro de deformação kc2 – parâmetro de dano <u>Parâmetros da difusão de íons</u> T – temperatura atual analisada To – temperatura de referência D – diâmetro do agregado R – constante universal dos gases ρ_w – densidade da água as0 – permeabilidade a temperatura T0 cs – teor de sílica ζ – posição da frente de reação = $2z/D$ mg/ms – taxa para conversão de sílica para gel ca – teor de álcali ca0 – teor de álcali calculado onde não ocorreu expansão, ou está é mínima (kg/m³) cal – teor de álcali suficiente para completar a reação álcali-sílica (kg/m³) Ci – difusividade da água próxima ao agregado (m²/dia) z – raio da partícula ainda sem reação Ead – energia de ativação para processo de formação do gel ka – parâmetros do material Eai – energia de ativação do processo de absorção δ_c – espessura na qual os poros estão acessíveis para o gel

10 – Lattice Discrete Particle Modeling (LDPM) of Alkali Silica Reaction (ASR) deterioration of concrete structures	
Dados calibrados	l_t – comprimento característico da tração (mm) - $f(E_0, G_t, \sigma_t)$ w_s – teor de água ao redor do agregado - $f(w/c)$ k_s – parâmetro do material - $f(w_e, r_w, c_s)$ ($m^5 \cdot kg^{-1}/dia$) M_g – massa básica de gel gerada - $f(k_a, D, \zeta, c_s, mg/ms)$ M_i – teor de água absorvida pelo gel - $f(C_i, \delta, N, M_g, E_{ai}, R, T)$ Δr – aumento do raio do agregado - $f(M_i, \rho_w, r)$
Considerações dos dados de entrada	Os parâmetros do LDPM são obtidos através das curvas carregamento-deslocamento referentes à 5 testes diferentes: (1) compressão hidrostática (2) Compressão não confinada (3) testes de ruptura (4) compressão triaxial com baixo confinamento (5) compressão triaxial com alto confinamento
Dados de Saída	• Deformação axial (%) x tempo (dias) • Deformação radial (%) x tempo (dias) • Padrão de fissuras (μm) • Deformação volumétrica (%) x tempo (dias) • Decaimento da resistência à compressão x expansão • Decaimento da resistência à tração x expansão • Decaimento do módulo de Young x expansão • Expansão (%) x tempo (dias) • Expansão (%) x Teor de álcalis (kg/m^3)
Validação	Comparação dos resultados com testes laboratoriais de: • Smaoui <i>et al.</i> (2005) • Multon e Toutlemonde (2006) • Capra e Sellier (2003) • Shehata e Thomas (2000) • Fournier <i>et al.</i> (2004)
Conclusões dos autores	• ASR-LDPM pode prever precisamente a expansão livre e restringida induzida pela RAS sob várias condições de carregamento, e reproduzir padrões de fissuras realisticamente • Modelo explica a redistribuição de fissuras dependendo das restrições e carregamento • Modelo prevê a deterioração do material diretamente sem a necessidade de leis fenomenológicas • Tensões confinantes previnem a evolução das fissuras durante a evolução da expansão do gel, todavia, as fissuras se desenvolvem subsequentemente se as tensões forem liberadas • Modelo é capaz de replicar o efeito da mudança da concentração de íons alcalinos que dependem do tipo e teor de cimento e alcalinidade da água
Observações	• Resposta do modelo bastante clara, contudo, a obtenção dos dados de entrada, bem como os procedimentos necessários para sua implementação no software poderiam ter sido melhor explicadas • Deve-se consultar vários outros trabalhos citados para verificar calibração e considerações feitas
Principais referências para o modelo	• Cusatis, Pelessone e Mencarelli (2011) • Pelessone (2009) • Luzio e Cusatis (2009) • Castro, Sorenesen e Broekmans (2011) • Bazant e Steffens (2000)

11 – Modelling of the mechanical behavior of concrete affected by alkali-aggregate reaction	
Autores (Ano)	Ferreira, Farage e Barbosa (2013)
Modelagem	Modelagem mecânica
Escala de Análise	Mesoscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE) compondo uma barragem
Tipo de Análise	Mecânica
Software	Software de Elementos Finitos - FORTRAN
Principais dados de entrada	γ_w – densidade da água (N/m ³) γ_μ – densidade do concreto (N/m ³) ν – Coeficiente de Poisson E_μ – Módulo de Young (MPa) gf – energia de ativação (MPa.m) f_{ct} – resistência à tração (MPa) σ_μ – tensão no esqueleto de concreto ε – tensão total ε_∞ – deformação volumétrica T – tempo K – parâmetro empírico τ_l – tempo de latência (anos) τ_c – tempo característico (anos) p_o – valor específico de pressão analisado p_{max} – valor máxima de pressão admissível p – intervalo entre o valor especificado e o máximo = $p_o \leq p \leq p_{max}$ E_g – módulo de Young do gel
Dados calibrados	σ – tensão total = $\sigma_\mu - p_g$ ε_μ – deformação no esqueleto de concreto = $\varepsilon - \varepsilon_{ch}$ p_g – pressão do gel = $E_g (\varepsilon_{ch} - \varepsilon)$ ε_{ch} – tensão induzida pela RAA = $f(\varepsilon_\infty, \tau_c, \tau_l, K, p, p_o, T)$
Considerações dos dados de entrada	gf – obtida experimentalmente pela relação tensão-deslocamento p_{max} e K – obtidos por medições <i>in situ</i> , mas o autor não especifica como efetua-las
Dados de Saída	Pressão interna produzida pelo gel e fissuras geradas Padrão de fissuras
Validação	Comparação dos resultados simulados com dados experimentais publicados de Larive (1997)
Conclusões dos autores	O modelo mecânico proposto é capaz de simular o acoplamento entre a expansão causada pela RAA e as tensões confinantes de forma adequada.
Observações	• Artigo bastante conciso, mostrando de forma direta e clara o modelo • Não ficou claro como obter alguns dados de entrada, mas os autores citam quais trabalham se pautaram para obtê-los
Principais referências para o modelo	• Farage <i>et al.</i> (2004) • Ulm <i>et al.</i> (1999) • Curtis (1995) • Larive (1997)

12 – Chemo-mechanical micromodel for alkali-silica reaction	
Autores (Ano)	Puatatsananon e Saouma (2013)
Modelagem	Modelagem químico-mecânica
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Microscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE)
Base	Método de Diferenças Finitas e elemento finito
Tipo de Análise	Químico-mecânica
Software	(1) Software de análise de deterioração através do código de transferência de Calor (CDAP) (2) Software de Programação Matemática (Código C++) - Software SIMSAR (3) Código MERLIN
Principais dados de entrada	Cion – concentração livre de íons nos poros Cp – porosidade da pasta de cimento Cgel – concentração de gel na borda do agregado D0ion,micro – permeabilidade inicial de íons no agregado Bion – capacidade de ligação de íons η – razão de volume do gel da RAS com o agregado reagido Ri – tamanho do agregado rcr – profundidade de RAS no agregado Vri pore – volume total de poros ao redor do agregado reagido Vri a – volume do agregado com raio Ri Pint – pressão na zona de transição pasta-agregado ν_{gel} – coeficiente de Poisson do gel Ep e Ea – módulo de elasticidade da pasta cimentícia e do agregado, respectivamente ν_c e ν_a – coeficiente de Poisson da matriz cimentícia e do agregado, respectivamente ft – resistência à tração da matriz cimentícia u – energia da fratura fc – resistência à compressão da matriz cimentícia $\epsilon_{ASR\infty}$ – expansão máxima da RAS τ_L – tempo de latência τ_c – tempo característico θ – temperatura absoluta atual
Dados calibrados	Bion – capacidade de ligação de íons - $f(Dion, Cion)$ Ccr – concentração crítica de íons - $f(Cion)$ Dion,micro (t) – permeabilidade de íons no agregado no tempo t - $f(Cgel, Cp, D0ion,micro)$ Vri – Volume de agregado reagido - $f(Ri, rcr)$ Vri gel – volume de gel da RAS - $f(Vri, \eta)$ Vri gel, eff – volume adicional de gel (após preencher poros) = (Vri gel - Vri pore) $\alpha_i Ri$ – coeficiente de expansão da RAS - $f(Vri gel, Vri a)$ ϵ_{ASR} – expansão da RAS - $f(u)$ ξ – expansão volumétrica normalizada - $f(\tau_L, \tau_c, \epsilon_{ASR\infty}, \theta)$
Considerações dos dados de entrada	Autor adota considerações de outros trabalhos para a obtenção dos dados de entrada, contudo, não está claro quais testes laboratoriais seriam necessários para a obtenção desses dados, como também quais são as considerações de outros trabalhos para a escolha de outros

12 – Chemo-mechanical micromodel for alkali-silica reaction	
Dados de Saída	(1) Verificação da pressão (MPa) no tempo (dias) (2) Verificação da expansão (mm) no tempo (dias) (3) Deformação na malha de elementos finitos (barra de argamassa) analisada (4) Coeficiente de expansão da RAS no tempo (dias), para cada granulometria de agregado analisada (5) Variação temporal do volume de gel no tempo (dias) para cada granulometria de agregado analisada (6) Correlação entre o coeficiente de expansão da RAS efetivo com a finura dos agregados entre a simulação no modelo, com dados do resultado experimental de Jin <i>et al.</i> (2000) e o modelo de Suwito <i>et al.</i> (2002)
Validação	Comparação com testes laboratoriais
Conclusões dos autores	(1) As deformações do Elemento Representativo de Volume da barra de argamassa obtido no estudo são bem próximos às deformações obtidas tanto de resultados experimentais como do estudo de Suwito <i>et al.</i> (2002) (2) A pressão gerada na interface pelo felo gel ao redor do agregado obtida pela combinação dos códigos SIMSAR-MERLIN na análise em microescala é mais realística – especialmente, a pressão não é tão alta como a obtida por Suwito <i>et al.</i> (2002) (3) A cinética da expansão comparou-se bem como o modelo de Larive (1998), provendo um modelo de transição entre a modelagem micro e macroscópica para RAS
Observações	(1) Autor explica de forma clara os passos necessários para determinação das variáveis no algoritmo utilizado, bem como da rotina de interações e considerações necessárias (2) Foram analisados agregados de diferentes granulometrias no modelo e encontrado correlações com os resultados (3) Autor poderia ter deixado mais claro como obter os dados de entrada (considerações, testes laboratoriais etc)
Principais referências para o modelo	• Jin <i>et al.</i> (2000) • Suwito <i>et al.</i> (2002) • Saouma <i>et al.</i> (2010)

13 – Meso-scale particle modeling of concrete deterioration caused by alkali-aggregate reaction	
Autores (Ano)	Pan <i>et al.</i> (2013b)
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Mesoscópica
Aplicação do Modelo	Elementos representativos de volume compondo Corpos de Prova
Base	Método de Elemento Discreto Segunda lei de Newton Lei do contato linear
Tipo de Análise	Termodinâmica
Software	Software de Elementos Finitos – código de fluido de partícula (PFC2D)
Principais dados de entrada	ν – Coeficiente de Poisson f_c – resistência à compressão do concreto não afetado E_0 – Módulo de Young do concreto não afetado τ_c – resistência ao cisalhamento σ_c – resistência à tração α – coeficiente de expansão termal ΔT – mudança de temperatura $\varepsilon_{aar}(\infty)$ – deformação assintótica no experimento de expansão livre t – tempo da reação T – temperatura τ_c – tempo característico τ_L – tempo de latência p – porosidade p_0 – porosidade do material real $k_0 n$ – rigidez do material μ – coeficiente de fricção das placas usadas no teste de compressão uniaxial R_B, R_A – Raio das partículas em interação
Dados calibrados	ξ – extensão da reação - $f(t, \tau_c, \tau_L)$ $\varepsilon_{aar}(t)$ – deformação causada pela expansão da RAA = $\varepsilon_{aar}(\infty) \xi(t, T)$ kn – rigidez normal de contato - $f(k_0 n, p, p_0)$ (GPa) k_n – rigidez paralela de ligação = kn kn/ks – rigidez cisalhante de contato = 1, por serem forças de contato isotrópicas surgindo na interação entre as partículas k_n/k_s – rigidez cisalhante de ligação = $(2 / 1 - \nu)$ λ – multiplicador da ligação entre os raios - $f(R_B, R_A, kn/ks)$
Considerações dos dados de entrada	τ_c, τ_L - obtidos a partir dos testes de expansão livre
Dados de Saída	• Curvas tensão x deformação • Padrões de fissuras (micro e macro) • Decaimento das propriedades mecânicas (Módulo de Young e resistência à compressão) • Número de fissuras x deformação
Validação	Comparação das simulações com dados experimentais publicados: • Giaccio <i>et al.</i> (2008) • Capra e Sellier (2003) • Larive (1998) • Multon e Toutlemonde (2006) • Institution of Structural Engineering (1992) • Rivard e Saintpierre (2009)

13 – Meso-scale particle modeling of concrete deterioration caused by alkali-aggregate reaction	
Conclusões dos autores	• Duas amostras com diferentes tamanho de agregado são analisadas e exibiram comportamento similar durante o processo da RAS e nos testes de compressão uniaxial subsequentes • A formação da rede de fissuras distribuída no concreto é comparável às observações experimentais de concretos afetados por RAS • As curvas tensão x deformação obtidas dos testes de compressão uniaxial claramente refletem os efeitos do micro-fraturamento interno induzidos pela RAS • O módulo de Young e resistência à compressão podem ser reduzidos em torno de 40% se comparado ao concreto não afetado • Espécimes de concreto afetadas/ não afetadas pela RAS tem padrões de colapso similares em termo de fissuras macroscópicas na diagonal dividindo a amostra em vários pedaços triangulares sob compressão
Observações	• Foi assumida uma expansão homogênea do agregado, sendo esta introduzida por uma expansão termal equivalente • Artigo muito claro, com explicação bastante didática • Autor deixa bastante claro como obter os dados, os trabalhos utilizados tanto para comparação quanto para calibração • Resultados são bastante claros e perceptíveis quanto às deformações causadas pela RAS
Principais referências para o modelo	• Ulm <i>et al.</i> (2000) • Larive (1998) • Azevedo, Lemos e de Almeida (2008) • Tang, Zhang e Shi (2009) • Quin, Guo e Zhang (2011) • Ptyondy e Cundall (2004) • Itasca (2008)

14 – Two-phase damage modeling of concrete affected by alkali-silica reaction under variable temperature and humidity conditions	
Autores (Ano)	Comi, Kirchmayr e Pignatelli (2012)
País	Itália
Modelagem	Modelagem químico-mecânica
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Macroscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE) simulando uma viga e uma barragem
Software	Software de Elementos Finitos - Código comercial Abaqus em subrotinas FORTRAN
Principais dados de entrada	<u>Parâmetros elásticos para o esqueleto de concreto e gel</u> E – Módulo de Young (MPa) ν – Coeficiente de Poisson k – permeabilidade do concreto ϕ – porosidade do concreto ϕ_w – porção da porosidade total preenchida com água e gás η_w – viscosidade dinâmica <u>Parâmetros elásticos para o esqueleto de concreto e gel</u> U_{lat} e U_{ch} – energias de ativação referentes ao tempo de latência e característico (K) $\tau_{lat}(T,1)$ e $\tau_{ch}(T,1)$ – tempo de latência e tempo característico em condições de total saturação (dias) $\tau_{lat}(T,0)$ e $\tau_{ch}(T,0)$ – tempo de latência e tempo característico em condições de baixa saturação c_{1i} e c_{2i} – parâmetros que regulam a evolução entre os valores limites dos tempos de latência e característico; γ_w – peso específico da água γ_s – pesos específico do sólido w – teor de água e – índice de vazios <u>Parâmetros que governam a resposta do dano</u> a_{i0}, a_{i1}, a_{i2} – parâmetros do material que governam o formato e as dimensões do domínio elástico σ_{ei}/σ_{0i} – proporção entre a tensão no limite elástico e o pico de tensão em testes de compressão ou tração D_{0i} – nível de dano correspondente ao pico de tensão em um teste uniaxial
Dados calibrados	Calibração feita com base nos resultados de testes experimentais (Larive, 1998; Multon, 2003; Multon e Toutlemonde, 2006) M e b – parâmetros obtidos a partir de correlações com a porosidade inicial do concreto ϕ ASR_{∞}, b_1 e b_2 – parâmetros calibrados considerando a expansão máxima medida por Larive (1998) e Muton (2003) em testes isotermais em espécimens reativas correlacionando-se com o grau de saturação S_w – grau de saturação = $\gamma_w * w / (\gamma_s * e)$ $\varepsilon_{max}(S_w)$ – expansão máxima possível - f (ASR_{00}, b_1, b_2, S_w)
Considerações dos dados de entrada	U_{lat} e U_{ch} – valores obtidos a partir de experimentos em espécimens reativas τ_{lat} e τ_{ch} – obtidos de dados experimentais de Larive (1998), onde são medidos em dias e correlacionados com o grau de saturação (%) a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}, σ_{ei}/σ_{0i}, D_{0i} – parâmetros obtidos a partir de testes mecânicos uniaxiais e biaxiais no concreto
Dados de Saída	• Deformação x tempo • Decaimento do módulo de Young x tempo • Deformação longitudinal x grau de saturação • Deformação longitudinal/ transversal x tempo • Padrões de fissuras

14 – Two-phase damage modeling of concrete affected by alkali–silica reaction under variable temperature and humidity conditions	
Validação	(1) Testes estruturais propostos por Multon e Toutlemonde (2010) (2) Cálculo da resposta mecânica da barragem de gravidade Beauharnois (Québec, Canadá) afetada pela RAS, e comparação com dados reportados por Bérubé <i>et al.</i> (2000) e Kladek <i>et al.</i> (1995) (3) Comparação com Modelo Code CEB
Conclusões dos autores	(1) Foi verificado uma boa compatibilização dos resultados dos modelos com dados experimentais tanto para condições de umidade homogênea como na presença de gradientes de umidade (2) No segundo caso o modelo é capaz de qualitativamente mensurar os diferentes comportamentos que vigas sujeitas a gradientes de umidade nas diferentes direções (3) A simulação estrutural de uma barragem de gravidade feita para avaliar a extensão do dano estrutural causado pela reação também foi apresentado, e, apesar de informações escassas quanto ao comportamento real da barragem, o modelo é capaz de qualitativamente reproduzir as consequências estruturais da RAS
Observações	(1) Autor explica de forma clara o que foi feito e faz referência de suas considerações e dados de entrada (2) modelo com boa resposta e aparentemente com uma complexidade moderada para sua aplicação (3) dados experimentais reais que possa alimentar os dados de entrada podem chegar em uma resultado ainda mais refinado para o modelo
Principais referências para o modelo	• Larive (1998) • Multon e Toutlemonde (2010)

15 – Modeling alkali-silica reaction in non-isothermal, partially saturated cement based materials	
Autores (Ano)	Pesavento <i>et al.</i> (2012)
Natureza da Análise	Numérica
Escala de Análise	Macroscópica
Base	Mecânica de meios porosos multifásicos reativos e teoria do dano isotrópico
Tipo de Análise	• Carregamento externo • Pressão interna • Dano mecânico • Dano químico
Software	Software de Elementos Finitos
Principais dados de entrada	w/c – relação água cimento n – porosidade (%) T_0 – temperatura inicial R – constante universal dos gases S_w – grau de saturação (0 a 1) τ_{lo} – tempo de latência (T_0 e $S_w = 1$) τ_{ro} – tempo de reação (T_0 e $S_w = 1$) A_l, B_l – coeficiente referente à dependência do teor de água no período de latência A_r, B_r – coeficiente referente à dependência do teor de água durante a reação t_a – tempo de envelhecimento (dias) E_l – energia de ativação para a latência (J) E_r – energia de ativação para a reação (J) k_{fin} – permeabilidade intrínseca do material totalmente reagido (m^2) ϵ_{ASR} – deformação volumétrica ϵ_{ASR00} – deformação volumétrica assintótica E – módulo de Young do material não afetado $E(\epsilon_{ASR} \text{ vol}, 0)$ – módulo de elasticidade do material quimicamente deteriorado devido à RAS
Dados calibrados	$\Gamma_{ASR}(t)$ – extensão da reação geral normalizada a temperatura e umidade constantes = $\epsilon_{ASR} / \epsilon_{ASR00}$ Γ_{ASR} – extensão da reação geral normalizada com temperatura e umidade variadas = $1 - \Gamma_{ASR} / \tau_r$ $\tau_r(S_w, T, \Gamma_{ASR})$ – tempo característico da reação - $f(\tau_l, \tau_r, S_w, T, \Gamma_{ASR})$ $\tau_l(S_w, T)$ – tempo de latência - $f(\tau_{lo}, E_l, R, T, T_0, A_l, S_w, B_l)$ $\tau_r(S_w, T)$ – tempo de reação - $f(\tau_{ro}, E_r, R, T, T_0, A_r, S_w, B_r)$ d – variável de dano mecânico = $1 - (E / E(\epsilon_{ASR} \text{ vol}, 0))$ V – dano químico = $1 - (E(\epsilon_{ASR} \text{ vol}, 0) / E_0)$ D – dano total = $1 - D = (1 - d)(1 - V)$
Considerações dos dados de entrada	t_a – tempo no qual se perde o gel perde o potencial de expansão, autor não diz como encontrá-lo $A_l, B_l, A_r, B_r, U_l, U_r$ – autor não explicita como encontrá-los, somente explica que se trata de um parâmetro do material
Dados de Saída	Deterioração das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo: • Diagramas de deformação, variação de massa e dano químico ao longo tempo • Correlação da pressão no sólido e extensão da reação ao longo do tempo
Validação	Comparação dos resultados simulados com dados experimentais publicados

15 – Modeling alkali–silica reaction in non-isothermal, partially saturated cement based materials	
Conclusões dos autores	• O modelo proposto reflete propriamente a influência da temperatura e umidade relativa nos valores finais e na evolução das deformações causadas pela RAS • Condições hídricas variáveis têm uma pequena influência no progresso da reação, contudo, um efeito bem significativo nas deformações do concreto devido à RAS em todos os estágios de desenvolvimento da reação • O modelo permite a predição do desempenho de materiais à base de cimento com razoável precisão
Principais referências para o modelo	• Larive (1998) • Poyet (2003)

16 – A computational linear elastic fracture mechanics-based model for alkali-silica reaction	
Autores (Ano)	Charpin e Ehrlaher (2012)
Modelagem	Modelagem mecânica
Escala de Análise	Microscópica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE)
Tipo de Análise	Mecânica
Software	Software de Elementos Finitos
Principais dados de entrada	E_a, E_c, E_g – módulo de elasticidade da matriz cimentícia, do concreto e do gel, respectivamente ν_a, ν_c e ν_g – coeficiente de Poisson da matriz cimentícia, do concreto e do gel, respectivamente R_p – raio do agregado antes do ataque ρ – fração do volume do agregado substituído pelo gel l_c – espessura da zona de transição α – extensão da reação δ – proporção entre o volume do gel e do agregado K_{gel} – módulo volumétrico x – parâmetro sem dimensão que representa o tamanho da fissura f_i – fração de volume que corresponde ao agregado P – pressão do gel
Dados calibrados	$S(x)$ – área criada pela fissura - $f(R_p, x)$ $E_{total}(x, \alpha)$ – energia elástica total na configuração fissurada $f(R_p, \delta, K_{gel}, \rho, \alpha, \nu_a, E_a, P, x)$ E – deformação volumétrica macroscópica $f(\Sigma \text{ tamanho dos agregados}, f_i, P, E_c, \nu_c, x)$
Considerações dos dados de entrada	Autor adota vários valores para vários dados em suas análises, determina outros por correlações e outros de outros trabalhos; todavia não é claro como obter grande parte dos dados de entrada.
Dados de Saída	• Correlação entre parâmetros de entrada • Pressão medida antes e após a primeira fissura • Profundidade do ataque na primeira fissura • Deformação volumétrica • Evolução do tamanho da fissura para diferentes tamanhos de agregados • Pressão medida para diferentes tamanhos de agregados • Expansão volumétrica cumulativa para os comprimentos de fissuras • Comportamento do tamanho péssimo de agregado na expansão
Validação	Comparação dos resultados com os obtidos por Multon, Selier e Cyr (2009)
Conclusões dos autores	(1) O modelo e mecânico desenvolvido expressa que agregados de diferentes tamanhos tem um impacto diferente na expansão em geral, sendo que agregados menores não levaram a nenhuma fissura na pasta cimentícia, pois a energia armazenada na pasta ao redor dos agregados menores não é suficiente para prover a energia necessária para criar uma fissura; (2) Até mesmo a presença e o tamanho de uma falha é importante para a expansão devido ao tamanho de um único agregado, depois da soma de seus tamanhos, o efeito é enorme, levando à conclusão que está ligado ao fato de se considerar um critério de energia da fratura; (3) O modelo foi aplicado para reproduzir a expansão obtida por Multon, Selier e Cyr (2009), e identificar os parâmetros utilizados.
Observações	Modelo considera a consequência mecânica da substituição progressiva dos agregados por um gel menos denso
Principais referências para o modelo	Multon, Selier e Cyr (2009)

17 - A thermodynamic and kinetic model for paste–aggregate interactions and the alkali–silica reaction	
Autores (Ano)	Guthrie e Carey (2015)
Modelagem	Modelagem geoquímica
Escala de Análise	Mesoscóica
Aplicação do Modelo	Elemento Representativo de Volume (RVE)
Base	Dissolução precipitação dirigidos por um desequilíbrio ácido-base na interface de cimento-agregado
Tipo de Análise	Termodinâmica e Cinética
Software	Modelo de fluxo reativo e de transporte: PFLOTTRAN Banco de dados PFTRAN
Principais dados de entrada	Tamanho da célula (μm) Ponderação para difusão – média harmônica Coeficientes de atividade Temperatura dependente – isoterma Porosidade – (%) Tortuosidade Coeficiente de difusão aquosa – (cm^2/s) Pressão – Pa Temperatura – °C Tempo simulado – dias A_i – área superficial do mineral (cm^2) k_i – constante da taxa de dissolução ($\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Dados calibrados	$Q_i/k_{i,\text{sp}}$ – estado de saturação do fluido com respeito ao mineral i r_i – taxa de liberação dos componentes dissolvidos do mineral i – $f(A_i, k_i, Q, k_{\text{sp}})$
Considerações dos dados de entrada	- As constantes de solubilidade para as fases sólidas e espécies aquosas foram tiradas do banco de dados do PFLOTTRAN, acrescidos com vários valores tirados de outras fontes, como Carey e Lichtner (2007), Sverjensky, Shock e Helgeson (1997) - O autor explica porque adotou vários dos valores de entrada, contudo não relata como encontrá-los
Dados de Saída	Relações entre pH, produtos de hidratação e formação do gel da RAS
Conclusões dos autores	- Modelo prevê que o crescimento da RAS pode ser episódico como os gradientes de análise são reestabelecidos durante molhagem/secagem, gelo/degelo, ou infiltração por fluidos - Mudanças na temperatura e desidratação da solução são possíveis mecanismos adicionais que poderiam mudar as condições geoquímicas no
Principais referências para o modelo	- Carey e Lichtner (2007) - Sverjensky, Shock e Helgeson (1997)

18 - A mathematical model for the kinetics of the alkali-silica chemical reaction	
Autores (Ano)	Saouma <i>et al.</i> (2015)
Natureza da Análise	Analítica/Numérica
Escala de Análise	Microscópica
Tipo de Análise	Cinética
Software	Software de Programação Matemática e Gráfica com base Matricial - MATLAB - função ODE45
Principais dados de entrada	A – Siloxano B – íons alcalinos C – silicato alcalino (gel) D – ácido silício E – Água
Dados calibrados	ki – taxa da reação, constante real para i = 1,2,3; F – gel expandido
Considerações dos dados de entrada	k1, k2 e k3 – valores determinados conforme considerações e simplificações do autor referente aos períodos das reações k1 = 1, k2 = 50 e k3 = 100 Autor não explicita os métodos usados para encontrar os dados de entrada
Dados de Saída	Evolução do gel sílico-alcalino, correlacionando-se com a concentração dos dados de entrada
Validação	Modelo Teórico
Conclusões dos autores	• Similaridades qualitativas entre a concentração de gel e a expansão do concreto atacado pela RAS podem ser observadas • Concentrações relativas iniciais de álcali, sílica e água no sistema levam a quatro possibilidades distintas da concentração final do gel da RAS • Quando álcali tem menor disponibilidade que a sílica, produz-se uma quantidade menor de gel • Autor idealiza o desenvolvimento de um modelo unificador, multiescalar / físico-químico que seja capaz de conciliar modelos de difusão mesoscópico, expansões macroscópicas em barras e modelos baseados na cinética química da reação
Observações	• Modelo faz correlações entre as substâncias responsáveis pela reação e como a reação é afetada com a variação de suas concentrações na produção do gel expandido da RAS • Modelo não utiliza dados laboratoriais e nem de estruturas reais • Modelo não prediz dano e nem vida útil

19 - Simplified model for the transport of alkali-silica reaction gel in concrete porosity	
Autores (Ano)	Charpin e Ehrlaher (2014)
Modelagem	Modelagem numérica
Natureza da Análise	Numérica
Base	• Conservação da massa • Equação da poromecânica • Lei de Darcy
Tipo de Análise	Difusão do gel; Pressão
Software	Não informado
Principais dados de entrada	ρ_0 – densidade na pressão zero $P(x, t)$ – pressão em função do espaço (x) e tempo (t). K – módulo de massa do gel k – permeabilidade da pasta de cimento τ_0 – gradiente do limite de pressão (ZT e pasta de cimento) P_{imp} – pressão criada pelo gel Φ – fração de volume ocupado pelo gel R_p – tamanho do agregado τ – pressão limite e – espessura da ZT Φ_s – porosidade do concreto Φ_a – porosidade da ZT
Dados calibrados	$\rho(x, t)$ = densidade do gel no espaço (x) e tempo (t) - $f(\rho_0, P(x, t), K)$ τ – tempo característico – $f(\Phi_s, R_p, k, \tau_0)$ $\Phi_a * e$ – volume total da ZT acessível pelo gel
Considerações dos dados de entrada	Não está explícito como encontrar os dados de entrada, simplesmente há considerações, resolução de equações e correlação variáveis
Dados de Saída	Determinação do desenvolvimento da pressão que leva ao aparecimento da fissura Gráfico de correlação da pressão em função do tempo e do raio
Validação	Modelo Teórico
Conclusões dos autores	Modelo leva em consideração a ZT, e se chega a um estado de equilíbrio de pressão para fornecer seus dados de saída
Observações	• Modelo faz correlações de variáveis em diferentes situações (saturada, não saturada, com e sem fluxo etc), utilizando simplificações e observações (porosidade do sólido, compressibilidade do gel, conservação de massa, lei de transporte etc) • Modelo não utiliza dados laboratoriais e nem de estruturas reais • Modelo não prediz dano e nem vida útil
Principais referências para o modelo	Coussy (2004)

20 – Chemical Sequence and Kinetics of Alkali–Silica Reaction Part II. A Thermodynamic Model	
Autores (Ano)	Kim e Olek (2014)
Modelagem	Modelagem Termodinâmica
Base	Lei de taxa da cinética (desenvolvida pelo autor) Método de “reagente do modelo” (model reactant method) Teoria do estado transitório Teoria da cinética
Tipo de Análise	Termodinâmica
Software	Software de modelagem geoquímica – Geochmism’s Workbench
Principais dados de entrada	Água (G) Hidróxido de Cálcio (G) [K ⁺] – Concentração de íons Potássio (mol/L) [Na ⁺] – Concentração dos íons Sódio (mol/L) [OH ⁻] – Concentração dos íons Hidroxila (mol/L) [H ₂ SiO ₄ ²⁻] – Concentração dos íons sílica (mg/kg) Tk – temperatura absoluta (K) R – constante universal dos gases I – força iônica
Dados calibrados	A ₀ – Área superficial (cm ² /g) β ₀ – Parâmetro de ordem parcial A – fator exponencial (mol/cm ² /s) E ₀ – Energia de ativação (kJ/mol) k _{exp} – constante da taxa de dissolução – f(A, OH ⁻ , E ₀ , R, Tk, β ₀ , I)
Considerações dos dados de entrada	A ₀ – Calculado utilizando o método BET (absorção de nitrogênio) E ₀ – calculada na parte I do experimento (outro artigo) β ₀ – parâmetro possuiu uma dependência linear com a temperatura, e é obtido usando dados experimentais e derivados da literatura A – a partir do estabelecimento de β ₀ , obtêm-se esse parâmetro pela equação k _{exp} k _{exp} , E ₀ , a, OH ⁻ , I – calculados a partir de dados experimentais e utilizando o software GWB K ₁ , K ₂ , K ₃ , K ₄ – constates de equilíbrio obtidas a partir de dados experimentais e pelo software GWB
Dados de Saída	• Consumo de cristobalita e Ca(OH)₂ • Mudança nas concentrações de álcalis • Tempo do aumento da concentração de sílica • Mudanças nos valores de pH • Modelo prediz a existência de um limite para concentração de K, abaixo do qual a RAS não ocorre
Validação	Modelo usa banco de dados dos Laboratórios Nacionais Lawrence Livermore (LLNL)
Conclusões dos autores	• Os dados simulados demonstram uma boa correlação com dados experimentais • Com a utilização de dados experimentais que provêm as propriedades termodinâmicas necessárias de minerais reativos de sílica, o modelo proposto pode ser usado para avaliar a cinética da RAS, incluindo a evolução das mudanças nas concentrações de várias espécies na solução do poro e a formação de produtos da reação
Observações	• Modelo faz correlações entre vários elementos que provocam a RAS, como suas taxas, concentrações etc • Modelo não prediz dano ou vida útil da estrutura atacada pela RAS
Principais referências para o modelo	• Kim e Olek (2013) • Bethke e Yeakel (2010)

21 – Evaluation of alkali–silica reactivity using ASR kinetic model	
Autores (Ano)	Islam e Ghafoori (2013)
Modelagem	Modelagem Cinética
Escala de Análise	Mesoscópica
Tipo de Análise	Cinética
Software	Não informado
Principais dados de entrada	t_0 – é o primeiro ponto nos dados marcado depois da leitura zero inicial $Expo$ – expansão no tempo t_0 k – constante da taxa de expansão M – expoente de Avrami
Dados calibrados	$Expt$ – expansão no tempo $t - f(Expo, k, t, t_0, M)$ $Y = X * M + \ln(k)$ $Y = f(Expo, Expt)$ $X = f(t, t_0)$
Considerações dos dados de entrada	M – obtido a partir da inclinação da linha do gráfico entre Y e X para os diferentes agregados analisados $\ln(k)$ – intercepção da linha o gráfico entre Y e X para os diferentes agregados analisados
Dados de Saída	• Expansão (%) x tipo de agregado • Classificação de agregados inócuos ou reativos • Correlação da classificação de reatividade do modelo modificado proposto e do modelo base
Validação	Resultados experimentais de: (Johnston <i>et al.</i> , 2004; Johnston; Stokes; Surdahl, 2000)
Conclusões dos autores	(1) O modelo cinético proposto se comportou bem quanto ao desenvolvimento da expansão de cada agregado testado pelos períodos testados de 14, 28 e 56 dias (2) o método modificado de K-A-M-J proposto nesse estudo foi melhor para prever as classificações da RAS, pois continuamente confirmou os resultados obtidos baseados no critério de falha de três idades de imersão
Observações	(1) Modelo não prevê dano ou vida útil da estrutura afetada (2) prevê o potencial reativo de diferentes agregados de forma mais profunda
Principais referências para o modelo	Johnston, Stokes e Surdahl (2000)