



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DHIEGO HENRIQUE FERREIRA REVOREDO

**REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA NO CONCRETO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA  
DA EVOLUÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS PREDITIVOS DA  
REAÇÃO**

Recife  
2023

DHIEGO HENRIQUE FERREIRA REVOREDO

**MODELOS MATEMÁTICOS PARA A PREVISÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-  
AGREGADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologias e Geociencias da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em engenharia civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Recife  
2023

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Revoredo, Dhiego Henrique Ferreira.

Reação álcali-sílica no concreto: uma revisão sistemática da evolução dos modelos matemáticos preditivos da reação / Dhiego Henrique Ferreira Revoredo. - Recife, 2023.

197 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

Orientação: Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Inclui referências.

1. Reação álcali-sílica; 2. Modelagem; 3. Revisão sistemática; 4. Concreto; 5. Durabilidade. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

**DHIEGO HENRIQUE FERREIRA REFORÊDO**

**REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA NO CONCRETO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA  
DA EVOLUÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS PREDITIVOS DA  
REAÇÃO**

Dissertação em Engenharia Civil  
da Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de  
Tecnologia e Geociências, como  
requisito para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Civil,  
Área de Concentração  
Estruturas.

Aprovada em 28/06/2023

**BANCA EXAMINADORA**

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro  
(orientador) Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aline Figueirêdo da Nóbrega (examinadora externa)  
Universidade Federal de Campina Grande

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos (examinador  
externo) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia  
da Paraíba

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Adolpho Guido de Araújo (examinador  
externo) Universidade de Pernambuco



---

Emitido em 30/06/2023

**APROVACAO DA BANCA Nº 152/2023 - PPGEC (11.65.18)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

***(Assinado digitalmente em 30/06/2023 13:14 )***

ANDREA NEGROMONTE VIEIRA MATOSO

ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO DEPECA  
(11.65.60)

Matrícula: 1467206

***(Assinado digitalmente em 30/06/2023 16:34 )***

ARNALDO MANOEL PEREIRA CARNEIRO

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEPECA (11.65.60)

Matrícula: 1152919

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <http://sipac.ufpe.br/documentos/> informando seu número: **152**, ano: **2023**, tipo: **APROVACAO DA BANCA**, data de emissão: **30/06/2023** e o código de verificação: **1230b38797**

## RESUMO

A reação álcali-sílica (RAS) é um processo de degradação complexo que deteriora estruturas de concreto ao longo do tempo. A falta de identificação precoce e controle tecnológico na dosagem de materiais reativos contribui para essa degradação. Em busca de estruturas mais duráveis, estão sendo desenvolvidas maneiras de evitar essa reação, incluindo avaliações globais da reatividade potencial entre os agregados e os álcalis do cimento, bem como a identificação da reação em estruturas de concreto existentes. Modelos matemáticos preditivos foram propostos para prever a degradação do concreto e seus efeitos nas propriedades mecânicas, visando reduzir custos de manutenção e garantir maior durabilidade da estrutura. Este trabalho realiza uma análise crítica desses modelos, relacionando-os com o estado atual da arte por meio de uma revisão sistemática da literatura. A revisão destaca lacunas na modelagem devido à complexidade da reação e sugere tendências futuras. Além disso, ressalta a importância da abordagem metodológica da revisão da literatura, a necessidade de programas experimentais para fornecer dados para modelos futuros e a importância da interação entre as áreas de materiais e estruturas no processo de modelagem.

**Palavras-chaves:** reação álcali-sílica; modelagem; revisão sistemática; concreto; durabilidade

## ABSTRACT

Alkali-silica reaction (ASR) is a degradation mechanism that has a complex chemistry, which causes the deterioration of concrete structure over the years. One of the factors that contribute to the concrete degradation process is the late identification and the lack of technological control in the dosage, due to the use of reactive materials. Due to the need for more durable and better performing structural elements, the best way to avoid this reaction is being sought. Global evaluations comprise the potential reactivity between aggregates and cement alkalis, as well as the identification of the reaction installed in a concrete structure with its current damage, cracks and fissures. Thus, predictive mathematical models have been proposed for ASR. The prediction of concrete degradation and its effects on mechanical properties allows reducing costs and maintenance, ensuring greater durability of the structure. This paper presents a critical analysis of predictive models, interrelating them with the state of the art matured through a systematic literature review. From the systematic review proposed in this research and an overview of the mathematical models, it was possible to analyze the gaps that still exist due to the complexity of the reaction and the possible future trends in the modeling of ASR. The research also highlights: a) the importance of the methodological approach of the literature review to provide a comprehensive and chronological overview of the evolution of ASR; b) the experimental programs, which provide the necessary input data for future models; and c) the need for greater interaction in the modeling process between the areas of materials and structures.

**Keywords:** alkali-silica reaction; modeling; systematic review; concrete; durability

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Thomas Stanton, precursor dos estudos de RAA.	<b>23</b>
<b>Figura 2</b>	Um mapa-múndi indicando países com casos de RAA em estruturas de concreto	<b>26</b>
<b>Figura 3</b>	Fissura no bloco de coroamento da fundação na Ponte Paulo Guerra.	<b>27</b>
<b>Figura 4</b>	Fundação de Prédio em Recife afetada por RAA	<b>28</b>
<b>Figura 5</b>	Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPL)	<b>28</b>
<b>Figura 6</b>	Fluxograma da reação álcali-silica	<b>29</b>
<b>Figura 7</b>	Esquema ilustrativo dos fatores necessários para ocorrência da RAS	<b>30</b>
<b>Figura 8</b>	Fatores que influenciam a RAS	<b>31</b>
<b>Figura 9</b>	O tamanho péssimo de agregado para RAS (a linha tracejada vermelha indica o tamanho péssimo de agregado).	<b>33</b>
<b>Figura 10</b>	Concentração de íons na solução dos poros do cimento com o tempo de cura	<b>35</b>
<b>Figura 11</b>	Efeito da Umidade relativa na expansão.	<b>36</b>
<b>Figura 12</b>	Condição de carregamento axial submetido ao concreto	<b>39</b>
<b>Figura 13</b>	Fissuração em ponte paralela ao cabo de protensão	<b>40</b>
<b>Figura 14</b>	Fissuração longitudinal nos dormentes	<b>43</b>
<b>Figura 15</b>	Representação esquemática da estrutura da sílica amorfa.	<b>47</b>
<b>Figura 16</b>	Ruptura da ligação siloxano por hidroxila.	<b>47</b>
<b>Figura 17</b>	Desintegração da segunda e da terceira ponte de siloxano	<b>48</b>
<b>Figura 18</b>	Desintegração da quarta ponte de siloxano	<b>48</b>
<b>Figura 19</b>	Mecanismo ilustrativo dos estágios da reação álcali-silica	<b>50</b>
<b>Figura 20</b>	Interpretação petrográfica da evolução da RAS	<b>51</b>
<b>Figura 21</b>	Contexto histórico referente a RAA	<b>56</b>
<b>Figura 22</b>	Esquema representativos dos fatores que influenciam a RAS e são inputs para modelagem matemática	<b>57</b>
<b>Figura 23</b>	As três etapas da revisão sistemática	<b>61</b>
<b>Figura 24</b>	Fluxograma das etapas da Revisão Sistemática da Literatura	<b>64</b>
<b>Figura 25</b>	Ramificação da pesquisa para compor a revisão da literatura.	<b>75</b>
<b>Figura 26</b>	Trabalhos sobre RAA no Brasil	<b>79</b>
<b>Figura 27</b>	Tipos de escalas de análise de modelos para RAS.	<b>79</b>
<b>Figura 28</b>	Classificação dos modelos numéricos existentes para a RAS.	<b>82</b>



<b>Figura 29</b>	Gráfico bibliométrico do agrupamento de jornais e revistas que publicam sobre modelagem matemática de RAS em concreto.	<b>85</b>
<b>Figura 30</b>	Gráfico bibliométrico gerado pelo critério palavra-chave.	<b>88</b>
<b>Figura 31</b>	Gráfico <i>Forest Plot</i> referente aos 31 artigos do estudo em questão	<b>90</b>
<b>Figura 32</b>	célula unitária característica do concreto contendo uma partícula esférica de vidro.	<b>108</b>
<b>Figura 33</b>	Modelo de matriz de células cúbicas contendo partículas esféricas de vidro.	<b>109</b>
<b>Figura 34</b>	campo de tensão causada pela pressão $p$ induzida pelo gel	<b>109</b>
<b>Figura 35</b>	Relação entre o diâmetro do agregado e a expansão por RAA, em função	<b>111</b>
<b>Figura 36</b>	Configuração: (a) mesoestrutural de um compósito de duas fases. (b) equivalente com elementos esféricos	<b>111</b>
<b>Figura 37</b>	Exemplo de VER para um agregado reativo	<b>113</b>
<b>Figura 38</b>	Equilíbrio teórico entre os álcalis e os íons de cálcio em solução, na presença suficiente de portlandita	<b>114</b>
<b>Figura 39</b>	Definição do Volume Elementar Relativo para vários tamanhos de agregados reativos	<b>116</b>
<b>Figura 40</b>	Tensão de tração no VER submetido a tensões induzidas pela RAS	<b>117</b>
<b>Figura 41</b>	Determinação do módulo do concreto danificado	<b>119</b>
<b>Figura 42</b>	Equilíbrio mecânico do REV danificado	<b>120</b>
<b>Figura 43</b>	Formação de gel da RAS devido à difusão da água em agregado reativo: idealização com difusão esférica	<b>122</b>
<b>Figura 44</b>	Transporte de gel da RAS esquematizado	<b>124</b>
<b>Figura 45</b>	Processo da RAS e ilustração esquemática dos danos induzidos por RAS	<b>125</b>
<b>Figura 46</b>	Modelo em microplano: Conjunto de pontos de integração	<b>126</b>
<b>Figura 47</b>	Modelo em microplano: Retorno vertical à deformação por esforço limite	<b>126</b>
<b>Figura 48</b>	Concreto simulado (centro) e microestruturas de argamassa (direita), em comparação com uma fatia real (esquerda).	<b>137</b>
<b>Figura 49</b>	Diagrama de fluxo do algoritmo que determina qual elemento deve ser danificado	<b>138</b>
<b>Figura 50</b>	Ataque esquemático da RAS no agregado	<b>140</b>
<b>Figura 51</b>	O concreto definido como um empilhamento seco injetado com a pasta de argamassa.	<b>153</b>
<b>Figura 52</b>	Efeito de fixação da parede em um empilhamento de grãos de tamanho único	<b>153</b>
<b>Figura 53</b>	Fluxograma de análise inversa do modelo	<b>155</b>
<b>Figura 54</b>	Esquematização das classificações dos modelos matemáticos para RAS.	<b>159</b>
<b>Figura 55</b>	Infograma dos softwares computacionais utilizados nos modelos de RAS	<b>169</b>

## LISTA DE GRÁFICO

<b>Gráfico 1</b>	Evolução da quantidade de publicações ao longo dos anos	<b>83</b>
<b>Gráfico 2</b>	Tendência dos padrões de publicação dos modelos	<b>161</b>
<b>Gráfico 3</b>	Dados de entrada mais usados nos modelos	<b>161</b>
<b>Gráfico 4</b>	Comparação entre modelo experimental, modelo numérico e modelo por RNA	<b>175</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Conferências ocorridas desde de 1974 até os dias atuais	<b>25</b>
<b>Tabela 2</b>	Autores com abordagem ampla sobre estudos de modelagem de RAS	<b>61</b>
<b>Tabela 3</b>	Crítérios de avaliação adotados para análise dos artigos.	<b>73</b>
<b>Tabela 4</b>	Descrição da qualidade dos termos.	<b>74</b>
<b>Tabela 5</b>	pesquisas acadêmicas brasileiras sobre modelos preditivos de danos para estruturas de concreto afetadas pela RAS.	<b>77</b>
<b>Tabela 6</b>	Principais modelos de predição de danos referentes à RAS, separados em função da escala.	<b>80</b>
<b>Tabela 7</b>	Exemplos de modelos preditivos de dano referentes a RAS, de natureza determinística e probabilística.	<b>82</b>
<b>Tabela 8</b>	Países, instituições e perfil dos autores dos 31 artigos abordando modelos matemáticos de RAS dos anos de 1974 a julho de 2020	<b>88</b>
<b>Tabela 9</b>	Abordagens nos modelos matemáticos de RAS dos anos de 1974 a julho- 2020.	<b>102</b>
<b>Tabela 10</b>	Tendência dos parâmetros adotados nos modelos matemáticos para RAS	<b>103</b>
<b>Tabela 11</b>	Modelos baseados no processo de difusão.	<b>134</b>
<b>Tabela 12</b>	Modelos baseados na produção do gel.	<b>142</b>
<b>Tabela 13</b>	Modelos baseado na expansão do concreto	<b>150</b>
<b>Tabela 14</b>	Modelos baseado na pressão interna.	<b>157</b>
<b>Tabela 15</b>	Tabela de caracterização da heterogeneidade dos modelos	<b>160</b>
<b>Tabela 16</b>	Evolução dos modelos matemáticos para RAS com base em aprimorando modelos já existentes	<b>163</b>
<b>Tabela 17</b>	Compilação das equações da modelagem matemática para RAS	<b>169</b>
<b>Tabela 18</b>	Grupos de ensaios para RAS	<b>176</b>
<b>Tabela 19</b>	Descrição da indicação da potencialidade reativa do agregado.	<b>177</b>
<b>Tabela 20</b>	Artigos Seleccionados do período de 2021/2023 com busca no dia 15/05/2023	<b>181</b>

## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

<b>RAA</b>	Reação Álcali-Agregado
<b>RAS</b>	Reação Álcali-Sílica/Silicato
<b>RAC</b>	Reação Álcali-Carbonato
<b><math>OH^-</math></b>	Hidroxila
<b><math>Ca^+</math></b>	Íon de Cálcio
<b><math>C_{ij}</math></b>	Co-ocorrências dos elementos i e j
<b><math>C_i</math> e <math>C_j</math></b>	Co-cocorrências totais de i e de j
<b><math>X_i</math></b>	Vetor de localização do elemento i
<b><math>\  - \ </math></b>	Norma da diferença entre as posições i e de j
<b><math>n</math></b>	Número de publicações
<b><math>S_{ij}</math></b>	Similaridade
<b><math>\gamma</math></b>	Parâmetro de resolução da equação
<b><math>C_1</math></b>	Cluster ao qual a unidade i é atribuída
<b><math>\varepsilon_j</math></b>	Erro aleatório do estudo j
<b><math>\theta_m</math></b>	Efeito com todos os estudos
<b><math>\zeta_j</math></b>	Efeito aleatório de cada estudo j
<b><math>K(w)</math></b>	Fator intensivo de tensão adimensional
<b><math>W</math></b>	Variável de dano adimensional
<b><math>A_c</math></b>	Área da Fissura
<b><math>S^2</math></b>	Tamanho do vazio esférico em um cubo
<b><math>K_{ag}</math> e <math>K_m</math></b>	Módulos de deformação volumétrica do agregado e matriz cimentícia respectivamente
<b><math>G_{ag}</math> e <math>G_m</math></b>	Módulo de cisalhamento dos agregados e da matriz cimentícia respectivamente
<b><math>\varepsilon_{ag}</math></b>	Expansão do agregado
<b><math>V_{ag}</math></b>	Volume do agregado que reagiu
<b><math>i</math></b>	Representa o i-ésimo agregado
<b><math>\delta_i</math></b>	Fração do volume do agregado com raio equivalente $R_i$
<b><math>\varepsilon_i^{Ri}</math></b>	Deformação ocasionada pela expansão do gel
<b><math>V_{gel}</math></b>	Volume de gel produzido
<b><math>V_{pg}</math></b>	Volume de gel absorvido pelo poro do agregado
<b><math>d(t)</math></b>	Dano isotrópico
<b><math>\varepsilon_0^{asr}</math></b>	Expansão inicial
<b><math>t</math></b>	Tempo
<b><math>P_{agg}</math></b>	Porosidade do agregado
<b><math>S_r</math></b>	Grau de saturação
<b><math>C_{Na}</math></b>	Concentração de álcalis ( $Na^+$ e $K^+$ )
<b><math>D</math></b>	Coeficiente de difusão de álcalis no agregado
<b><math>S(C_{Na})</math></b>	Termo de esgotamento que representa o consumo de álcalis
<b><math>\sigma</math></b>	Matriz de tensão para cada material
<b><math>\varepsilon</math></b>	Deformação
<b><math>I</math></b>	Matriz da unidade
<b><math>u</math></b>	Deslocamento
<b><math>R_{VER}^a</math></b>	Raio do VER correspondente ao tamanho do agregado i
<b><math>x</math></b>	Coordenada Radial
<b><math>\bar{x}</math></b>	Coordenada radial sem dimensões

$bD$	Permeabilidade de Darcy
$p$	Pressão
$x$	Distância da fonte de gel
$Ws$	Concentração de água na superfície do agregado
$v_1$	Fração de volume de infiltração do gel
$a_f$	Área média da seção transversal
$v_0$	Fração de volume de poros
$\Omega$	Unidade hemisférica
$N_{ij}; M_{ij}; L_{ij}$	Direção de cada microplano
$\sigma_N; \sigma_M; \sigma_L$	O princípio do trabalho virtual
$K$	Taxa de reação
$A$	Fator de frequência
$E_a$	Energia de ativação
$Rg$	Constante do gás
$T$	Temperatura
$C_1$	É a concentração da espécie (mol/m <sup>3</sup> )
$D_1$	Coeficiente de difusão da espécie (m <sup>2</sup> /s)
$R_1$	Termo fonte da espécie i
$\varepsilon_P$	Porosidade
$\rho$	Densidade do fluido
$Qm$	Fonte de massa do fluido
$k$	Permeabilidade do meio poroso
$\mu$	Viscosidade do fluido
$p$	Pressão
$\Delta V$	Variação de volume
$V$	Volume de concreto

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>16</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO RAA</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>CONTEXTO HISTÓRICO</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>FATORES QUE INFLUENCIAM A RAS</b>	<b>26</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Agregado Reativo</b>	<b>29</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Teor de Álcalis</b>	<b>31</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Umidade</b>	<b>32</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Temperatura</b>	<b>34</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Tensão de Confinamento</b>	<b>35</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Tempo</b>	<b>38</b>
<b>2.3</b>	<b>TIPOS DE RAA</b>	<b>39</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Reação Álcali-Carbonato (RAC)</b>	<b>39</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Reação Álcali-Silicato (RAS)</b>	<b>41</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Reação Álcali-Sílica (RAS)</b>	<b>41</b>
<b>2.4</b>	<b>MECANISMO DA RAA</b>	<b>42</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Mecanismo da Reação Álcali-Sílica/Silicato (RAS)</b>	<b>43</b>
2.4.1.1	Mecanismo de formação do gel	46
2.4.1.2	Mecanismo Topoquímico	49
2.4.1.3	Mecanismo de Trans-solução	50
<b>2.4.2</b>	<b>Mecanismo da Reação Álcali-Carbonato (RAC)</b>	<b>50</b>
<b>2.5</b>	<b>RESUMO</b>	<b>52</b>
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA</b>	<b>55</b>
<b>3.1</b>	<b>REVISÃO SISTEMÁTICA</b>	<b>57</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Planejamento</b>	<b>58</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Condução</b>	<b>60</b>
3.1.2.1	Fase Pesquisa Bibliográfica	60
3.1.2.2	Fase Filtragem dos Artigos	60

3.1.2.3	<b>Fase Seleção dos Artigos</b>	61
3.1.3	<b>Documentação</b>	61
3.2	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	62
3.2.1	<b>Técnica Bibliométrica do VOSviewer</b>	63
3.2.2	<b>Sistematização da Literatura (VOSviewer)</b>	65
3.2.2.1	Agrupamento por Fontes (Revistas, Livros)	65
3.2.2.2	Agrupamento por Co-ocorrência de termos	66
3.3	META-ANÁLISE	66
3.3.1	<b>Modelos estatístico para meta-análise</b>	68
3.3.1.1	<b>Modelo de Efeitos Fixos</b>	68
3.3.1.2	<b>Modelo de Efeitos Aleatórios</b>	69
3.3.2	<b>Gráfico Forest Plot</b>	69
4	<b>AGRUPAMENTO DOS ARTIGOS</b>	72
4.1	ASPECTOS GERAIS DOS MODELOS MATEMÁTICO DE RAS	73
4.2	CONTEXTO NACIONAL E INTERNACIONAL DOS MODELOS MATEMÁTICOS DA RAS.	74
4.3	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS REFERENTE AO AGRUPAMENTO DOS ARTIGOS	80
4.3.1	ANÁLISE DA SISTEMATIZAÇÃO	80
4.3.2	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	81
4.3.2.1	<b>Análise por agrupamento de fontes</b>	82
4.3.2.2	<b>Análise por agrupamento de palavras chaves</b>	83
4.3.3	META-ANÁLISE	87
5	<b>DISCURSÃO E CONSIDERAÇÕES</b>	89
5.1	ABORDAGEM QUÍMICAS: EVOLUÇÃO, ESTADO ATUAL E FALHAS	89
5.2	ABORDAGEM MECÂNICAS: EVOLUÇÃO, ESTADO ATUAL E FALHAS	92
5.3	ABORDAGENS QUÍMICO-MECÂNICAS: EVOLUÇÃO, ESTADO ATUAL E FALHAS	94
5.4	DISCUSSÃO CRÍTICA QUANTO ÀS DIFERENTES ABORDAGENS QUÍMICAS, MECÂNICAS E QUÍMICO-MECÂNICAS	97
5.5	CONTEXTOS DE PESQUISA DE MODELOS MATEMÁTICOS DE RAS PARA CONCRETO: NÍVEIS AGREGADO E PRODUTO	98
5.5.1	<b>Modelos matemáticos de RAS para concreto baseados em difusão (Tipo 1)</b>	102

<b>5.5.2</b>	<b>Modelos matemáticos de RAS para concreto baseados na produção de gel (Tipo 2)</b>	<b>112</b>
<b>5.5.3</b>	<b>Modelos matemáticos de RAS para concreto baseados na expansão do concreto (Tipo 3)</b>	<b>119</b>
<b>5.5.4</b>	<b>Modelos matemáticos de RAS para concreto baseados na pressão interna (Tipo 4)</b>	<b>147</b>
<b>5.5.5</b>	<b>Resumo</b>	<b>1155</b>
<b>5.6</b>	<b>Evolução das técnicas computacionais empregadas nos modelos de RAS para concreto, equações preditivas, variáveis dependentes e variáveis independentes</b>	<b>163</b>
<b>5.7</b>	<b>Tendencia para os modelos de RAS para concreto</b>	<b>169</b>
<b>5.8</b>	<b>Ensaio experimentos importantes</b>	<b>172</b>
<b>5.8.1</b>	Oportunidade e objetivos da modelagem	<b>175</b>
<b>5.9</b>	<b>PESQUISA COMPLEMENTAR DE ARTIGOS PARA COMPOR A REVISÃO DA LITERATURA PERÍODO 2021/2023</b>	<b>178</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>179</b>
<b>6.1</b>	<b>UM ROTEIRO PARA PESQUISAS FUTURAS</b>	<b>181</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>184</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Oitenta anos após a primeira manifestação patológica da reação álcali-agregado (RAA), essa reação continua a ser estudada. Existem três formas de RAA, cada uma associada ao tipo de mineral presente no agregado reativo: reação álcali-silicato (RAS), reação álcali-sílica (RAS) e reação álcali-carbonato (RAC) (ABNT NBR 15577, 2018; GOMES, 2017; HASPARYK, 2005)

Nos estudos sobre RAS, o foco tem sido na avaliação dos fatores que a condicionam, incluindo íons alcalinos provenientes do cimento durante sua hidratação e sílica amorfa dos agregados reativos. As avaliações globais visam compreender a reatividade entre agregado e álcalis do cimento, além de identificar a presença da reação em estruturas de concreto através de seus danos (ALLAHYARI, 2020; GOMES, 2017; HASPARYK, 2015; HASPARYK, 2005; HANSEN, 1944; MCGOWAN & VIVIAN, 1952; POWERS & STEINOUR a;b, 1955)

A reação álcali-sílica (RAS) pode ocorrer em locais aleatórios dentro da estrutura de concreto, devido à exposição das pontes siloxano à solução alcalina. Essa reação se inicia com a ruptura da ligação siloxano por hidroxila, transformando-a em uma ligação silanol (DENT GLASSER E KATAOKA, 1981; PETERSON, 2000; PAN *et al.*, 2012; RAHMAN e LU, 2019). Isso resulta na formação de um gel sílico-alcalino higroscópico, que, na presença de umidade, se expande, criando tensões na matriz cimentícia e causando fissuração na estrutura de concreto (ICHIKAWA e MIURA, 2007; DIAMOND, 1997; SAOUMA *et al.*, 2015; PAN *et al.*, 2012). Para avaliar a reatividade de um agregado conforme a NBR 15577-1 (2018), é necessário realizar o estudo da petrografia do agregado e o ensaio de expansão de barras acelerado. A petrografia pode ser concluída em uma semana e ajuda a identificar possíveis deformações nos cristais de sílica do agregado.

Após a preparação das amostras, o ensaio de expansão de barras leva quatro semanas para verificar se a expansão está dentro do intervalo entre 0,10% e 0,20%, determinando a reatividade do agregado (ABNT NBR 15577, 2018). No

entanto, esse processo é custoso em termos de tempo e requer cuidados especiais de laboratório. Devido à longa duração do ensaio, que fornece apenas uma indicação da reatividade do agregado, houve a necessidade de uma análise mais abrangente dos efeitos da RAS, incluindo deslocamento, fissuras e redução das propriedades mecânicas. Essas análises foram possíveis através de modelos matemáticos.

Após a descoberta da RAS, inúmeras pesquisas foram desenvolvidas para investigar este fenômeno patológico e modelos preditivos propostos em diferentes escalas. Essa reação é típica de barragens, pontes e fundações, tem uma evolução lenta e uma degradação estrutural drástica, o acesso e execução de recuperação estrutural é difícil e custosa.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Devido à demanda por estruturas mais duráveis e eficientes, há uma busca contínua pela melhor forma de prevenir a reação álcali-sílica (RAS) no concreto. As avaliações abrangentes incluem a análise da potencialidade da reatividade entre agregado e álcalis do cimento, além da identificação dos danos presentes na estrutura, como trincas e fissuras. Além dos ensaios experimentais, têm sido desenvolvidos modelos matemáticos preditivos para RAS, visando prever os danos ao concreto (ALLAHYARI *et al.*, 2020).

Esses modelos consideram uma variedade de parâmetros que influenciam na reação. Devido à natureza heterogênea e interativa do concreto em múltiplas escalas, diversos modelos foram formulados com diferentes abordagens e escalas de análise. Desde os primeiros estudos sobre RAS, os efeitos adversos nas propriedades mecânicas do concreto têm sido considerados um fator determinante (SHAYAN, 2016).

Foi observada uma redução significativa na resistência à tração em amostras de argamassa afetadas pela reação álcali-sílica (RAS). Estudos indicam que a resistência à tração é mais impactada do que a resistência à compressão pelo ASR, resultando em uma diminuição do módulo de elasticidade do concreto e

um aumento na deformação plástica (VIVIAN, 1947; JONES & CLARK, 1998; YURTDAS *et al.*, 2013; GIACCIO *et al.*, 2008;). A resistência à flexão, importante para determinar fissuras e deformações em estruturas de concreto, também é afetada pela RAS, conforme evidenciado por diversas pesquisas experimentais (LI *et al.*, 2020).

Ben Haha (2006) realizou a caracterização da microestrutura do concreto em diferentes níveis de reação álcali-sílica (RAS), utilizando imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para analisar as alterações microestruturais e sua relação com as propriedades mecânicas. Isso evidencia os impactos profundos da RAS em estruturas de concreto em todo o mundo (ALLAHYARI *et al.*, 2020). Diante disso, o desenvolvimento de modelos numéricos baseados na expansão causada pela RAS tornou-se crucial para investigar os problemas relacionados aos danos no concreto.

Dada a complexidade da reação e a diversidade dos modelos matemáticos sobre RAS, uma revisão abrangente da literatura se mostrou necessária. Durante essa revisão, foram encontrados apenas cinco artigos de revisão que abordam de maneira mais holística os modelos matemáticos preditivos para concretos sujeitos à RAS (ESPOSITO & HENDRIKS, 2019; CARLES-GIBERGUES & HORNAIM, 2014; PAN *et al.*, 2012; SAOUMA & XI, 2004; GOMES, 2017).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Esta pesquisa tem por objetivo verificar a evolução dos modelos matemáticos preditivos da RAS, assim o objetivo geral será alcançado a partir dos questionamentos listados a seguir:

- Quais eram os métodos comuns utilizados por autores para desenvolver a sua investigação no domínio da RAS em concreto do ponto de vista fenomenológico.

- Quais eram os mecanismos e deficiências operacionais, comuns, utilizados por autores, para desenvolver a sua investigação no domínio da RAS em concreto do ponto de vista de modelagem preditiva.
- Como fenômenos físico-químicos e desenvolvimento microestrutural vem sendo interligado em ambos os campos de atuação.
- Em que medida a investigação sobre modelagem preditiva para RAS em concreto tem evoluído na última década.

### **1.2.2 Objetivo Específico**

Esta pesquisa tem por objetivo apresentar a evolução dos modelos matemáticos preditivos para concreto exposto a RAS, os entendimentos atuais, bem como as falhas e as contribuições de saltos científicos atrelados a cada evolução.

Este estudo reviu a literatura sobre modelos matemáticos de RAS em concreto para cumprir com os seguintes objetivos:

- a) acompanhamento temporal do número de publicações científicas neste domínio;
- b) revisão da literatura para lidar com aspectos fenomenológicos e correlacioná-los com os modelos matemáticos.

## **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em 6 capítulos:

No Capítulo 1 encontra-se uma introdução com a justificativa do trabalho desenvolvido, salientando a importância do estudo da reação álcali-sílica desde ensaios experimentais, que fornece parâmetros de entrada necessários para desenvolvimentos de modelos matemáticos, até a evolução desses modelos preditivos para análise. Além dos objetivos gerais e específicos.

No Capítulo 2 é apresentado o estado da arte. Aborda-se Definições, tipos de RAA, os mecanismos da RAA. Dos mecanismos de RAS aborda-se o mecanismo de formação do gel, mecanismo topoquímico e de trans-solução.

No Capítulo 3 está descrito o aspecto metodológico aplicada na pesquisa. Aborda-se Revisão sistemática com processo de toma de decisão sobre levantamento bibliográfico; Análise bibliométrica para mapeamento evolutivo dos modelos e as principais fontes de publicações; Meta-análise para efetuar uma comparação entre modelos e, por meio de um resultado estatístico inferir qual seria o melhor tipo de abordagem adotar nos modelos.

No Capítulo 4 trata-se do agrupamento dos artigos. Aborda-se os aspectos gerais dos modelos, contexto nacional e internacional sobre RAS e apresentação dos resultados das sistematizações, bibliométrica, meta-análise e sistematização da evolução dos modelos.

No Capítulo 5 trata-se das discursões e considerações da pesquisa. Aborda-se os tipos de abordagem dos modelos e uma discussão crítica acerca, como também uma análise evolutiva dos parâmetros ao longo do tempo separado em quatro bases de modelos. Também é abordado a evolução das técnicas computacionais empregados e a confiabilidade dos modelos seguidas de roteiro e sugestões para trabalhos futuros.

No Capítulo 6 apresenta-se a conclusão desta pesquisa.

## **2 A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO RAA**

O concreto pode apresentar diversas patologias ao longo do tempo, resultando em sua deterioração. Entre as causas dessas manifestações, destacam-se as intrínsecas, que englobam processos naturais, tais como os químicos, físicos, biológicos e eletroquímicos.

Dentre as reações químicas, merece destaque a reação álcali-agregado (RAA), caracterizada como uma reação de natureza química endógena, ou seja, ocorre internamente no concreto. Com o passar do tempo, essa reação pode resultar em uma significativa degradação, comprometendo a durabilidade das estruturas.

A RAA pode se manifestar de três maneiras distintas, cada uma associada ao tipo de mineral presente no agregado reativo. Conforme definido pela ABNT NBR 15577-1 (2018), essas formas são classificadas como reação álcali-silicato (RAS), reação álcali-carbonato (RAC) e reação álcali-sílica (RAS). É importante observar que a reação álcali-silicato é considerada uma variação específica da reação álcali-sílica, distinguindo-se principalmente pela sua cinética mais lenta. Uma breve explicação de cada uma dessas reações será fornecida a seguir.

A reação álcali-sílica (RAS) ocorre quando álcalis provenientes do cimento e de fontes externas (como adições e aditivos) reagem com formas de sílica reativas presentes no agregado. Essa interação resulta na formação de um gel sílico-alcalino higroscópico, que, na presença de umidade, expande-se, gerando tensões na matriz cimentícia. Isso pode causar fissuras e deslocamentos na estrutura do concreto.

### **2.1 CONTEXTO HISTÓRICO**

Os primeiros registros de deterioração em estruturas de concreto foram documentados na Califórnia, Estados Unidos. Alguns desses primeiros casos foram descritos por Blanks e Kenned (1955 *apud* Mehta e Monteiro, 2014).

Segundo esses autores, a deterioração foi inicialmente observada na Usina Hidroelétrica de Buck, em New River, Virginia, aproximadamente dez anos após sua construção. Entretanto, o primeiro relato da reação álcali-sílica remonta a 1940, quando Stanton identificou o processo de deterioração como resultado de uma reação intrínseca prejudicial aos componentes do concreto.

As investigações experimentais de Stanton (1940) demonstraram que a reação álcali-agregado (RAA) é capaz de gerar eflorescências brancas, causar fissuras e expansões no concreto. Esses efeitos são influenciados pelo teor alcalino presente no cimento, pelo tipo e quantidade de sílica reativa no agregado, e pelas condições de umidade e temperatura. A partir das pesquisas subsequentes sobre essa reação, ela foi definida como uma manifestação patológica resultante dos componentes do concreto e se tornou objeto de estudo (GOMES, 2017).

Entre as décadas de 1920 e 1930, diversos casos de fissuração foram observados em estruturas de concreto na Califórnia devido à RAA, sendo um desses casos ilustrados na Figura 1. Desde então, essa reação tem sido reconhecida como uma das principais causas de deterioração em estruturas em mais de 50 países (FOURNIER & BÉRUBÉ, 2000).

Figura 1 – Thomas Stanton, precursor dos estudos de RAA.



Fonte: Califórnia 23 department of Transportation apud Mehta e Monteiro (2014).

Após a descoberta da reação álcali-silicato (RAS), uma série de pesquisas foi conduzida para investigar esse fenômeno patológico. Nas primeiras décadas,

houve um consenso geral sobre a reação química subjacente à RAS, no entanto, diversas propostas de mecanismos de expansão do gel foram postuladas.

Hansen (1944) foi o primeiro a propor um mecanismo de expansão do gel baseado na teoria da pressão osmótica. Em seu estudo, Hansen sugeriu que a pasta de cimento que envolvia os grãos reativos atuava como uma membrana semipermeável, permitindo a passagem de água, mas não de íons silicatos complexos maiores.

Consequentemente, a água seria atraída para os grãos em reação, onde seu potencial químico é mais baixo, formando uma célula de pressão osmótica. Essa célula causaria um aumento na pressão hidrostática sobre a pasta de cimento, levando inevitavelmente à fissuração da argamassa circundante.

Oito anos após a teoria da pressão osmótica proposta por Hansen, McGowan & Vivian (1952), contestaram essa abordagem. Eles argumentaram que a fissuração da membrana sugerida por Hansen resultaria no alívio da pressão hidrostática, impedindo uma expansão adicional. Em vez disso, McGowan & Vivian (1952) propuseram um mecanismo de expansão baseado na absorção de água pelo gel e subsequente inchaço.

Posteriormente, Powers & Steinour (1955 a,b), sugeriram que as pressões osmóticas poderiam ser geradas tanto em meios fluidos quanto sólidos. De acordo com essa hipótese, o próprio produto da reação poderia atuar como uma membrana semipermeável, dependendo de sua composição.

Durante as décadas de 1950 e 1960, o interesse nos estudos sobre esse fenômeno diminuiu. No entanto, a pesquisa e os ensaios sobre a reação álcali-agregado ressurgiram com mais rigor na década de 1970, conforme mais relatos dessa patologia surgiam (ARRAIS, 2011). Com diversas pesquisas dedicadas a esse fenômeno patológico em vários países, a primeira conferência internacional sobre a reação álcali-agregado (ICAAR) foi realizada em Copenhague em 1974, e continua sendo realizada até hoje (SWAMY, 1992).



O ICAAR, ao longo dos anos, adquiriu uma influência significativa, evoluindo de um evento originalmente anual para uma conferência quadrienal de renome internacional. Esta conferência é reconhecida como um fórum de alto nível, destinado a apresentar e discutir os avanços relacionados à reação álcali-silicato (RAS) no concreto e suas implicações estruturais. Os temas abordados incluem aspectos químicos, mineralógicos e mecânicos, bem como os efeitos e a modelagem das estruturas afetadas.

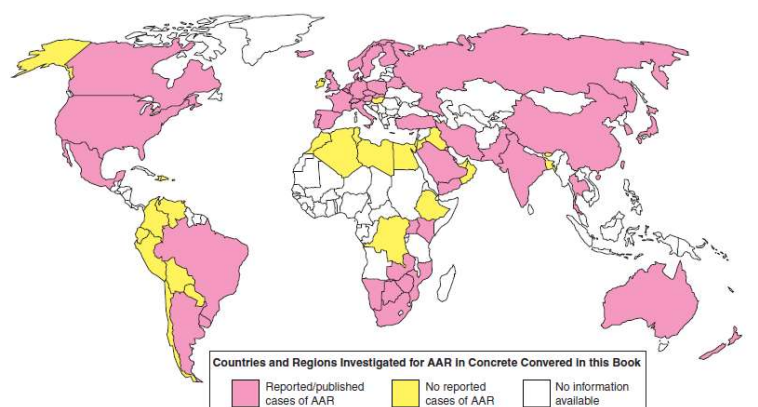
A Tabela 1 lista todas as conferências realizadas até o momento, enquanto a Figura 2 destaca alguns países que relataram casos de RAS. Além disso, a Figura 3 apresenta exemplos de estruturas de fundações afetadas por essa patologia.

Tabela 1– Conferências ocorridas desde 1974 até os dias atuais

<b>Conferência</b>	<b>País</b>	<b>Cidade</b>	<b>Ano</b>
1 <sup>a</sup>	Dinamarca	Copenhague	1974
2 <sup>a</sup>	Islândia	Reykjavik	1975
3 <sup>a</sup>	Reino Unido	Londres	1976
4 <sup>a</sup>	EUA	Purdue	1978
5 <sup>a</sup>	África do Sul	Cidade do Cabo	1981
6 <sup>a</sup>	Dinamarca	Copenhague	1983
7 <sup>a</sup>	Canadá	Ottawa	1986
8 <sup>a</sup>	Japão	Kyoto	1989
9 <sup>o</sup>	Reino Unido	Londres	1992
10 <sup>a</sup>	Austrália	Melbourne	1996
11 <sup>a</sup>	Canadá	Montreal	2000
12 <sup>a</sup>	China	Pequim	2004
13 <sup>a</sup>	Noruega	Trondheim	2008
14 <sup>a</sup>	EUA	Austin	2012
15 <sup>a</sup>	Brasil	São Paulo	2016
16 <sup>a</sup>	Portugal	Lisboa	2021

Fonte: O autor (2023)

Figura 2– Um mapa-múndi indicando países com casos de RAA em estruturas de concreto



Fonte: Sims e Poole (2017)

No Brasil, o primeiro estudo de grande relevância sobre a reação álcali-sílica (RAS) ocorreu durante a década de 1960, durante a construção da barragem Jupia, atualmente conhecida como UHE Engenheiro Souza Dias. Esta foi a primeira obra no país a adotar medidas preventivas, identificando, ainda em estudos preliminares, a reatividade do cascalho do Rio Paraná, utilizado como agregado na época (KIHARA, 1993 apud COUTO, 2008).

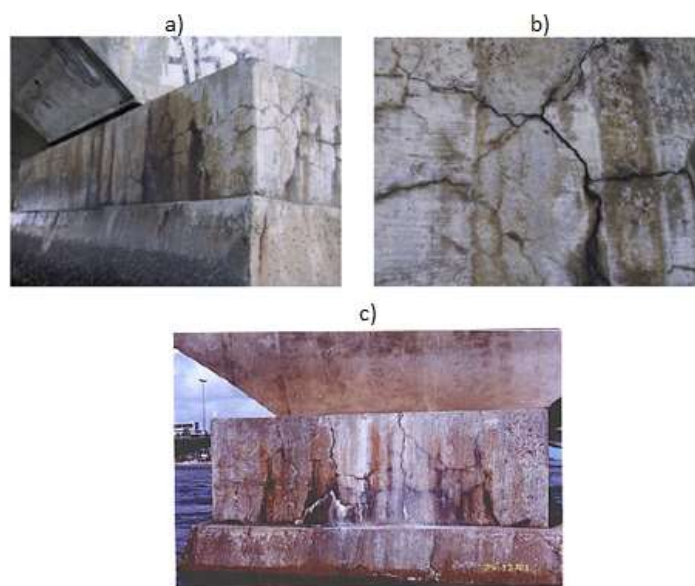
Entretanto, o primeiro registro oficial da manifestação patológica no Brasil ocorreu em 1985 na hidrelétrica Apolônio Sales de Oliveira, localizada em Moxotó. Esta foi a primeira usina a ser monitorada em relação a essa patologia de RAS (ANDRIOLO, 2000).

Várias barragens e hidrelétricas no Brasil foram identificadas com a presença da reação álcali-sílica (RAS). Além dessas estruturas mencionadas, houve casos dessa patologia também em fundações, com destaque para ocorrências na cidade de Recife, Pernambuco.

O estado de Pernambuco, localizado na região nordeste do Brasil, registrou o primeiro caso de reação álcali-silicato (RAS) na Ponte Paulo Guerra em 1999, após 22 anos de sua construção. Conforme relatado por Helene, Carvalho e Pacheco (2016), foram observados sinais de deterioração no tabuleiro da ponte, bem como na superestrutura e subestrutura.

A presença de RAS foi identificada nos blocos de coroamento da fundação, com intensa fissuração em forma de mapa, apresentando fissuras de até 5 mm de largura e atingindo grandes profundidades (FIGUEIRÔA & ANDRADE, 2007; GOMES, 2008), conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Fissura no bloco de coroamento da fundação na Ponte Paulo Guerra.



Fonte: a) e b) Helene, Carvalho e Pacheco (2017) e c) Figueirôa e Andrade (2007).

Após o incidente na ponte, em 2004, ocorreu o desmoronamento do edifício Areia Branca na região metropolitana do Recife, onde foi verificada a presença da reação álcali-sílica (RAS). Conforme destacado por Gomes (2008), esse incidente levantou preocupações quanto às fundações de outros edifícios, dando início a uma rotina de vistorias em diversas construções.

Nogueira (2010) analisou um estudo realizado por Andrade et al. (2006) e constatou cerca de 20 casos de RAA em elementos de fundações na Região Metropolitana do Recife, com idades variando entre três e trinta anos. A Figura 4 ilustra um dos casos de RAS em um elemento de fundação.

Figura 4 – Fundação de Prédio em Recife afetada por RAS.

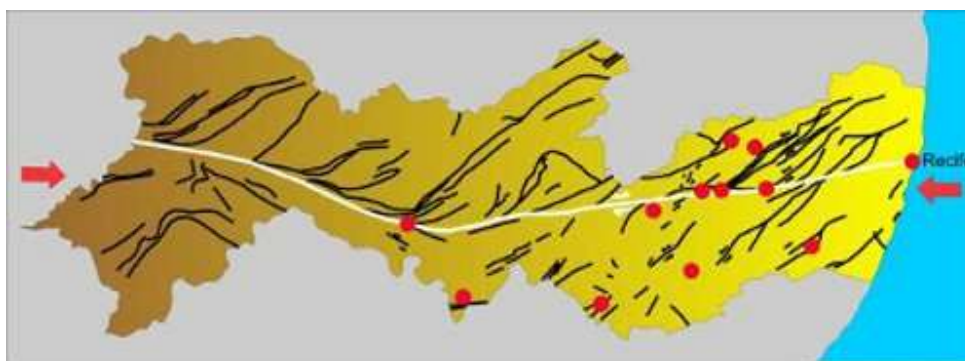


Fonte: Gomes (2008)

Devido ao aumento das ocorrências de reação álcali-silicato (RAS), esse fenômeno patológico tornou-se objeto de estudo no estado. Para compreender as razões por trás da prevalência dessa patologia na região, várias pesquisas foram conduzidas. Uma dessas investigações se concentrou na formação geológica do estado.

Sabe-se que durante o processo de consolidação geológica, houve movimentações das placas tectônicas, resultando em uma falha geológica conhecida como Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPL), conforme descrito por Neves e Mariano (1999), como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Zona de Cisalhamento Pernambuco leste (ZCPL).



Fonte: Correia (2010)

Os agregados situados nas proximidades da falha geológica podem apresentar características mineralógicas inadequadas para serem usados em concreto.

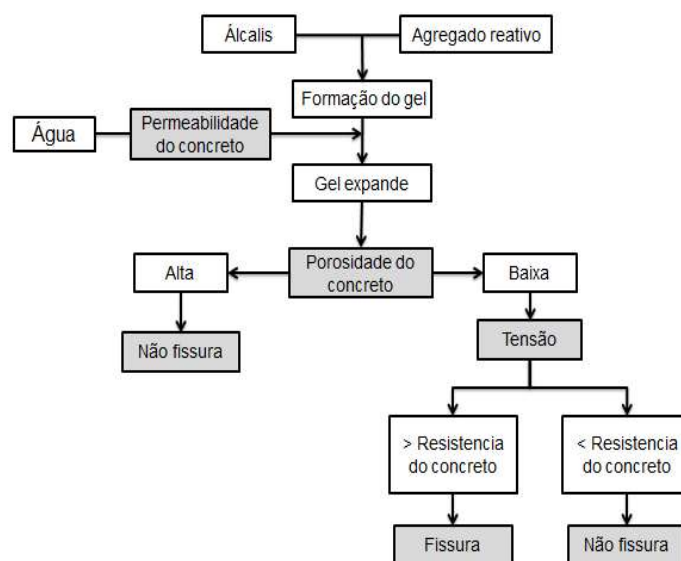
Devido aos movimentos das placas tectônicas, que causam alterações na estrutura mineralógica do quartzo, esses agregados podem se tornar potencialmente reativos à reação álcali-agregado (RAS).

Ao longo dos anos, várias pesquisas foram conduzidas para entender a complexidade dessa reação, especialmente em Pernambuco, onde os agregados utilizados são provenientes de pedreiras locais, algumas das quais estão localizadas nas proximidades da zona de falha. Nesta pesquisa, o foco será especificamente na reação álcali-silicato (RAS).

## 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A RAS

A reação álcali-silicato (RAS) é uma reação química danosa que ocorre entre os hidróxidos alcalinos ( $K^+$  e  $Na^+$ ), provenientes do clínquer do cimento disperso na solução porosa da matriz cimentícia, e a sílica amorfa dos agregados. Conforme destacado por Hasparyk (2005), uma vez iniciada essa reação, independentemente do tipo de RAA, forma-se um gel hidrofílico como produto, que, na presença de umidade, pode expandir, resultando em fissuras e deslocamentos capazes de comprometer as estruturas de concreto. Na Figura 6 pode-se observar o fluxograma da reação, desde a formação do gel até uma possível fissuração (FERRARIS, 2000).

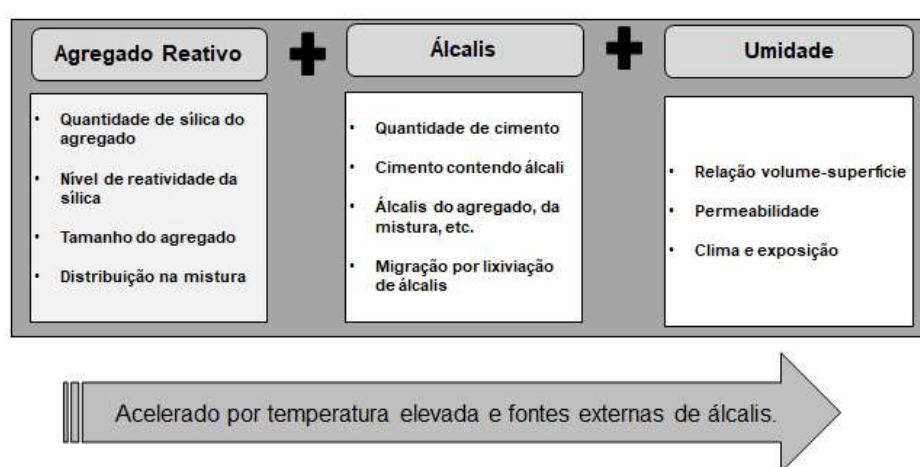
Figura 6 – Fluxograma da reação álcali-sílica



Fonte: FERRARIS (2000) *apud* VALDUGA (2002). Adaptado

O mecanismo que regula essa reação é extremamente complexo, o que levou à realização de diversos estudos ao longo dos anos para esclarecer os fatores que contribuem para a reação álcali-silicato (RAS) (HANSEN, 1944; MCGOWAN & VIVIAN, 1952; POWERS & Steinour, 1955; DIAMOND, 1975; DENT GLASSER & KATAOKA, 1981), como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Esquema ilustrativo dos fatores necessários para ocorrência da RAS.



Fonte: Deschenes et al. (2009) apud Pan et al. (2012) adaptado.

Os estudos experimentais que identificaram os parâmetros de influência foram fundamentais como base para os modelos matemáticos. À medida que o conhecimento sobre a reação álcali-silicato (RAS) amadurecia, esses modelos começaram a explicar o mecanismo da reação de forma mais precisa. Ao longo do tempo, esses modelos evoluíram e se tornaram mais robustos, contribuindo significativamente para o entendimento da deterioração ocasionada pela RAS.

Além dos fatores mencionados na Figura 7, outros elementos como temperatura, porosidade, tensões confinantes e a presença de armadura no concreto também podem influenciar tanto na amplitude quanto na cinética da reação (GOMES, 2017).

Gomes (2017) identificou os principais fatores que influenciam a RAS e exemplificou alguns dos autores que discutem sobre a influência desses fatores,

como ilustrado na Figura 8. No entanto, não se pode ignorar as possíveis interações de outras reações químicas na ocorrência da RAS, como, por exemplo, o ataque por sulfatos (HASPARYK et al., 2015).

Figura 8 – Fatores que influenciam a RAS



Fonte: Gomes, 2017

O atual entendimento dessa patologia é fundamental para garantir a durabilidade das estruturas, especialmente quando não é possível evitar sua ocorrência. Os modelos atuais desempenham um papel crucial ao oferecer análises preditivas das consequências da reação álcali-silicato (RAS). Portanto, existe um interesse significativo na indústria da construção civil em prever, prevenir e mitigar a formação do gel resultante da RAS (HASHEMI et al., 2017). Além disso, estimar a vida útil das estruturas de concreto afetadas pela RAS é uma questão de importância crescente (SCHLEISS, 2011).



### 2.2.1 Agregado Reativo

De acordo com a ABNT NBR 15577-1 (2018), agregados reativos são classificados como aqueles que reagem quimicamente com a solução alcalina presente nos poros do concreto ou proveniente de fontes externas, resultando em expansão na estrutura de concreto.

A petrografia foi um dos primeiros métodos de teste utilizados para detectar a presença de constituintes reativos no agregado. Ao longo do tempo, vários ensaios foram padronizados pela ASTM, facilitando assim a identificação de sílica reativa.

Em seus estudos, Sabbag (2003) constatou que quanto mais desorganizada e instável for a estrutura do agregado, maior será sua reatividade. Além disso, o autor destacou a importância das características morfológicas, ou seja, as alterações na rocha decorrentes de deformações tectônicas, como um fator significativo.

Podem-se destacar os fatores que ocasionam a reatividade:

- Os constituintes mineralógicos: tipos de minerais constituinte da rocha, histórico de movimentação das placas tectônicas e verificação das possíveis alteração na estrutura cristalina dos minerais devido essas movimentações de placas que ocasiona a desorganização da estrutura tornando-a amorfa, à exemplo, sílica e silicato. Esses constituintes podem influenciar na reatividade da partícula (moderada ou alta), e foram estudadas por Neville (1995), Carles-Gibergues e Hornain (2008), Fournier et al. (2004), Marzouk e Langdon (2003), BenHaha (2007) e Giaccio et al (2008).
- Relativos à matriz (agregado): estrutura, tamanho dos grãos, porosidade, permeabilidade, área específica e composição. Referente aos fatores físicos da partícula foram estudados por Poyet et al (2007), Multon et al. (2008), Multon et al. (2010), Poyet (2003)
- Tamanho do agregado: Dentre os fatores que ocasionam a reatividade, pode-se destacar o tamanho do agregado. Este fator já foi analisado por Stanton (1940) e com base nos seus resultados, conseguiu demonstra que o tamanho da partícula do agregado reativo poderia ter um efeito na

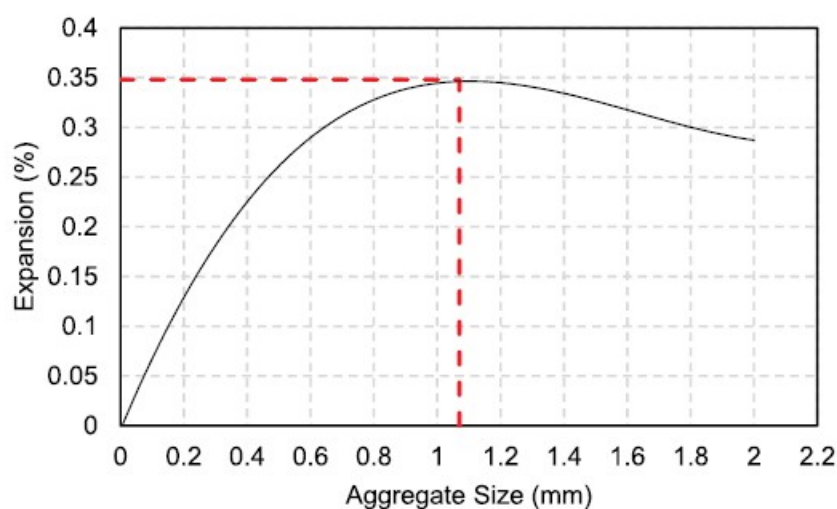


amplitude da expansão. Desde então, vários trabalhos de pesquisas indicam que existe um tamanho péssimo do agregado, ou seja, tamanho do agregado que ocorre a máxima expansão (dependente da sua natureza e composição).

O conceito de que o menor tamanho do agregado resulta em maior expansão é ilustrado na Figura 9. Estudos conduzidos por autores como Hobbs e Gutteridge (1979), Zhang et al. (1999), Kuroda et al. (2001) e Kuroda et al. (2004), observaram um aumento na expansão causada pela reação álcali-silicato (RAS) com a diminuição do tamanho do agregado reativo. No entanto, McGowan & Vivian (1952), demonstrou que, para agregados que passam pela peneira de 70  $\mu\text{m}$ , mas são retidos na peneira de 50  $\mu\text{m}$ , a expansão é retardada, sem nenhuma expansão observada para os agregados que passam pela peneira de 50  $\mu\text{m}$ .

Pesquisas conduzidas por Kawamura et al. (1983), Zhang e Groves (1990), Zheng (2016) e Multon et al. (2008), observaram uma expansão insignificante para agregados reativos com tamanho inferior a 50-150  $\mu\text{m}$ .

Figura 9 – O conceito de tamanho péssimo de agregado (a linha tracejada vermelha indica o tamanho péssimo de agregado).



Fonte: Allahyari et al. 2020

O estudo da reatividade do agregado é fundamental, pois fornece inputs essenciais para os modelos matemáticos, permitindo inferir o efeito na amplitude

da expansão. Além disso, possibilita realizar uma análise estatística da aleatoriedade da reação nos agregados reativos, contribuindo para a compreensão da anisotropia da reação nos modelos matemáticos.

Quando o concreto contém mais partículas de agregados reativos do que pasta de cimento, ocorre uma proporção mais alta de agregado, aumentando assim a concentração de gel expansivo. Isso se deve ao fato de que uma maior quantidade de partículas reativas entra em contato com os hidróxidos alcalinos dissolvidos na solução dos poros da pasta de cimento, acelerando a reação química.

### **2.2.2 Teor de Álcalis**

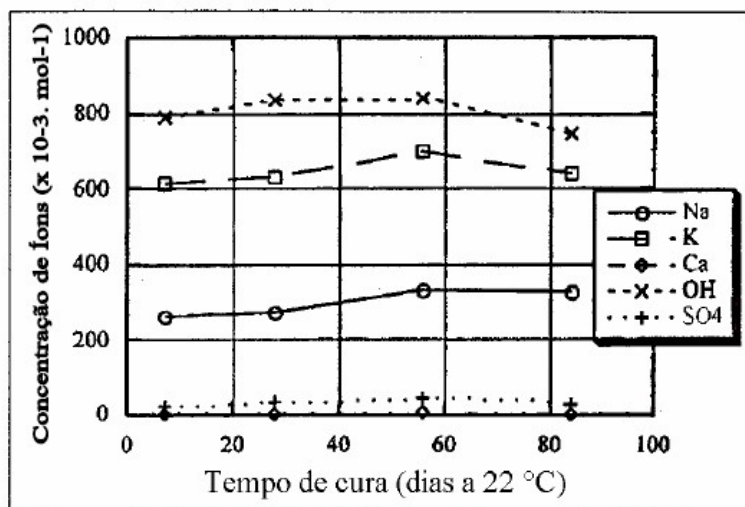
A presença de álcalis provém dos materiais utilizados na fabricação do clínquer do cimento. Durante o processo de calcinação do clínquer, os íons  $K^+$  e  $Na^+$  são vaporizados devido às elevadas temperaturas envolvidas, e posteriormente se condensam, formando uma camada superficial de álcalis. Enquanto alguns álcalis permanecem na superfície do clínquer, outros penetram em sua estrutura interna.

Segundo Peterson (2000), os álcalis que residem internamente na estrutura do clínquer tornam-se disponíveis ao longo do processo de hidratação. Além disso, a finura do cimento desempenha um papel crucial na reação: quanto mais fino o cimento, maiores expansões são observadas no concreto (HASPARYK, 2007).

Durante a hidratação do cimento, são produzidos hidróxidos alcalinos de sódio, potássio e cálcio na solução dos poros, cujas concentrações dependem do tipo e da alcalinidade do cimento Portland utilizado (ITAM et al., 2019). Segundo Swamy (1992), citado por Itam et al. (2019), cimentos com alto teor alcalino pode produzir um pH que varia de 12,7 a 13,1.

A Figura 10 ilustra a variação da concentração dos íons na solução intersticial ao longo do tempo de cura. Observa-se que os íons alcalinos são os principais tipos de cátions presentes na solução aquosa, preenchendo os poros da matriz de cimento (KURTIS et al., 2002).

Figura 10 – Concentração de íons na solução dos poros do cimento com o tempo de cura.



Fonte: KURTIS *et al.* (2002).

Também foi demonstrado por Stanton (1940) que a expansão era insignificante quando o conteúdo alcalino do cimento era inferior a 0,6%, e que o uso de pozolanas podia reduzir o efeito da expansão, fornecendo bases para a mitigação da RAS.

Desde que o problema de RAS foi diagnosticado, a alcalinidade mencionada anteriormente tem sido considerada crucial para o sistema reacional. Na análise de Hasparyk (2011), a autora considerou os álcalis como um fator condicionante para a reação. Portanto, nos modelos que lidam com o processo de reação e na compreensão do sistema, bem como nos modelos químico-mecânicos, a capacidade de contabilizar o teor de alcalinidade permite modelar o problema de forma mais precisa, levando em consideração o consumo de álcalis durante o processo.

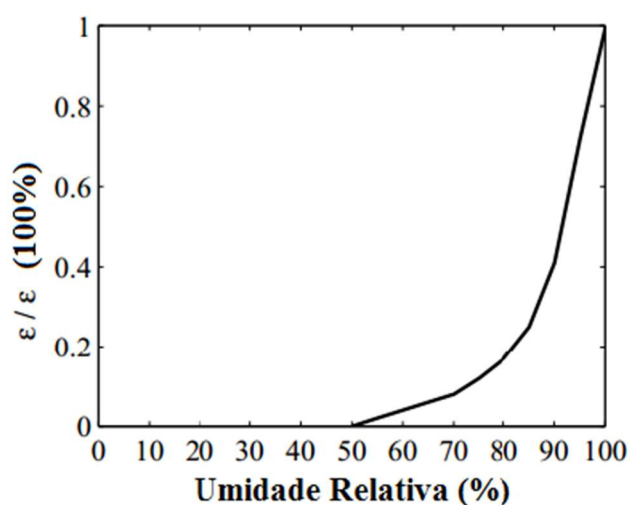
### 2.2.3 Umidade

Um dos requisitos para a ocorrência da RAS é a presença de água, como confirmado em diversos estudos (ITAM *et al.*, 2019; BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, 2016; MULTON *et al.*, 2009; POYET *et al.*, 2007; ULM *et al.*, 2000; LARIVE, 1997; CARPRA *et al.*, 1995; SWAMY, 1992). Carpra *et al.* (1995), relatam que a umidade deve atingir aproximadamente 85% para que a RAS seja desencadeada.

Larive (1997) analisou o fornecimento tardio de água em concreto suscetível à RAS. A autora apresentou seus resultados, os quais demonstraram que a exposição do concreto reativo em condições de alta umidade só provoca expansão enquanto a reação ainda está em andamento. Portanto, a influência da água sobre a amplitude das deformações é limitada pelo processo de formação dos produtos da reação.

De acordo com Swamy (1992), em seus estudos concluiu-se que em ambientes interiores de estruturas maciças de concreto, a umidade pode atingir de 80% a 90%. Ainda segundo o autor, em ambientes com umidade inferior a 50%, a expansão do concreto devido à RAS torna-se praticamente nula. No entanto, em umidades superiores a 80%, as expansões começam a prejudicar a integridade da estrutura de concreto, como observado na Figura 11.

Figura 11 – Efeito da Umidade relativa na expansão.



Fonte: Swamy (1992).

O estudo de Kagimoto et al. (2016) analisou o comportamento de amostras de concreto afetadas pela RAS em ciclos de secagem e ressaturação. Verificou-se que após os ciclos, ocorreram maiores expansões no interior das amostras do que na sua superfície. Os autores sugerem que a fissuração nas superfícies das amostras seja devido à expansão diferencial.

Além disso, Itam *et al.* (2019) abordou o duplo papel da umidade no processo da RAS: inicialmente como transportadora de cátions alcalinos e íons hidroxila, e posteriormente como agente intumescente do gel.

A influência da umidade no processo expansivo é inegável, tanto que nos modelos químicos e químico-mecânicos, é considerada uma variável independente que pode ser avaliada em intervalos. Esse intervalo é crucial, pois delimita a faixa em que a ocorrência da RAS é mais provável, como verificado por Swamy (1992). A amplitude desse intervalo pode variar de 50% a 100% de umidade. Notou-se que a partir de 50% de umidade, ocorrem expansões mínimas, enquanto umidades superiores a 80% estão associadas a expansões significativas.

Portanto, é possível analisar o comportamento expansivo em relação a esses diferentes níveis de umidade, o que permite uma compreensão mais abrangente do processo. No entanto, é importante ressaltar que a relação entre umidade e expansão não é linear e pode ser influenciada por uma variedade de fatores, como composição do concreto, temperatura e tempo de exposição. Assim, a análise detalhada desses intervalos de umidade é essencial para uma compreensão completa do fenômeno expansivo da RAS.

#### **2.2.4 Temperatura**

Diversos estudos indicam que a expansão máxima do gel da RAS pode estar quantitativamente relacionada ao efeito da temperatura. Compreende-se que a temperatura afeta a cinética da reação, resultando em um aumento da expansão do concreto (PAULON, 1981; LARIVE, 1997; ITAM *et al.*, 2019). Segundo Paulon (1981), o aumento da temperatura nas estruturas de concreto acelera a reação, levando a um aumento nas expansões à medida que a temperatura aumenta.

Por outro lado, Larive (1997) analisou a influência da temperatura na RAS e concluiu que esta não influencia diretamente na magnitude da expansão longitudinal, mas sim na cinética da reação. Além disso, Itam *et al.* (2019) também mencionam a influência da temperatura na cinética da reação, correlacionando-a com as tensões térmicas ocasionadas na estrutura.

O efeito da temperatura na expansão da RAS não é facilmente interpretado, pois além de acelerar a reação, também reduz a viscosidade do gel. Nessas condições, o gel pode penetrar mais facilmente nos poros e fissuras do concreto (JONES, 1988).

É evidente que a temperatura exerce um papel crucial no processo de reação, acelerando a taxa de formação do gel expansivo. Esse aumento na taxa de produção está diretamente relacionado à velocidade da reação, a qual é amplificada pela variação de temperatura. Em outras palavras, um aumento na temperatura resulta em uma maior velocidade de reação, levando a uma produção aumentada de gel.

Essa tendência, observada em diversos estudos (PAULON, 1981; LARIVE, 1997; ITAM et al., 2019), permitiu a modelagem da taxa de produção de gel em modelos matemáticos. Esses modelos foram desenvolvidos para correlacionar a taxa de produção de gel com a expansão do concreto afetado pela RAS (HOBBS, 1981; DUNANT & SCRIVENER, 2010; PIGNATELLI et al., 2013; CHARPIN & EHRLACHER, 2014), proporcionando uma representação mais precisa do comportamento real das estruturas afetadas pela RAS.

Essas conclusões destacam a importância da temperatura no processo da RAS, tanto em termos de aceleração da reação quanto no impacto das tensões térmicas resultantes. No entanto, ainda há nuances a serem consideradas, como a interação da temperatura com outros fatores ambientais e materiais, que podem modular a magnitude e a extensão das expansões decorrentes da RAS.

### **2.2.5 Tensão de Confinamento**

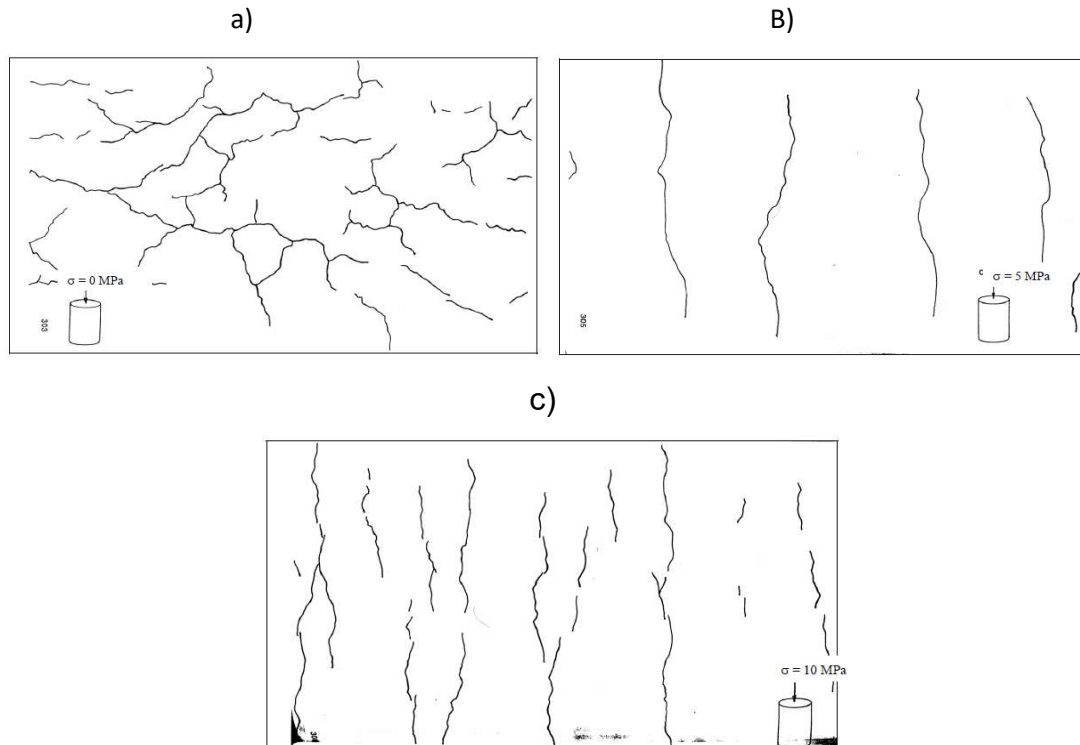
As estruturas estão sujeitas a tensões significativas de compressão, tanto devido ao seu próprio peso quanto às cargas externas. A influência dessas tensões no desenvolvimento da RAS tem sido objeto de discussão. Um dos estudos mais completos disponíveis na literatura é uma série de ensaios conduzidos por Larive (1997). Nesses experimentos, corpos de prova foram submetidos a diferentes níveis de tensão longitudinal de compressão - 5 MPa, 10 MPa e 20 MPa - além

de expansão livre, resultando em expansões volumétricas de 0.329, 0.430, 0.247 e 0.403, respectivamente.

Segundo Larive (1997), o fenômeno expansivo compreende uma anisotropia induzida por tensões, caracterizada pela inibição da fissuração na direção de aplicação das tensões. Isso significa que as fissuras tendem a se desenvolver principalmente na direção paralela ao carregamento. Dessa forma, as tensões aplicadas atuam de forma semelhante a uma protensão, inibindo a fissuração na direção perpendicular ao carregamento e criando uma direção preferencial para o desenvolvimento das deformações expansivas.

A Figura 12 ilustra esse conceito. Na primeira imagem, são apresentadas as fissuras nos corpos de prova de Larive (1997) quando submetidos à expansão livre (fissuração em mapa) e à expansão sob tensões de 5 e 10 MPa, indicando claramente a inibição da fissuração na direção perpendicular às tensões.

Figura 12 - Condição de carregamento axial submetido ao concreto



Condições de carregamento axial submetido no concreto em condições de: a) expansão livre, b) carregamento de 5 Mpa, c) Carregamento de 10MPa

Fonte: Larive (1997)

Nas Figuras 13 e 14, encontram-se exemplos reais de estruturas afetadas pela RAS. Na Figura 13, uma ponte em Beijin (2004) apresenta fissuração paralela aos cabos de protensão, enquanto na Figura 14, fissuras longitudinais são observadas nos dormentes.

Figura 13 - Fissuração em ponte paralela ao cabo de protensão.



Fonte: Beijin (2004)

Figura 14 - Fissuração longitudinal nos dormentes



Fonte: O autor (2023)



A compreensão da influência das tensões de confinamento nos modelos matemáticos para RAS foi crucial para perceber o comportamento expansivo do gel na matriz do concreto. Ao considerar a anisotropia da reação como um input nos modelos, como demonstrado em diversos estudos (LÉRGER et al., 1996; CAPRA & BOURNAZEL, 1998; SAOUMA & PEROTTI, 2006; CHARPIN & EHRLACHER, 2014; BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, 2016; KAWABATO et al., 2017; ITAM et al., 2019), a modelagem pode ser mais precisa em relação ao que ocorre nos elementos de concreto estrutural afetados por RAS, embora a complexidade da modelagem aumente.

### **2.2.6 Tempo**

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as expansões e fissuras decorrentes da RAS podem comprometer a estrutura de concreto, afetando sua durabilidade, elasticidade e resistência. O surgimento dessas fissuras, devido às expansões da RAS, não ocorre em um momento específico definido.

O tempo necessário para o aparecimento das primeiras fissuras causadas pelo processo de expansão da RAS em uma estrutura de concreto depende de vários fatores, incluindo o teor de álcalis no cimento, o tipo e a proporção dos agregados, a composição do gel, temperatura e umidade (BICZOK et al., 1972 BICZOK)

O processo expansivo pode eventualmente cessar quando todos os minerais reativos presentes no agregado tiverem sido consumidos. Em algumas barragens dos Estados Unidos da América, esse fenômeno foi observado somente após 30 anos, por meio de análises de microscopia eletrônica de varredura (HASPARIK, 1999).

Em geral, o fator tempo não influencia nem intensifica a reação, mas está presente de forma indireta na verificação do processo de degradação da estrutura. Assim, o conjunto de fatores condicionantes para o processo da RAS pode determinar os potenciais reativos ao longo do tempo, conforme estipulado em normas como a ABNT 15577-1 (2018) e ASTM C-1260-14.

## 2.3 TIPOS DE RAA

Foi discutido até o momento o contexto histórico, internacional e nacional, sobre reação álcali-agregado, como também os fatores condicionantes para a reação. Do exposto, percebe-se que há uma convergência de que existem na literatura três tipos de RAA, que pode ocorrer de acordo com o tipo de agregado utilizado. A seguir será abordado cada um desse tipo de reação.

### 2.3.1 Reação Álcali-Carbonato (RAC)

Na década de 1950, no Canadá, foram realizadas construções que empregaram calcário dolomítico como agregado na produção de concreto. Com o passar do tempo, percebeu-se que os concretos contendo calcário dolomítico apresentavam uma reação expansiva, que parecia ser distinta da reação álcali-sílica/silicato.

Segundo Paulon (1981) a reação álcali-carbonato ocorre de maneira diferente das reações álcali-sílica e álcali-silicato. Essa reação surge da expansão das rochas carbonáticas, como os calcários dolomíticos argilosos, resultante do ataque dos álcalis do cimento ao calcário dolomítico, formando compostos cristalinos como brucita, carbonato alcalino e carbonato cálcico (NOGUEIRA, 2010).

A reação recém-descoberta foi inicialmente identificada em 1957 por Swenson como a causa de deterioração do concreto no Canadá. Essa reação foi denominada por Swenson & Gillott (1964) como reação de rocha alcalino-carbonato. Gillott & Swenson (1969), propuseram um mecanismo para essa reação (RAC).

Os autores concluíram que "a absorção de umidade por minerais argilosos, previamente não úmidos, é responsável pela expansão dos álcalis de certos calcários dolomíticos argilosos". No entanto, essa explicação do mecanismo nunca foi totalmente convincente, principalmente porque o principal mineral de argila na rocha é a illita, que não é expansível (GRATTAN-BELLEW & CHAN, 2013).

Katayama (1992) coletou amostras do concreto afetado pela reação álcali-carbonato em Cornwall, Canadá, em 1986, e constatou a presença do gel sílica-alcalina na amostra coletada.

Posteriormente, Katayama (1992) propôs que a reação álcali-sílica poderia desempenhar um papel no desencadeamento da RAC. Realizando pesquisas adicionais entre 2006 e 2012, seus estudos pareciam confirmar que a RAC poderia ser considerada um caso especial da RAS (KATAYAMA, 2006; KATAYAMA & SOMMER, 2008; KATAYAMA, 2010; KATAYAMA & GRATTAN-BELLEW, 2013).

A teoria de Katayama recebeu apoio da pesquisa de Grattan-Bellew e Chan (2013), que examinou a morfologia do gel da reação álcali-sílica formado em uma partícula de calcário dolomítico extraído do concreto afetado pela RAC, proveniente de uma calçada experimental em Kingston, Ontário, Canadá. O autor constatou que a sílica presente no calcário dolomítico reagiu com os álcalis do cimento para formar o gel alcalino-sílica. Esse gel absorveu água e expandiu, gerando compressão entre os cristais de calcita. Observou-se que o gel separou os cristais de calcita, causando a expansão das partículas e, conseqüentemente, a expansão do concreto.

Uma distinção entre a reação álcali-carbonato e a reação álcali-sílica é que, na reação álcali-carbonato, o álcali é regenerado, ou seja, a RAC é uma reação química reversível. Isso significa que, quando a reação é completa, os reagentes originais (hidróxido alcalino) retornam ao seu estado inicial. Isso ocorre porque a reação libera íons hidróxidos ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), que se combinam com o carbonato alcalino formado na reação para regenerar o álcali original. Isso permite que o álcali seja continuamente reutilizado na reação (NEVILLE, 1997)

Além disso, Grattan-Bellew e Chan (2013) observaram que o gel no concreto afetado pela RAC não foi identificado nas seções finas padrão de 25 a 30  $\mu\text{m}$  de uma lâmina petrográfica. Isso se deve ao pequeno tamanho dos cristais de calcita ( $\sim 2 \mu\text{m}$ ) que compõem a matriz da rocha, o que faz com que um petrógrafo visualize uma seção fina através de 12 a 15 camadas de calcita que obscurecem a vista. Uma observação semelhante foi feita por Katayama em 2010.

### 2.3.2 Reação Álcali-Silicato (RAS)

A reação álcali-silicato é considerada pelos estudiosos como uma variante específica da reação álcali-sílica, na qual os álcalis interagem com certos tipos de silicatos presentes em determinadas rochas. De acordo com a NBR 1557-1 (2018), os silicatos reativos mais comuns são o quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos encontrados em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos, entre outros.

Essa reação tende a ser mais lenta e complexa em comparação com a reação álcali-sílica, devido à disseminação dos minerais reativos na matriz da rocha que compõe os agregados. Durante a reação, os retículos cristalinos dos minerais reativos são geralmente deformados. Entre esses minerais, destaca-se o quartzo, que frequentemente apresenta deformação devido a tensões geológicas, evidenciada pela extinção ondulante.

Além da presença de cristais de silicatos deformados, a existência de quartzo microcristalino também intensifica a reação (ARRAIS, 2011). Estudos conduzidos por Amo e Perez (2001) indicaram que o quartzo com extinção ondulante nas rochas não é necessariamente reativo; sua reatividade depende de outros fatores, como textura, tamanho dos grãos e microfissuração. No Brasil, Valduga (2002) constatou que a reação álcali-silicato é a mais comum, especialmente em estruturas como barragens, construídas com agregados de rochas quartzo-feldspáticas, como granitos, quartzitos e gnaisses, explicando a predominância dessa reação no país.

### 2.3.3 Reação Álcali-Sílica (RAS)

Atualmente, compreende-se que a Reação Álcali-Sílica (RAS) é uma reação química prejudicial que ocorre entre os hidróxidos alcalinos ( $K^+$  e  $Na^+$ ) provenientes do clínquer do cimento, presentes na solução porosa da matriz cimentícia, e a sílica amorfa nos agregados (HIRCHE & WOLF, 1974; SVENSSON, 1991; BAZANT & STEFFENS, 2000; POYET *et al.*, 2007; MULTON *et al.*, 2009; BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, 2016; ALLAHYARI *et al.*, 2020). Esses componentes reagem, formando um gel hidrofílico que se expande ao

longo do tempo na presença de água, exercendo pressões na matriz circundante e resultando em fissuras extensivas no concreto. O mecanismo que governa essa reação é bastante complexo (ULM *et al.*, 2000; SAOUMA & PEROTTI, 2006; DUNANT & SCRIVENER, 2010; PIGNATELLI *et al.*, 2013; ITAM *et al.*, 2015; GRYMIN *et al.*, 2017; ITAM *et al.*, 2019).

Devido à sua ocorrência em escala mundial e aos danos significativos que causa em estruturas de concreto, como barragens, fundações e pontes, houve a necessidade de desenvolver modelos para tentar compreender e prever essa reação química. Os primeiros modelos de grande impacto surgiram na década de 1990, possibilitando um melhor entendimento da patologia relacionada ao processo reacional, às expansões e às fissuras resultantes (BANGERT *et al.*, 2004; DOEMIEUX *et al.*, 2004; COMBY-PEYROT *et al.*, 2009; ESPOSITO & HENDRIKS, 2016; LI *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2020)

Ao longo do tempo, novos modelos foram sendo desenvolvidos com o objetivo de investigar o comportamento mecânico das estruturas afetadas pela RAS, bem como analisar a influência da granulometria na reação. Esses modelos evoluíram e, atualmente, existem modelos robustos capazes de analisar o processo expansivo, as deformações, entre outros aspectos relevantes.

No entanto, o intenso estudo e pesquisa nessa área resultaram em uma grande heterogeneidade nos modelos disponíveis, em relação à escala (micro, meso, macro), à vocação (explicativa, preditiva) e à base da modelagem (produção de gel, pressão interna, expansão), o que dificulta determinar qual modelo é mais preciso. Essa heterogeneidade será discutida mais detalhadamente adiante.

## **2.4 MECANISMO DE REAÇÃO**

Para uma compreensão macroscópica da Reação Álcali-Sílica (RAS), é crucial entender as informações e os processos que ocorrem em escala micromecânica. A redução do potencial químico em todo o sistema é resultado de processos termodinâmicos e cinéticos que controlam os micros mecanismos da reação (PETERSON, 2000).

Diversas pesquisas foram realizadas com o objetivo de compreender os produtos formados pela reação alcalina dentro do concreto ou argamassa, e esses estudos foram descritos em várias ocasiões por Larrive (1997), Ferraris (1995), Dent-Glasser e Kataoka (1981). Apesar de décadas de pesquisa, essa patologia continua sendo objeto de estudo intensivo.

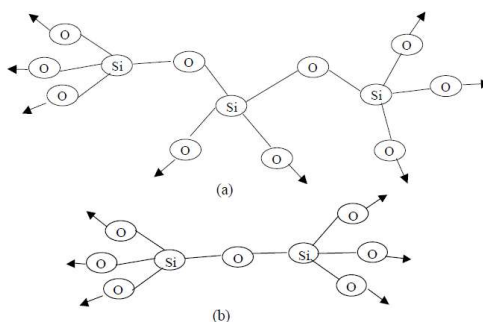
A seguir, serão delineados dois grupos diferentes de processo de reação. O primeiro grupo abordará o mecanismo da Reação Álcali-Sílica e da Reação Álcali-Silicato, por serem reações similares. Em seguida, será discutido o mecanismo da Reação Álcali-Carbonato.

#### **2.4.1 Mecanismo de Reação Álcali-Sílica/Silicato (RAS)**

A reação álcali-sílica, conforme descrita por Pan et al. (2012), é caracterizada por um processo complexo que envolve a interação entre a sílica amorfa presente nos agregados reativos e os íons alcalinos e hidroxilas presentes na solução porosa. Este processo consiste em várias etapas, detalhadas por Dent Glasser e Kataoka (1981), além da descrição detalhada feita por Peterson (2000) em seu trabalho.

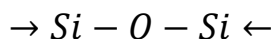
Segundo Peterson (2000), o primeiro requisito para a ocorrência dessa reação é a presença de um agregado reativo contendo sílica amorfa ou pouco cristalina. Devido a essa característica, sua estrutura é mais aberta, facilitando o ataque, conforme ilustrado na Figura 15. A Figura 16 representa a estrutura amorfa da sílica, enquanto a Figura 17 apresenta uma versão simplificada. As setas indicam as ligações siloxano ( $2\text{Si-O}$ ) com átomos adicionais de sílica, cada um conectado a três outras ligações siloxano (Peterson, 2000).

Figura 15 – Representação esquemática da estrutura da sílica amorfa.



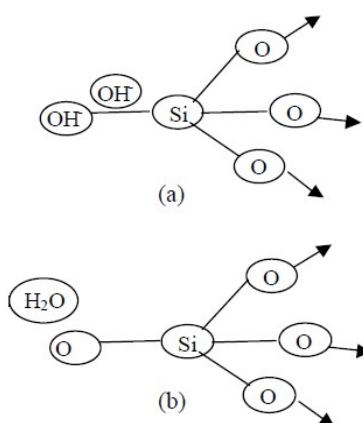
Fonte: Peterson (2000).

A sílica amorfa é representada por um átomo de oxigênio conectado a dois átomos de sílica, onde cada átomo de sílica é unido à estrutura por três pontes siloxano, formando a base de repetição da unidade, como ilustrado na Figura 15 e pode ser representada como:



Esse processo pode ocorrer em pontos aleatórios dentro da estrutura, já que as pontes siloxano estão suficientemente expostas à solução alcalina. Assim, para a ocorrência da reação, inicia-se a ruptura da ligação siloxano por hidroxila, que desconecta os dois átomos de silício do oxigênio, conforme ilustrado na Figura 16. Dessa forma, a hidroxila ( $OH^-$ ) transforma a ligação siloxano em uma ligação silanol ( $SiOH$ ).

Figura 16 – Ruptura da ligação siloxano por hidroxila.

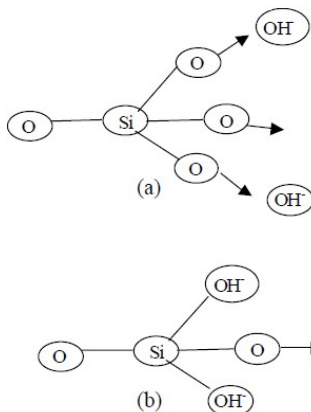


Fonte: Peterson (2000)

Mesmo após o ataque da hidroxila, ainda permanecerá sílica ligada à estrutura por meio de três pontes siloxano. O processo de ataque prossegue com a

desintegração da segunda e da terceira ponte, seguindo a desintegração da primeira ponte, conforme demonstrado na Figura 17.

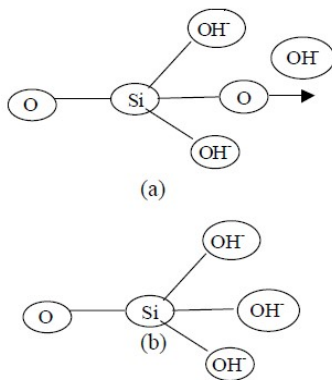
Figura 17 – Desintegração da segunda e da terceira ponte de siloxano.



Fonte: Peterson (2000)

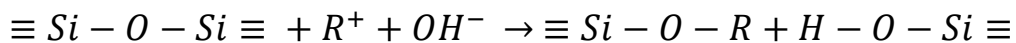
A desintegração da quarta ponte de siloxano, mostrado na Figura 18, culmina no monômero  $SiO_4H_3^-$ .

Figura 18 – Desintegração da quarta ponte de siloxano.



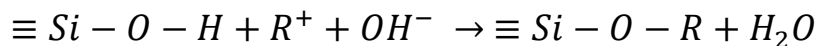
Fonte: Peterson (2000)

Já Glasser e Kataoka (1981) resumiu o processo em duas etapas. Na primeira etapa, o processo de reação consistia na quebra das redes de siloxano no agregado, ocasionado pelo ataque dos íons hidroxilas, para produzir álcalis silicato e ácido silícico. Esse processo pode ser observado na esquematização da reação a seguir:

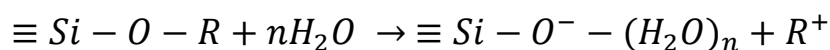




O radical  $R^+$ , representa o íon alcalino, que pode ser o sódio ou potássio ( $Na_2$  e  $K_2$ ). A pouca produção de ácido silícico reage imediatamente com outros íons hidroxila, conforme a equação química a seguir:



O resultado das duas reações acima é o silicato alcalino chamado de gel de sílica alcalina tendo características amorfa e higroscópica. Na segunda etapa sugerida, é a expansão do gel por absorção de água livre dada pela seguinte reação, em que  $n$  é o número de hidratação:



#### 2.4.1.1 Mecanismo de formação do gel

De acordo com Ichikawa e Miura (2007), a ocorrência da reação álcali-sílica no concreto de cimento Portland se desenrola em vários estágios. Rahman e Lu (2019) afirmam que o processo se inicia com a dissolução dos componentes silicosos na superfície das partículas do agregado reativo.

Apesar das muitas pesquisas realizadas desde meados do século XX para identificar os mecanismos que regem a RAS, a química exata da expansão ainda não é totalmente compreendida. Segundo Ichikawa e Miura (2007), o mecanismo da RAS pode ser dividido em três estágios distintos:

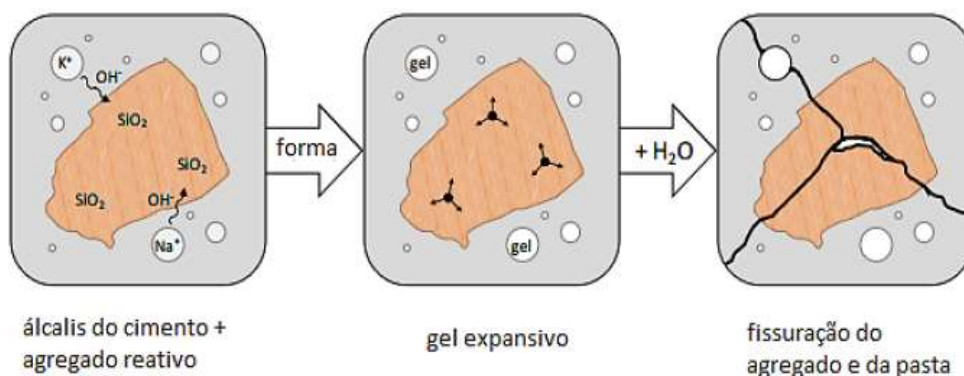
**Hidratação (primeiro estágio):** Este estágio envolve a hidrólise da sílica reativa (siloxano) por íons hidroxila ( $OH^-$ ). O agregado reativo é atacado pelos íons hidroxila que permanecem dissolvidos na solução dos poros com pH elevado (12,5 – 13). Esse ataque à estrutura do núcleo de silicato resulta na quebra das ligações siloxano ( $\equiv Si-O-Si \equiv$ ), substituindo-as por ligações silanol ( $\equiv Si-O-H$ ), como demonstrado anteriormente. Este processo é lento devido à participação mais lenta do agregado em comparação com a pasta de cimento. A expansão continua enquanto houver quantidade suficiente de sílica reativa, hidróxido

alcalino e teor de água na estrutura do concreto. O esgotamento de qualquer um desses constituintes pode limitar a produção e a difusão do gel.

**Neutralização (segundo estágio):** Neste estágio, os grupos fracos de silanol reagem ainda mais com os íons hidroxila para gerar o gel de alcalino-silicato. É um estágio de balanceamento de carga, onde os íons (K ou Na) são atraídos pelas espécies de cargas negativas e difundidos no gel para iniciar o equilíbrio de carga na solução básica de poros (PREZZI et al., 1997).

**Osmose (terceiro estágio):** No terceiro estágio, o gel hidrofílico de alcalino-silicato formado nos estágios anteriores absorve água ou umidade da pasta de cimento hidratada ou do ambiente circundante, devido à pressão osmótica, conforme teoria proposta por Diamond (1997), fazendo com que o gel aumente de volume e induza danos no concreto. A Figura 19 ilustra a caracterização desses estágios.

Figura 19 – Mecanismo ilustrativo dos estágios da reação álcali-sílica.



Fonte: Deschenes (2009)

Em estudos mais recentes, Saouma et al. (2015) delinearam os estágios sequenciais da Reação Álcali-Sílica (RAS) em relação às interpretações petrográficas da evolução do processo:

**a) Nucleação:** A reação se inicia ao redor do agregado reativo, sem provocar expansão inicialmente.

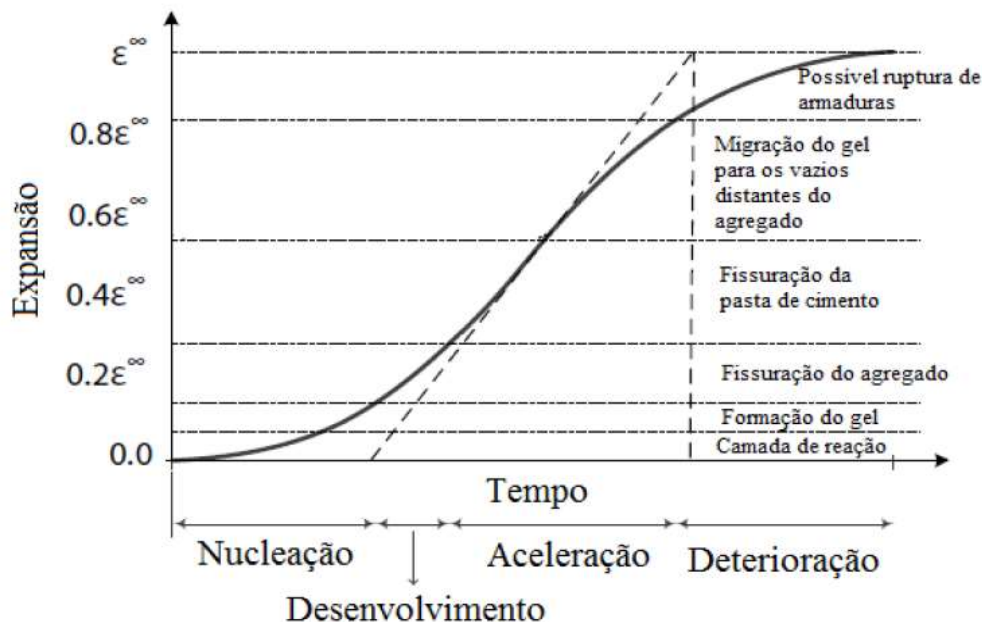
**b) Desenvolvimento da reação:** O gel se forma nos poros do agregado reativo, iniciando a expansão. A pressão exercida pelo gel nos poros leva à fissuração do agregado.

**c) Aceleração da reação e deterioração:** As fissuras no agregado reativo começam a propagar-se para a pasta de cimento, tornando perceptível a deterioração do concreto. Essas fissuras se ampliam e o gel se expande pelos poros do concreto.

**d) Deterioração severa:** A estrutura começa a sofrer comprometimento. Os danos podem incluir o rompimento da armadura, distorção e perda de integridade estrutural.

A representação ilustrativa desses estágios da RAA conforme Saouma et al. (2015) pode ser observada na Figura 20. O gráfico apresentado na Figura 20 demonstra a máxima deformação volumétrica observada na estrutura devido à reação álcali-agregado.

Figura 20 – Interpretação petrográfica da evolução da RAS.



Fonte: Saouma *et al.* (2015).

Outros estudos corroboraram a importância dos íons de cálcio ( $Ca^{+2}$ ) no desenvolvimento da Reação Álcali-Sílica (RAS). De acordo com Chatterji (1989)

*apoud* Peterson (2000), foi sugerido que a difusão da sílica para outras áreas é influenciada pela concentração local de  $Ca^{+2}$ .

Observou-se que à medida que a concentração de  $Ca^{+2}$  diminui, a tendência da sílica de se difundir aumenta, indicando que a presença desses íons é um requisito crucial para a ocorrência da reação. Portanto, quando o gel alcalino-sílica hidratado se forma e difunde-se do agregado para os poros da matriz cimentícia, ocorre uma interação com os íons de cálcio ( $Ca^{+2}$ ) da pasta de cimento, resultando na formação de um gel de hidrato alcalino-cálcio-silicato (Pan *et al.*, 2012). Compreender esse processo é fundamental para compreender o mecanismo da RAS.

Esta interação entre a sílica, os íons de cálcio e os álcalis na matriz do concreto desempenha um papel significativo na evolução da RAS, influenciando diretamente a expansão e a deterioração do material. Assim, estudar o papel dos íons de cálcio neste contexto contribui para uma compreensão mais completa da cinética e dos fatores que influenciam a RAS, fornecendo insights importantes para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e controle dessa reação indesejada.

#### **2.4.1.2 Mecanismo Topoquímico**

Nas publicações mais antigas é comum o entendimento que a reação álcali-sílica é de natureza topoquímica. Larive (1997) menciona que a reação química é chamada de topoquímica quando o local onde ocorre a reação é fixado por suas próprias condições de desenvolvimento.

Várias pesquisas importantes como Stanton (1940), Powers e Steinour (1955a), Dent-Glasser e Kataoka (1981) admitem que a formação e expansão do gel sempre ocorrem na interface agregado-cimento, sendo de natureza topoquímica.

Com base no conhecimento da reação topoquímica tem-se dois mecanismos para explicar a expansão macroscópica do material que são a pressão osmótica e pressão de imersão.

#### **2.4.1.3 Mecanismo de Trans-solução**

O papel crucial da solução alcalina na formação do gel é destacado pelo mecanismo de trans-solução. Este mecanismo topoquímico é governado pelo sentido cinético da difusão da solução alcalina através do agregado.

Durante muitos anos, na França, vários autores se basearam principalmente na visão de trans-solução de Le Châtelier, que demonstrou sua eficácia na química do cimento. A premissa central de Le Châtelier é que todas as reações químicas ocorrem na solução intersticial após os diferentes elementos das espécies minerais terem se transformado em estado iônico (LARIVE, 1997).

Por outro lado, o mecanismo de trans-solução é controlado pela dissolução do agregado na solução presente nos poros do concreto (ULM *et al.*, 2000). Os pioneiros dessa teoria são Dron e Brivot, e sua abordagem detalhada pode ser encontrada em Dron & Brivot (1992) e Dron & Brivot (1997).

A compreensão desses mecanismos é essencial para uma abordagem mais precisa da Reação Álcali-Sílica (RAS), proporcionando insights valiosos para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e controle dessa reação prejudicial em estruturas de concreto. Esta discussão ressalta a importância de considerar diferentes perspectivas teóricas para avançar nosso entendimento sobre o comportamento do concreto sujeito à RAS.

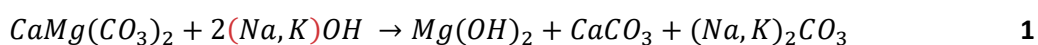
#### **2.4.2 Mecanismo de Reação Álcali-Carbonato (RAC)**

Os calcários dolomíticos, suscetíveis à Reação Álcali-Carbonato (RAC), geralmente consistem petrograficamente em cristais rômnicos de dolomita, com tamanhos variando de 20 a 50  $\mu\text{m}$ , dispersos em uma matriz de calcita microcristalina de 2 a 6  $\mu\text{m}$  de tamanho, juntamente com minerais argilosos de dimensões inferiores a 2  $\mu\text{m}$ .

Durante o ataque dos hidróxidos alcalinos presentes no fluido poroso do concreto, os cristais de dolomita passam por um processo de deslomitização,

conforme evidenciado na reação 1. Esse processo abre canais que facilitam a penetração dos íons em camadas mais profundas das partículas reativas.

Esta descrição detalhada da composição e do comportamento dos calcários dolomíticos explica como esses materiais estão predispostos à RAC e como o processo de desdolomitização desempenha um papel fundamental na progressão dessa reação indesejada. A compreensão desses mecanismos é crucial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e controle da RAC em estruturas de concreto (KANGNI-FOLI *et al*, 2020; HUANG *ET AL.*, 2019)

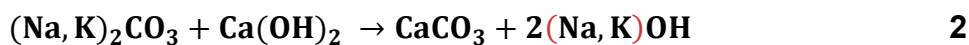


dolomita	hidróxido alcalino	brucita	calcita	carbonato alcalino
----------	--------------------	---------	---------	--------------------

A expansão e fissuração do concreto sobre efeito da RAC originam-se basicamente da expansão das partículas do agregado calcário que reagem individualmente, possivelmente por uma ou uma combinação dos seguintes processos (SWENSON & GILLOTT 1964; KONIGSBERGER *et al*, 2018; MILLING *et al.*, 2020).

- Pressões hidráulicas causadas pela migração de moléculas de água e íon alcalinos para espaços restritos da matriz de calcita/argila ao redor dos rombos de dolomita.
- Adsorção de íons alcalinos e moléculas de água nas superfícies dos minerais de argila, em torno dos grãos de dolomita,
- Crescimento e rearranjo dos produtos de desdolomitização (brucita e calcita).

Os carbonatos alcalinos reagem eventualmente com a portlandita na matriz de concreto, regenerando os hidróxidos alcalinos na solução de poros conforme a reação 2.



carbonato alcalino	portlandita	calcita	hidróxido alcalino
--------------------	-------------	---------	--------------------

De acordo com Rogers et al. (2000), conforme citado por Fournier (2004), a natureza da Reação Álcali-Carbonato (RAC) sugere que ela poderia continuar quase indefinidamente. Também foi observado que os agregados suscetíveis à RAC no Canadá causam expansões rápidas e significativas, como evidenciado nos testes de prismas de concreto.

A presença de agregados reativos desencadeia uma reação deletéria que resulta em expansões e fissuras dentro dos primeiros três anos de vida útil do concreto, desde que outras condições essenciais para a RAC estejam presentes.

Entretanto, ao contrário da Reação Álcali-Sílica (RAS), os problemas relacionados à RAC ainda são limitados a algumas regiões isoladas em todo o mundo. Como resultado, houve relativamente pouca pesquisa sobre esse tema (THOMAS et al., 2013).

Essa discussão destaca a importância de compreender a natureza e os padrões de ocorrência da RAC, bem como a necessidade de uma investigação mais aprofundada para abordar os desafios associados a essa reação específica. Enquanto a RAS recebeu mais atenção devido aos seus efeitos mais generalizados, a RAC também representa uma preocupação significativa em certas áreas e merece uma consideração cuidadosa na formulação de políticas e práticas de construção.

## **2.5 RESUMO**

Até o momento, uma descrição abrangente do processo reacional da Reação Álcali-Sílica (RAS) foi delineada, abarcando as teorias existentes, os experimentos realizados, os parâmetros que potencializam e influenciam a RAS, bem como os modelos que explicam esse fenômeno complexo.

Ao longo do escopo desta pesquisa, fica evidente que, desde o primeiro registro da RAS, inúmeras investigações foram conduzidas, utilizando abordagens metodológicas diversas para explicar essa reação. A necessidade premente de compreender os efeitos dessa patologia na estrutura de concreto deu origem a

uma busca científica significativa, visando contribuir de forma substancial para o entendimento desse fenômeno.

A busca pelo entendimento dos mecanismos e dos fatores que influenciam a RAS representou marcos importantes a nível mundial, especialmente quando se tratava de agregados contendo sílica/silicato reativos. Atualmente, continuam sendo realizadas diversas pesquisas, especialmente no que diz respeito à RAS, que afeta inúmeras estruturas em vários países. A Figura 21 ilustra alguns pontos relevantes do contexto histórico relacionado à RAS.

Figura 21 – Contexto histórico referente a RAA



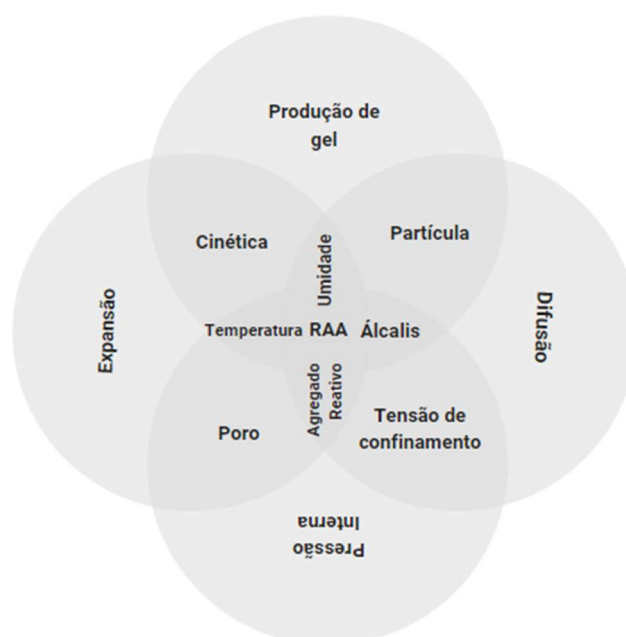
Fonte: O autor (2023)

A importância de compreender os fatores que influenciam a RAS e revisar esses estudos na literatura contribui para análises mais detalhadas e precisas do processo químico da RAS, especialmente quando se propõem modelos matemáticos preditivos.

Embora os modelos matemáticos tenham uma natureza heterogênea, seus resultados convergem para os mesmos pontos principais: a formação de gel, expansão e fissuras. No entanto, correlacionar os estudos apresenta certa dificuldade devido à heterogeneidade conceitual relacionada aos modelos e à fenomenologia, bem como aos fatores que influenciam e potencializam a reação, como temperatura, umidade, tensão de confinamento e porosidade, conforme ilustrado na Figura 22.



Figura 22 – Esquema representativos dos fatores que influenciam a RAS e são inputs para modelagem matemática



Fonte: O autor (2023)

Ao analisar a Figura 22, observam-se tendências correlacionadas nos modelos matemáticos referentes à fenomenologia e aos fatores que influenciam a reação. Quando o modelo matemático para a RAS aborda o processo expansivo ou pressão interna, parte-se da premissa de que já houve a produção de gel, a qual pode ser modelada com base no teor de álcalis, umidade e granulometria do agregado reativo que potencializam a reação. A produção de gel é influenciada pela temperatura, que tem um impacto direto na velocidade de reação do sistema.

A diversidade de variáveis que interferem na RAS, conforme discutido nos itens anteriores, demanda a necessidade de modelar o fenômeno de forma a permitir a previsão e a compreensão da RAS com base em dados de entrada. No próximo capítulo, será abordado o estado da arte dos modelos matemáticos preditivos da RAS, visando contribuir para a formação de um dossier abrangente sobre o tema, facilitando assim a tomada de decisões para novas contribuições.

### **3 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA**

O planejamento desta pesquisa visou sistematizar a literatura existente sobre modelos matemáticos para a Reação Álcali-Sílica (RAS). A revisão da literatura desempenha um papel crucial no desenvolvimento de trabalhos científicos, sendo a escolha da metodologia uma decisão fundamental para selecionar os estudos mais relevantes para a investigação. Portanto, analisou-se a importância de uma análise abrangente do estado da arte dos modelos matemáticos para a RAS.

Uma análise mais abrangente permite compreender o panorama das publicações sobre o tema, evitando trabalhos duplicados, contribuindo para o aprimoramento e aplicação da pesquisa, identificando possíveis lacunas nos estudos e avaliando os recursos necessários para a construção de um estudo, entre outras análises.

De acordo com Baek et al. (2018), os artigos de revisão de literatura estão entre os mais procurados pelos leitores de publicações científicas. No entanto, os trabalhos de revisão da literatura sobre modelagem matemática para a RAS são escassos.

Grant e Booth (2009) identificaram 14 variações de revisão de literatura, que podem variar desde uma visão geral até revisões sistemáticas e meta-análises. É importante diferenciar uma revisão tradicional da literatura de uma revisão sistemática da literatura (RSL).

Na revisão tradicional, o pesquisador reúne informações e discorre sobre o conjunto de artigos considerados importantes para a pesquisa. Por outro lado, a revisão sistemática da literatura é caracterizada por uma questão explícita, definida como uma análise abrangente e sistemática de estudos.

Vários autores têm buscado categorizar as tipologias possíveis de revisões sistemáticas devido à diversidade de áreas de conhecimento. Assim, Siddaway, Wood e Hedges (2019) classificam as revisões sistemáticas em revisões

sistemáticas com meta-análise, revisões sistemáticas narrativas e revisões sistemáticas com meta-síntese.

Para esta pesquisa, adotou-se a metodologia de revisões sistemáticas com meta-análise, que propõe uma série de passos (planejamento, condução e documentação). A escolha dessa metodologia está relacionada aos métodos sistemáticos para identificação, seleção e avaliação crítica dos estudos mais relevantes sobre RAS. O objetivo da sistematização é reduzir possíveis vieses e erros sistemáticos que afetam a validade da investigação, tanto na revisão da literatura quanto na seleção dos artigos, bem como na avaliação crítica de cada estudo. A meta-análise acoplada à revisão sistemática foi adotada para incluir e aumentar o poder estatístico, verificando a consistência da pesquisa.

A finalidade de elaborar uma revisão sistemática sobre a RAS é localizar os estudos mais relevantes existentes e sintetizar suas respectivas contribuições. Conforme Denyer e Tranfield (2009), uma vez que os estudos relativos à pesquisa forem coletados e avaliados, inicia-se o processo de análise dos dados, que visa examinar os estudos individualmente e compreender como os elementos se relacionam entre si.

As etapas da pesquisa consistiram em três fases, conforme descrito a seguir:

**1ª Etapa (Revisão sistemática):** consistiu em: a) *planejamento*: foi levado em consideração a necessidade de uma RSL, após constatação positiva foi definido o tema, as escolhas das bases de dados e definição da sintaxe de busca; b) *condução*: nesta etapa foi realizado a pesquisa bibliográfica. Os artigos encontrados nas bases de dados que se enquadravam no tema da pesquisa, foram inseridos numa planilha do *Excel*, posteriormente foi realizado uma filtragem dos artigos selecionados. Após a filtragem, houve a aplicação dos critérios de inclusão e pôr fim a seleção dos artigos; c) *documentação*: foi realizado a síntese dos dados, em seguida a sistematização dos resultados, obtenção de conclusões e pôr fim a disseminação.

**2ª Etapa (Análise bibliométrica):** consistiu na obtenção do Gráfico *bibliométrico*, gerado pelo programa *VOSviewer* (versão 1.6.16 gratuita), a partir dos artigos selecionados na primeira etapa.

**3ª Etapa (Meta-análise):** consistiu em realizar uma análise estatística para a obtenção do gráfico *Forest Plot*. Esse gráfico foi gerado com o auxílio do programa *Review Manager 5.3* (versão gratuita) nos artigos selecionados na primeira etapa.

Os itens a seguir descrevem cada uma dessas etapas de forma mais detalhada. As três etapas são complementares para compor as análises propostas nesta pesquisa.

### 3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão sistemática da literatura (RSL) é caracterizada por uma abordagem que parte de uma questão explícita, definida como uma análise abrangente e meticulosa dos estudos disponíveis. Esta metodologia compreende uma estratégia de rastreio e inclusão de estudos, seguida pela extração de dados (codificação), análise criteriosa dos dados e posterior apresentação dos resultados (Ravindran & Shankar, 2015).

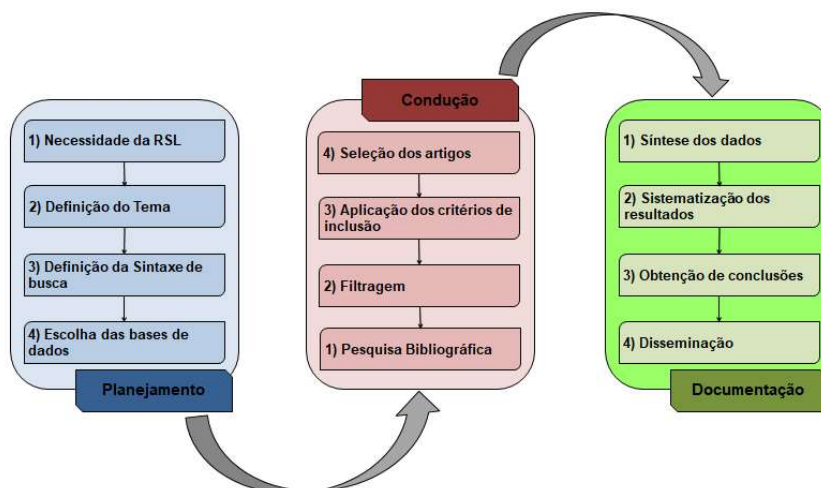
Segundo MacLure et al. (2016), os motivos para a realização de uma RSL são numerosos e diversos, incluindo:

- Identificar, avaliar e interpretar evidências de pesquisa disponíveis relevantes para um tópico específico;
- Ajudar a informar práticas e políticas, fornecendo evidências integradas e imparciais nas quais as decisões de baseiem;
- Identificar lacunas na literatura para informar estudos futuros;
- Minimizar tendências, usando métodos explícitos e sistemáticos.

A partir disso, adotou-se nesta pesquisa a metodologia de RSL, a qual propõe uma série de passos (planejamento; condução e documentação), como ilustrado na Figura 23. A finalidade de elaborar uma revisão sistemática sobre RAS é de

localizar os estudos mais relevantes existentes e sintetizar suas respectivas contribuições.

Figura 23 – As três etapas da revisão sistemática



Fonte: Vilela et al. (2017) adaptado

### 3.1.1 Planejamento

Inicialmente, identificou-se uma escassez de trabalhos que abordassem de forma abrangente o estado da arte sobre modelagem matemática da Reação Álcali-Sílica (RAS). Durante a busca, foram encontrados estudos significativos, incluindo os trabalhos de Saouma & Xi (2004) e Pan et al. (2012); Carles-Gilbergues e Hornain (2014); Gomes (2017); Esposito e Hendriks (2017). A Tabela 2 apresenta uma síntese dos principais trabalhos realizados por esses autores.

Tabela 2 – Autores com abordagem ampla sobre estudos de modelagem de RAS

<b>Saouma &amp; Xi (2004) e Pan et al (2012)</b>	Realizaram uma pesquisa que classificaram os modelos em escala macroscópica, que simulam o comportamento estrutural das peças de concreto, e nas escalas microscópicas ou mesoscópicas, que analisam o fenômeno em relação ao produto da reação ou em relação ao agregado.
<b>Carles-Gilbergues e Hornain (2014)</b>	Propuseram uma classificação dos modelos em relação a sua escala (microscópica, mesoscópica e macroscópica), conforme natureza (determinística ou probabilística) e de acordo com sua vocação (explicativa ou preditiva).

<b>Gomes (2017)</b>	Fez uma revisão sistemática sobre RAS dos modelos preditivos de artigos publicados entre 2012 até 2017. A revisão sistemática dessa pesquisa avaliou parâmetros de entrada e saída, e realizou uma análise quantitativa dos modelos preditivos.
<b>Esposito e Hendriks (2017)</b>	Categorizaram os modelos com base nos seus parâmetros de entrada e saída. Com base nesses parâmetros foi possível identificar o tipo de abordagem do modelo: se químico; se mecânico. Com a identificação do tipo de abordagem pode-se classificar os modelos em quatro grupos: difusão, produção de gel; pressão interna e processo de expansão.

Fonte: O autor (2023)

A identificação inicial de uma escassez de estudos abrangentes sobre modelagem matemática da RAS destaca a necessidade de um esforço concentrado para preencher essa lacuna de conhecimento. Os estudos mencionados representam uma amostra significativa das pesquisas realizadas nesse campo, fornecendo insights valiosos sobre diferentes abordagens, metodologias e resultados relacionados à modelagem da RAS. Essa diversidade de fontes pode enriquecer a compreensão do fenômeno da RAS e auxiliar na formulação de modelos mais abrangentes e precisos. A síntese apresentada na Tabela 2 permite uma análise comparativa dos principais aspectos abordados por cada autor, facilitando a identificação de lacunas e tendências na literatura existente.

A partir dessa observação, buscou-se contribuir com uma sistematização dos modelos matemáticos para RAS, que preveem a degradação do concreto. Assim, o tema da pesquisa foi definido, tornando possível compor sintaxe de busca nas bases de dados selecionadas.

Com a definição do tema sobre modelagem, foi possível compor algumas *strings* de busca. Após algumas tentativas e erros, foi constatado que a string que melhor se adequou a pesquisa foi *Alkali sílica reaction AND Model*. As bases de dados selecionadas foram: Web of Scienc, Scopus e Engineering Village.

### 3.1.2 Condução

Em janeiro de 2020, foi aplicada a síntese de busca álcali sílica *reaction AND model*, nas bases de dados selecionadas. A busca dos artigos para compor a base de dados, foi composta por quatro fases: a pesquisa bibliográfica; a filtragem dos artigos, a aplicação dos critérios de inclusão e a seleção dos artigos. A seguir, cada uma dessas fases está descrita de forma detalhada.

#### 3.1.2.1 Fase Pesquisa Bibliográfica

A fase *pesquisa bibliográfica* foi realizada nas bases de dados da Web of Science, da Engineering Village e na Scopus; estas foram escolhidas por serem as que mais publicam artigos técnicos científico na engenharia civil no tema RAS.

Para o procedimento da pesquisa bibliográfica foi utilizada a síntese de busca ***Alkali sílica reaction AND Model***. A partir da aplicação dessa síntese de busca em cada base de dados, foram encontrados os seguintes quantitativos de artigos: 66 artigos na **Web of Science**; 360 artigos na **Engineering Village** e 312 artigos na **Scopus**.

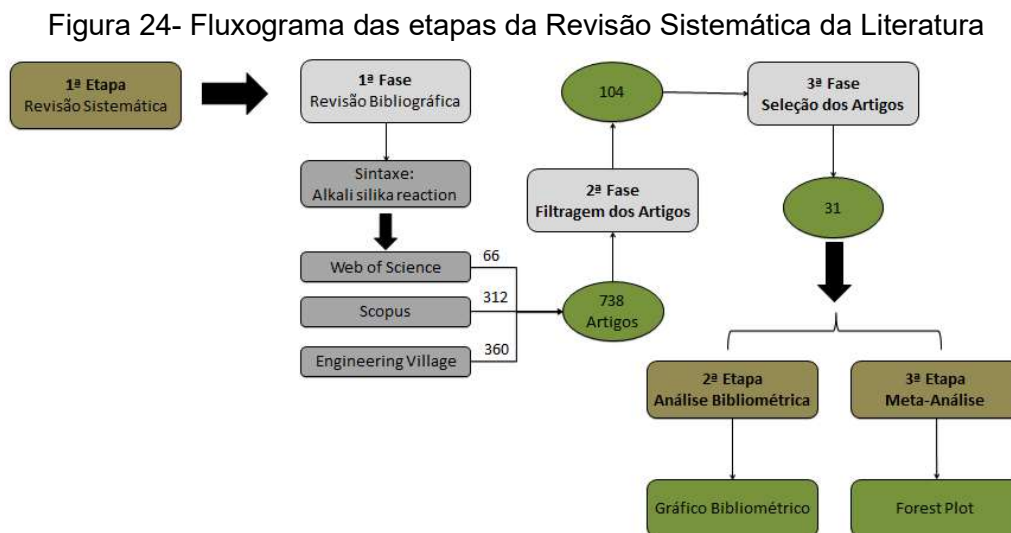
#### 3.1.2.2 Fase Filtragem dos Artigos

A fase *filtragem dos artigos* foi realizada a partir da organização dos 738 artigos selecionados na fase anterior: *pesquisa bibliográfica*. Os 738 artigos foram organizados em uma planilha Excel para serem filtrados de acordo com os seguintes critérios: a repetição do artigo em mais de uma base de dados; o ano de publicação, para a determinação da cronologia da evolução dos métodos; o primeiro autor, para verificar quais artigos são os mais citados, pois é o primeiro autor que aparece; a quantidade de vezes que o artigo foi citado, por ser um indicador da importância da pesquisa desenvolvida no tema em tela; e o tipo de abordagem dos modelos matemáticos, para identificar se consideravam efeitos químicos; efeitos mecânicos ou efeito químico-mecânico da reação de RAS. Após a filtragem, foram selecionados 104 artigos.

### 3.1.2.3 Fase Seleção dos Artigos

A fase *seleção dos artigos* foi realizada a partir dos 104 artigos da fase anterior *filtragem dos artigos*. Essa fase consistiu na seleção de artigos com base na leitura dos seguintes itens dos 104 artigos: o título, por ser um indicador prévio do que será abordado no artigo; o ano de publicação, para verificar a frequência do tipo de abordagem do tema modelagem matemática de RAS, em um intervalo de tempo; o resumo, para entender com maior aproximação a pesquisa desenvolvida e apresentada; e, a verificação das referências bibliográficas, para saber quais os autores que são a base do estado da arte da pesquisa desenvolvida, bem como a frequência de citações que são consideradas “clássicas no tema em estudo”.

Estes critérios foram adotados para minimizar o caráter subjetivo desta seleção. Assim, a amostra de 104 artigos foi reduzida para uma amostra de 31 artigos, no tema modelagem matemática da RAS no intervalo de tempo, desde 1974 até 2020. A Figura 24 ilustra as três etapas dessa revisão sistemática.



Fonte: O autor (2023)

### 3.1.3 Documentação

Após as etapas *planejamento* e *condução*, encontrou-se um total de 104 artigos durante a busca nas bases de dados, os quais foram organizados em planilha



*Excel*. Com os dados na planilha efetuou-se sua síntese, na qual permitiu obter uma visão abrangente em relação a distribuição temporal das publicações, dos pesquisadores, meios de publicações dentre outros discutidos nos resultados.

Após a síntese, iniciou-se de forma detalhada a análise dos 31 artigos selecionados, de modo a obter informações dos modelos neles propostos. Foram organizados de forma a conceder uma ponderação a respeito dos tipos de modelagem, parâmetros, escalas de análises, da evolução fenomenológica da reação, dentre outras.

Essa organização dos dados permite que o leitor tenha uma visão profunda e crítica acerca da evolução dos modelos, das técnicas matemáticas adotadas e da implementação computacional quem vem sendo adotado, como também verificar as propostas dos modelos nos últimos anos.

### 3.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Os dados recolhidos para a análise bibliométrica no tema desta pesquisa, foram recolhidos na base *Scopus*. Embora outras bases bibliográficas relevantes tenham sido adotadas nesta pesquisa, a *Scopus* foi selecionada por indexar uma maior quantidade de artigos em relação às demais.

Evidentemente, esta escolha não exclui possíveis erros ou limitações. Esses erros podem conter: citações equivocadas ou ausentes; autores ou publicações que podem mudar de nome ou sobrenome.

Com os dados coletados e salvos na extensão de leitura, pode-se realizar o tratamento bibliográfico, que passou pela construção e análise de redes com auxílio do VOSviewer baseado na bibliografia coletada.

O *software* VOSviewer (Visualization of Similarities Viewer), que faz parte de um conjunto de softwares gratuitos ([www.vosviewer.com](http://www.vosviewer.com)), cuja ênfase está na análise e na visualização de grande conjunto de dados bibliográficos, com uma abordagem *distance-based*.

Desta forma, os nodos da rede bibliográfica são designados de forma que a distância entre eles indica aproximadamente a sua relação segundo determinado critério desejado, formando um mapa.

Cada um desses critérios adotados destaca um aspecto único da rede formada sobre o tema. Para esse estudo foram adotados dois critérios complementares: o agrupamento por fontes e o agrupamento por co-ocorrência de termos.

O agrupamento por fontes procura estabelecer relações entre as unidades com relação às suas referências. Os critérios de agrupamento por co-ocorrência de termos, tenta identificar os elementos em comuns nos textos da base de dados selecionada, e assim identificar termos significativos.

### 3.2.1 Técnica Bibliométrica do VOSviewer

De acordo com Van Eck & Waltman (2010) a técnica do VOSviewer de construção do mapa bibliográfico é feita em três etapas. Um exemplo dessa construção foi demonstrado por Olczyk (2016), onde o autor ilustrou a construção através do critério de co-ocorrência de termos. A primeira etapa é a construção de uma matriz de similaridades, em que os elementos são dados por:

$$A_{Sij} = \frac{C_{ij}}{c_i c_j}$$

Onde:

$C_{ij}$  – É a co-ocorrências dos elementos  $i$  e  $j$ ;

$c_i$  e  $c_j$  – São as co-ocorrências totais de  $i$  e de  $j$ .

Dessa forma, a próxima etapa será a construção da rede bibliográfica baseada nos elementos, definidos acima, da matriz. A lógica da posição desses elementos é simples, sendo da seguinte forma: elementos próximos (bastante similares) são acoplados próximos uns dos outros, enquanto os elementos não próximos (pouco similares) devem permanecer mais distantes. Então a função localização a ser minimizada é.

$$V(X_i, \dots, X_n) = \sum_{i < j} S_{ij} \|X_i - X_j\|^2$$

Sendo:

$X_i$  – Vetor de localização do elemento  $i$ ;

$\|-\|$  – É a norma da diferença entre as posições de  $i$  e de  $j$ .

Os autores adotaram uma estratégia para evitar mapas triviais, onde todos os itens tenham a mesma posição. Assim, foi imposta a condição de que a distância média entre dois itens fosse igual a 1. Desta forma a equação pode ser definida da seguinte maneira:

$$\frac{2}{n(n-1)} \sum_{i,j} \|X_i - X_j\| = 1$$

Para garantir a consistência da solução encontrada, foram imposta três condições necessárias, sendo elas: 1- *translação* significa dizer que a solução tem que estar na origem; 2- *rotação* menciona que a solução deve ser encontrada de forma que, no eixo horizontal a variância deve ser maximizada; 3- *reflexão* está condição estabelece que a solução encontrada se reflete no eixo vertical, se a mediana de  $X_{11}, \dots, X_{n1}$  for maior que zero, caso contrario reflete-se no eixo horizontal (VAN ECK & WALTMAN, 2010).

Com a similaridade entre as unidades determinada e o mapa construído, são-lhes atribuídos grupos (clusters). Assim, cada unidade de análise entra em um grupo, sem sobreposição e unidades sem grupos. Para isso, a função é maximizada pelo VOSviewer para seguinte função:

$$V(c_1, \dots, c_n) = \sum_{i < j} \delta(c_i c_j) (S_{ij} - \gamma)$$

Onde

$n$  – É o número de publicações;

$S_{ij}$  – A similaridade já definida entre  $i$  e  $j$ ;

$\gamma$  – Parâmetro de resolução da equação;

$c_1$  – Cluster ao qual a unidade  $i$  é atribuída;

$\delta(X_i X_n)$  – Igual a 1, se  $i$  e  $j$  forem iguais, e 0 caso contrário.

Para esta pesquisa foi demonstrado o procedimento matemático para o agrupamento por co-ocorrência de termos por ser o mais importante. Os procedimentos para o critério de agrupamento por Fontes ou qualquer outro tipo de agrupamento utilizado pelo software VOSviewer são semelhantes, sendo distinta a especificação matemática das equações.

### 3.2.2 Sistematização da Literatura (VOSviewer)

Com o cenário de publicações de artigos científicos ao longo dos anos sobre RAS, pretende-se avaliar a evolução das pesquisas e assim contextualizar o atual estágio da literatura sobre o tema em questão.

Nesta seção, o propósito é utilizar o software VOSviewer, para identificar e caracterizar as principais linhas de pesquisas. Será utilizado como unidade de análise dos grupos as fontes e os termos relevantes nos artigos, sendo eles analisados dos títulos, nos resumos e nas palavras-chaves.

#### 3.2.2.1 Agrupamento por Fontes (Revistas, Livros)

Ao analisar as relações entre os meios de publicações (revistas, livros, etc.) de acordo com os critérios de acoplamento bibliográfico, pode-se observar uma primeira aproximação em relação à forma como se organizam as linhas de pesquisas referentes à RAS.

A obtenção de um panorama que consta as publicações e suas relações torna-se interessante para análise dos dados que compõe a pesquisa. Desta forma, podem-se observar as condições de proximidade dos meios de publicações, ou seja, avaliar o tema acerca do mesmo. Além disso, podem ser observados grupos distintos que agregam diferentes contribuições, ou concentrações no tema em pesquisa a depender do critério adotado.

O uso do critério de acoplamento bibliográfico tenta aproximar dados que compartilham referências em comum. No caso, quanto mais houver coincidência

de determinados veículos de publicação citados em comum, maior será a proximidade entre as fontes. Os grupos formados por esse procedimento identificam as relações mais fortes dentro do grupo de fontes como um todo.

### **3.2.2.2 Agrupamento por Co-ocorrência de termos**

Completando o quadro de caracterização da literatura acerca da RAS, convém analisar os termos que as publicações compartilham entre si. Desta forma, pode-se obter uma aproximação mais relevante do conteúdo de cada agrupamento, como também complementar os agrupamentos já observados nos dados de análise. O objetivo deste critério é identificar os termos e expressões que são significativos nos resumos, palavras-chaves e títulos das publicações.

Com a inserção dos 31 artigos selecionados, o software efetuou uma análise para quantificar a quantidade de termos que as publicações compartilham entre si. A entrada inicial para selecioná-las foi o número mínimo de oito ocorrências (o padrão no software é de dez ocorrências).

Na presente amostra, foram identificados 1949 termos ao todo, dos quais 72 preenchem o requisito solicitado. Destes, foram selecionados os 60% mais relevantes (padrão do software). Ao final desse procedimento, das 72 palavras, houve uma redução para 43 palavras com maiores relevância para pesquisa.

## **3.3 META-ANÁLISE**

A pesquisa é algo periódico em todas as áreas, sendo que nas últimas décadas a produção científica mundial evoluiu de forma exponencial. Hoje em dia, os meios de comunicações existentes facilitam a busca por estudos sobre a mesma questão de pesquisa. Essa demanda científica é resultado de interesse para o desenvolvimento de novas tecnologias. Porém, essa elevada quantidade de publicações se tornou um problema para a seleção e análise qualificada da literatura.

Esse grande volume de dados encontrado na literatura pode dificultar a contextualização do problema, podendo haver erros de interpretação ou análise.

Diante desse fato, houve várias alternativas para analisar e sistematizar essas informações. Uma das propostas sugerida foi a metaanálise, cujo procedimento é combinar resultados de vários estudos para fazer uma síntese reproduzível e quantificável dos dados.

Assim, uma metaanálise visa obter informação adicional extraído dos dados preexistentes. É um modelo quantitativo que se permite combinar resultados de estudos realizados de forma independente (extraído de trabalhos publicados) e sintetizar suas conclusões ou mesmo extrai novas conclusões.

A proposta do termo meta-análise foi dada a parti da definição realizada por Glass (1976) *apud* Torres (2011). O mesmo autor, através de suas análises introduziu o conceito de tamanho do efeito para fundamentar a integração na comparação de diferenças padronizadas.

Para estatística, o tamanho do efeito é considerado uma medida da força de relacionamento entre as variáveis, como também uma ferramenta que auxilia a determinar se a diferença observada é importante. Para cada estudo é estimado o tamanho do efeito, desta forma pode-se chegar à estimativa global do tamanho do efeito. Para se realizar o cálculo da estimativa global, pode-se utilizar duas abordagens: modelo de efeitos fixos ou modelo de efeitos aleatórios que serão discutidos mais adiante.

De acordo com Torres (2011) a meta-análise pode ser utilizada em diversas áreas de conhecimentos, tais como em medicina, agricultura, ecologia, engenharia, etc. No entanto, no Brasil essa técnica está mais consolidada na área de saúde.

Para um trabalho meta-analítico, a codificação dos dados das publicações é essencial. Também, torna-se necessário codificar o objetivo experimental anunciado e avaliado em cada publicação. Desta forma, a codificação permite localizar e/ou avaliar estatisticamente, as características principais dos modelos matemáticas para RAS, analisar os fatores experimentais dos modelos, etc.

Desta forma, a meta-análise tem como principais vantagens: sumarizar vários estudos; analisar conflitos existentes na literatura; pode enfatizar maiores estudos sobre o tema; aumenta a precisão dos estudos dentre outros.

### 3.3.1 Modelos estatístico para meta-análise

Para compor a meta-análise, é necessário combinar os resultados de diferentes estudos para obter uma estimativa global do tamanho do efeito. Desta forma, o cálculo da estimativa em uma meta-análise é utilizado basicamente dois tipos de modelos. Assim, podem ser utilizados os modelos de efeitos fixos e o modelo de efeitos aleatórios descritos nas seções 4.3.1.1 e 4.3.1.2 respectivamente.

#### 3.3.1.1 Modelo de Efeitos Fixos

No modelo de efeito fixo assume-se que o efeito é o mesmo em todos os estudos e que a diferença entre eles é devida a erros amostrais. Esses erros amostrais, são considerados na literatura como sendo a variabilidade interna de cada estudo.

Seja o número de estudo de uma meta-análise  $J$ , e o efeito observado no estudo  $Y_j$  (com  $j = 1, 2, 3, \dots, J$ ), o modelo de efeito fixo é dado por:

$$Y_j = \theta_m + \varepsilon_j$$

Sendo

$\varepsilon_j$  – Erro aleatório do estudo  $j$

$\theta_m$  – Efeito como a todos os estudos (medida meta-analítica)

É suposto que o erro aleatório tem distribuição normal com média 0 e variância  $\sigma_j^2$  conhecida ( $\varepsilon_j \sim N(0, \sigma_j^2)$ ). É por esse motivo que as medias de risco relativos são calculadas usando escala logarítmica.

Nesse modelo a média pondera entre as medidas de efeito de cada estudo, proporciona uma estimativa pontual de máxima verossimilhança para  $\theta_m$ . Esta ponderação é inversamente proporcional à medida de variabilidade estimada no estudo.

A média de variabilidade tem relação direta com o tamanho da amostra. Ou seja, quanto maior o tamanho da amostra, menor é a variabilidade estimada e, consequentemente, maior o peso do estudo na estimação da medida meta-analítica  $\theta_m$ .

### 3.3.1.2 Modelo de Efeitos Aleatórios

O modelo de efeito aleatório considera que existe uma variação não apenas dentro de cada estudo, mas também entre os estudos. Assim, mesmo os efeitos dos estudos não serem os mesmos, eles são conectados por elementos incomuns que justificam combinar os resultados de cada estudo. Desta forma, o modelo incorpora uma medida de variabilidade dos efeitos entre os diferentes estudos. O modelo de efeitos aleatórios é dado por:

$$Y_j = \theta_m + \zeta_j + \varepsilon_j$$

Sendo

$\varepsilon_j$  – Erro aleatório do estudo  $j$

$\zeta_j$  – Efeito aleatório de cada estudo  $j$

$\theta_m$  – Efeito como a todos os estudos (medida meta-analítica)

É suposto que o erro aleatório tem distribuição normal com média 0 e variância  $\sigma_j^2$  conhecida ( $\varepsilon_j \sim N(0, \sigma_j^2)$ ) e os efeitos aleatório com distribuição normal com média 0 e variância desconhecida  $\tau^2$  ( $\zeta_j \sim N(0, \tau^2)$ ). O parâmetro  $\tau^2$  representa a variabilidade entre os estudos e deve ser estimada.

Nesse modelo também vale a relação, que a média de variabilidade tem relação direta com o tamanho da amostra. Ou seja, quanto maior o tamanho da amostra, maior o peso do estudo na estimação da medida meta-analítica  $\theta_m$ .

### 3.3.2 Gráfico Forest Plot

o modelo de efeitos aleatórios foi utilizado para meta-análise nessa pesquisa, pois os estudos têm elementos em comum, que permitem agrupar as



informações de cada estudo, e possuem efeitos independentes. Na Tabela 1 consta a descrição dos critérios adotados.

Cada critério adotado demonstrado na Tabela 3 foi avaliado em uma escala de 1 a 3 para quantificar a qualidade do estudo; na Tabela 4 consta a descrição da escala de avaliação. Cada artigo foi avaliado de acordo com os critérios da Tabela 3 e a escala da Tabela 4. Com o auxílio da planilha *Excel* foram calculados para cada artigo a soma total das notas dos sete critérios de acordo com a Equação 1.

$$SCRI = \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Onde:

n – Representa a quantidade de critérios;

x – Representa a escala atribuída ao critério;

Scri– Representa a soma dos sete critérios.

Com esta soma (Scri) foi calculada a média ( $\overline{Scri} = Scri/7$ ) e o desvio padrão (dp) dessa média. Este procedimento foi utilizado para obter uma classificação da qualidade. A soma dos 7 critérios pode variar de 7 até 21 pontos. Quanto maior a pontuação do artigo, maior sua qualidade. Os dados obtidos na planilha Excel, foram inseridos no programa *Review Manager 5.3* para obter o gráfico *Forest Plot*. Um fator importante também a ser observado no *Forest Plot* é o teste de inconsistência  $I^2$ , que tem por finalidade medir a porcentagem da diferença entre os diversos estudos que não é explicada por erro amostral, mas sim pela heterogeneidade entre esses estudos.

Tabela 3 – Critérios de avaliação adotados para análise dos artigos.

Critérios	Descrição
1º Descreve o critério de seleção do modelo	Analisar a importância do modelo matemático proposto.
2º Identifica fatores que influencia a RAS	Analisar a importância e a evolução desses fatores.
3º Recolhe dados necessários para entendimento do problema	Analisar quais autores constitui a base do estado da arte da pesquisa desenvolvida.
4º Apresenta e define os parâmetros adotados	Para entender o motivo da utilização de cada parâmetro.

5º Explica o procedimento de modelagem	Verificar se demonstra as etapas da modelagem para entendimento do fenômeno em questão.
6º Utilizam gráficos e tabelas para explicação	Analisar de forma mais critica o comportamento do fenômeno.
7º Elabora conclusões coerentes a partir dos resultados	Verificar a compatibilidade entre resultados e conclusões.

---

Fonte: O autor (2023)

Tabela 4 – Descrição da qualidade dos termos.

Escala	Descrição
1	Quando não atende a expectativa
2	Quando atende parcialmente a expectativa
3	Quando atende a expectativa

---

Fonte: O autor (2023)

#### 4 AGRUPAMENTO DOS ARTIGOS

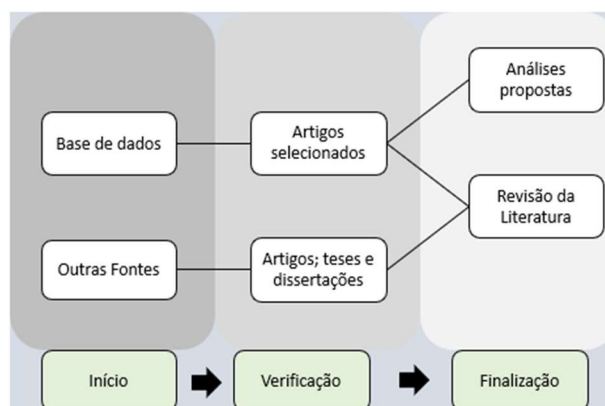
Nesta pesquisa houve uma ramificação dos dados recolhidos para a revisão sistemática da literatura. Pois, alguns trabalhos importantes não foram possíveis ser encontrado nas bases de dados selecionadas. Durante o processo de busca desses trabalhos foi encontrado teses e dissertações pertinentes a esta pesquisa, sendo assim, o agrupamento se deu por:

- a) Artigos selecionados nas bases de dados;
- b) Teses e dissertações pertinentes a esta pesquisa.

Dos artigos encontrados nas bases de dados já citadas, foram submetidos as análises mencionadas no capítulo 3. Já as teses e dissertações foram introduzidas de formar à complementar as discursões desta pesquisa, assim, contribuindo com a robustez dá análise. A figura 25 demonstra essa ramificação da pesquisa.

A partir desse agrupamento pode-se analisar uma contextualização dos modelos matemáticos de RAS, que teve uma demanda muito importante na década de 90. Durante essa década se buscou modelos matemáticos que fossem capazes de simular o processo de expansão do concreto devido a RAS e essa demanda se estende até os dias atuais. No entanto, os modelos existentes na literatura são referentes à reação álcali-silica, pois está reação foi comumente reconhecida em vários países.

figura 25 – Ramificação da pesquisa para compor a revisão da literatura.



Fonte: O autor (2023)

Porém, as reações sejam elas: álcali-sílica; álcali-silicato ou álcali-carbonato, sofrem influência dos mesmos parâmetros (temperatura, umidade e tensão de confinamento) e ambas as reações formam um gel expansivo na presença de umidade. Salientando que a reação álcali-silicato é considerada uma sub-reação da reação álcali-sílica.

Tal semelhança entre as reações evidenciam que os modelos existentes possam ser aplicados a qualquer tipo de RAA com pequenos ajustes nas variáveis ou aplicação de um fator de correção, devido a cinética da reação de cada RAA ser diferente.

#### 4.1 ASPECTOS GERAIS DOS MODELOS MATEMÁTICO DE RAS

A Reação Álcali-Agregado (RAA) foi primeiramente descrita por Stanton na década de 1940 e, desde então, tem sido objeto de numerosas pesquisas. Em resposta ao interesse global por esse fenômeno patológico, em 1974, ocorreu a primeira Conferência Internacional sobre a Reação Álcali-Agregado (ICAAR) em Copenhague, um evento que continua a ser realizado até os dias atuais (Swamy, 1992). Ao longo dos anos, o ICAAR ganhou uma influência significativa, evoluindo de um evento originalmente anual para uma conferência quadrienal de grande prestígio.

Além dos ensaios experimentais, os modelos matemáticos preditivos da RAA também têm sido objeto de estudo com o objetivo de prever danos ao concreto (Allahyari, 2020). Esses modelos consideram uma variedade de parâmetros que influenciam a reação, e ao longo do tempo, têm sido aprimorados gradualmente com base em novos métodos experimentais. Esses avanços levaram a uma melhor compreensão fenomenológica e à incorporação desses modelos em programas computacionais, tanto para resolver equações mais complexas quanto para calibrar os modelos, garantindo assim uma maior precisão nos resultados.

O surgimento e evolução do ICAAR como uma conferência de destaque no campo da RAA reflete o crescente interesse e preocupação global em relação a

esse fenômeno. Esses eventos não apenas fornecem uma plataforma para compartilhar pesquisas e descobertas, mas também desempenham um papel fundamental na promoção da colaboração internacional e no desenvolvimento de diretrizes e práticas recomendadas para lidar com a RAA.

A utilização de modelos matemáticos na previsão da RAA representa uma abordagem complementar aos ensaios experimentais, permitindo uma análise mais abrangente e a identificação de tendências e padrões subjacentes. O contínuo aprimoramento desses modelos, juntamente com a integração de novos métodos experimentais e avanços tecnológicos, contribui para uma compreensão mais profunda e precisa da RAA, auxiliando na tomada de decisões relacionadas ao projeto, construção e manutenção de estruturas de concreto.

#### 4.2 CONTEXTO NACIONAL E INTERNACIONAL DOS MODELOS MATEMÁTICOS DA RAS.

Muitas estruturas afetadas pela Reação Álcali-Silica (RAS) sofrem deterioração ao longo do tempo devido à expansão do gel formado em seu interior. Segundo Helena et al. (2016), a produção de modelos matemáticos para a Reação Álcali-Agregado (RAA) no Brasil ainda está em estágios iniciais de desenvolvimento. Para que um modelo possa ser considerado universal no contexto da RAA ou RAS, é necessário que ele descreva a cinética de formação do gel, a expansão resultante e determine a resposta do concreto a essa expansão. A Tabela 5 apresenta um resumo dos trabalhos nacionais sobre modelagem matemática nessa área.

Tabela 5 - pesquisas acadêmicas brasileiras sobre modelos preditivos de danos para estruturas de concreto afetadas pela RAS.

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Tipo</b>	<b>Universidade</b>
Pappalardo	1998	Tese	Universidade de São Paulo
Farage	2000	Tese	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Carrazedo	2004	Dissertação	Universidade Federal do Paraná
Lopes	2004	Tese	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Madureira	2007	Tese	Universidade Federal de Pernambuco
Nóbrega	2008	Tese	Universidade Federal de Pernambuco
Oliveira	2013	Dissertação	Universidade Federal do Paraná

Rodrigues	2014	Dissertação	Universidade do Rio Grande do Norte
Balbo	2015	Tese	Universidade Federal do Paraná
Posterli	2017	Dissertação	Universidade de São Paulo
Gameleira	2019	Tese	Universidade Federal de Pernambuco
Gameleira Nunes	2020	Tese	Universidade Federal de Pernambuco

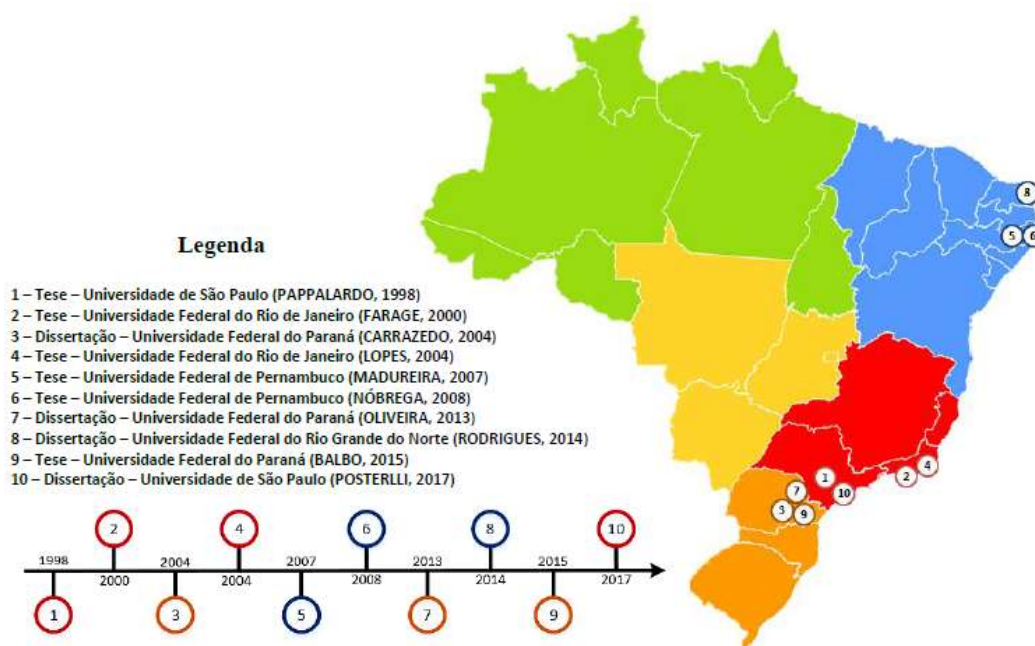
Fonte: HELENA et al 2016. (Adaptado)

A identificação da fase inicial de desenvolvimento dos modelos matemáticos para RAA no Brasil destaca a importância de se investir em pesquisa e desenvolvimento nesse campo. Embora a RAS seja um problema global, as características específicas dos materiais e condições ambientais em diferentes regiões podem influenciar significativamente sua ocorrência e progressão. Portanto, é fundamental que cada país ou região desenvolva seus próprios modelos matemáticos que levem em consideração suas condições locais.

Um modelo matemático eficaz para RAA ou RAS deve ser capaz de capturar não apenas a cinética de formação do gel, mas também a subsequente expansão e os efeitos dessa expansão no comportamento do concreto. A integração desses aspectos permite uma previsão mais precisa dos danos causados pela RAS e, conseqüentemente, a implementação de medidas preventivas e corretivas adequadas para mitigar seu impacto.

A apresentação de um resumo dos trabalhos nacionais sobre modelagem matemática na Tabela 5 oferece uma visão geral dos esforços em andamento no Brasil nesse campo. Isso pode servir como um ponto de partida para futuras pesquisas e colaborações, incentivando o avanço do conhecimento e a inovação na área de RAA e RAS. Na Figura 26 é demonstrado uma representação esquemática dos trabalhos de tese e dissertação no Brasil.

Figura 26- Trabalhos sobre RAA no Brasil

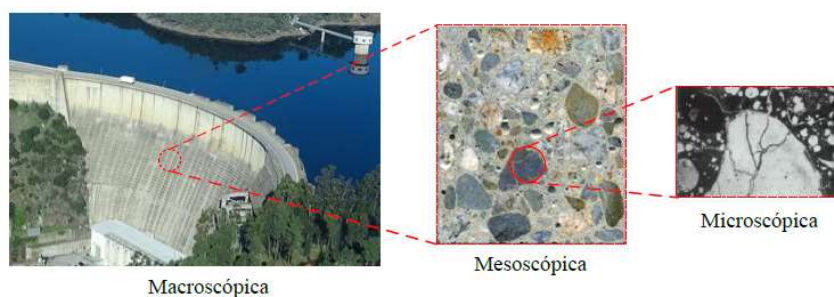


Fonte: Gomes (2017)

Por ser uma reação complexa e um fenômeno conhecido há mais de 80 anos aproximadamente, ainda não há consenso sobre um modelo capaz de descrever com precisão a evolução da Reação Álcali-Agregado (RAA) em uma estrutura de concreto.

Diante dessa complexidade, os modelos foram classificados para facilitar as análises. Pan et al. (2012) classificou os modelos em escalas micro, meso e macro. A Figura 27 esquematiza essas escalas em uma situação real.

Figura 27 -Tipos de escalas de análise de modelos para RAS.



Fonte: Gomes (2017)

Na escala macroscópica, é possível analisar o comportamento estrutural do concreto submetido à RAA, acompanhando as deformações ocasionadas pelo processo expansivo do gel da RAA.

Na escala mesoscópica, observa-se a interação pasta-agregado, onde as propriedades mecânicas são acopladas para descrever o processo de fissuração e tensão interna ocasionada pelo processo expansivo do gel.

Por fim, na escala microscópica, analisa-se o processo fenomenológico da formação do gel expansivo. Cada escala complementa a outra no entendimento fenomenológico da reação, possibilitando o acoplamento entre elas.

No contexto internacional, há um avanço significativo nas pesquisas sobre o tema. Vários trabalhos foram publicados, revisados, discutidos e novas propostas de modelos em níveis cada vez mais avançados têm sido apresentadas. Por exemplo, Allayray et al. (2020) utilizaram Redes Neurais Artificiais (RNA) e demonstraram que o modelo proposto obteve maior precisão nos resultados. Na Tabela 6, são apresentados alguns dos principais modelos matemáticos desenvolvidos para RAA. Esses modelos formam a base do entendimento do desenvolvimento da reação e suas consequências na estrutura.

Tabela 6 – Principais modelos de predição de danos referentes à RAS, separados em função da escala.

Nível	Autores	Ano	Periódico
Microscópico	Hobbs	1981	Magazine of Concrete Research
	Groves e Zhang	1990	Cement and Concret Research
	Furusawa et al.	1994	3rd Intern. Conference on Durability of Concrete
	Bazant e steffens	2000	Cement and Concret Research
	Bazant et al.	2000	Journal of Civil Mechanics
	Suwito et al.	2002	Concrete Science and Engineering
	Xi et al.	2002	Mechanis of Quase-brittle Materials and Structure
Mesoscópico	Comby-Peyrot et al.	2009	Computational Materials Science
	Dunant e Scrivener	2010	Cement and Concret Research
	Pan et al.	2013	Science China Technological Sciences
Macroscópico	Swenson e Gillott	1964	Highway Research Board
	Larrive e Coussy	1994	Jounées des Science pour l'ingénieur
	Léger et al.	1995	Canadian Journal of Civil Engineering



	Pappalardo	1999	Revista Mackenzie de Engenharia da Computação
	Huang e Pietruszczak	1999	Journal of Engineering Mechanics
	Capra e Sellier	2003	Mechanics of Materials

Fonte: HELENA *et al.*, 2016.

A classificação dos modelos em diferentes escalas oferece uma abordagem sistemática para analisar a RAA, permitindo uma compreensão mais abrangente do fenômeno em diferentes níveis de detalhe. Isso facilita a integração de diferentes aspectos da reação em modelos mais abrangentes e precisos.

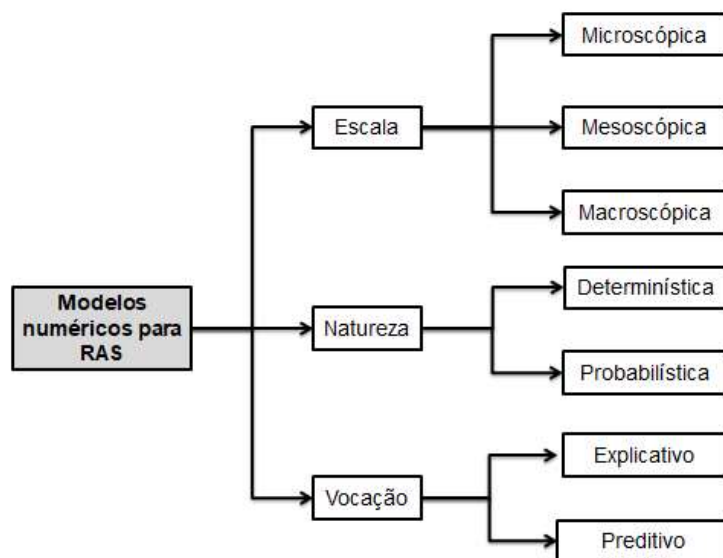
O avanço das pesquisas internacionais, especialmente o uso de tecnologias inovadoras como Redes Neurais Artificiais (RNA), mostra o compromisso contínuo da comunidade científica em desenvolver modelos mais precisos e eficazes para prever e mitigar os efeitos da RAA. A apresentação dos principais modelos matemáticos na Tabela 6 fornece uma visão geral dos esforços em andamento e pode orientar futuras pesquisas e colaborações na área.

Carles-Gilbergues e Hornain (2014), classifica os modelos para previsão devido a RAS conforme a sua escala, conforme classificação de Pan *et al.* (2012). Sua maior contribuição está relacionada com a classificação dos modelos conforme:

- a) Natureza: no tocante pode-se observar duas análises, determinística e probabilística. No que se refere ao modelo determinístico, são inseridos valores médios brutos como parâmetro de entrada nos modelos, tais valores podem ser obtidos por exemplo em ensaios, desta forma tem a necessidade de calibração por parâmetros. Já nos modelos probabilísticos, as variáveis de entrada não são constantes ao longo do tempo, devido ao modelo considerar a variabilidade do fenômeno. A Tabela 7 demonstra alguns modelos determinísticos e probabilísticos.
- b) Vocação: Podem ser classificados em explicativo, quando o modelo explica o fenômeno químico da reação, ou preditiva quando o modelo prever o dano no elemento estrutural em qualquer escala.

A Figura 28 demonstra a classificação proposta por Carles-Gilbergues e Hornain (2014) apud Helena et al. (2016), conforme sua natureza, escala e vocação.

Figura 28 – classificação dos modelos numéricos existentes para a RAS.



Fonte: HELENA *et al*, 2016

Tabela 7– Exemplos de modelos preditivos de dano referentes a RAS, de natureza determinística e probabilística.

Natureza	Autores	Ano	Periódicos
Determinística	Groves e Zhang	1990	Cement and Concret Research
	Furusawa et al.	1994	3rd Intern. Conference on Durability of Concrete
	Bazant et al.	2000	Journal of Civil Mechanics
	Suwito et al.	2002	Concrete Science and Engineering
	Pan et al.	2013	Science China Technological Sciences
Probabilística	Swenson e Gillott	1964	Highway Research Board
	Pappalardo	1999	Revista Mackenzine de Engenharia da Computação
	Huang e Pietruszczak	1999	Journal of Engineering Mechanics
	Capra e Sellier	2003	Mechanics of Materials

Fonte: HELENA *et al*, 2016.

Nos últimos anos diversos pesquisadores procuraram modelar o problema de forma mais racional desenvolvendo modelos numéricos capazes de correlacionar os efeitos observados na estrutura com o comportamento físico-químico do material sujeito à reação álcali-agregado (LOPES, 2004). A seguir será exposto resultados desta pesquisa.

### 4.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS REFERENTE AO AGRUPAMENTO DOS ARTIGOS

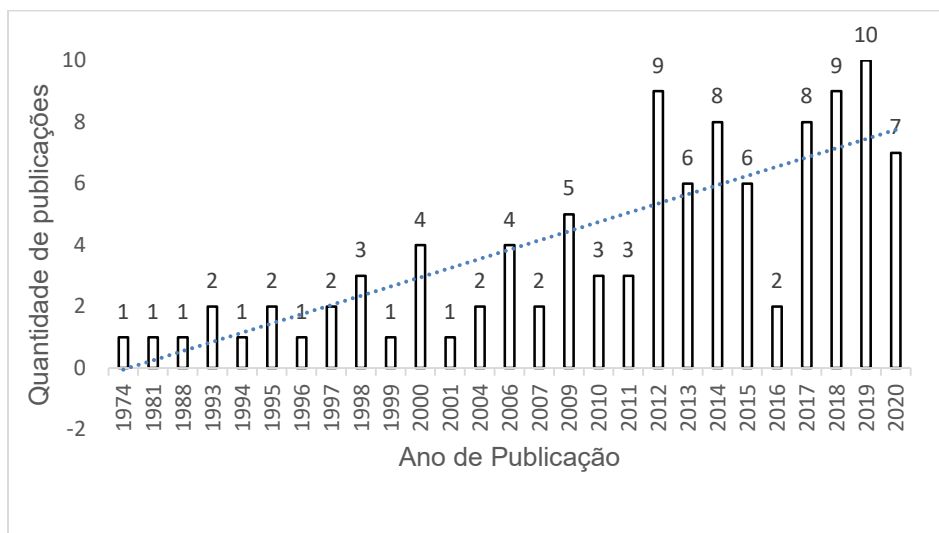
A seguir será apresentado os resultados e discussão desta pesquisa. Os resultados foram divididos em quatro blocos, sendo eles: *análise sistemática; análise bibliométrica; meta-análise e sistematização da evolução dos modelos matemáticos para RAS* conforme os tópicos abaixo.

#### 4.3.1 ANÁLISE DA SISTEMATIZAÇÃO

Com a sistematização dos artigos na planilha Excel durante a etapa de condução, foi possível realizar uma análise da fase de filtragem, na qual foram selecionados 104 artigos, possibilitando assim uma análise temporal. Nessa abordagem, é evidente uma taxa crescente de pesquisa sobre a modelagem da Reação Álcali-Sílica (RAS). Esse cenário provavelmente é impulsionado pelo aumento dos casos de RAS em todo o mundo.

A década de 1990 marca um período importante de publicações significativas sobre modelagem para RAS. Apesar da complexidade química da reação, que dificulta a homogeneização nos modelos matemáticos, as pesquisas continuaram em busca de um melhor entendimento dos mecanismos subjacentes à RAS. O Gráfico 1 ilustra essa evolução ao longo do tempo.

Gráfico 1 – Evolução da quantidade de publicações ao longo dos anos



Fonte: O autor (2023)

Do Gráfico 1, é possível observar uma tendência crescente de publicações nos artigos selecionados, e a partir do ano de 2012, houve um aumento significativo na taxa de publicação, mantendo-se elevada até os dias atuais. Essa tendência pode estar relacionada a um melhor entendimento da reação, uma modelagem cada vez mais precisa, o desenvolvimento de software computacionais mais robustos e a busca por peças estruturais cada vez mais duráveis.

A análise temporal dos artigos selecionados revela uma clara tendência de crescimento na pesquisa sobre modelagem da RAS ao longo dos anos. Esse aumento pode ser atribuído a diversos fatores, incluindo a crescente conscientização sobre os danos causados pela RAS, avanços na tecnologia de modelagem matemática e a demanda por soluções mais eficazes para garantir a durabilidade das estruturas de concreto.

A década de 1990 é destacada como um marco importante, sugerindo um aumento significativo no interesse e na pesquisa sobre o tema nesse período. Esse crescimento pode refletir o reconhecimento da gravidade dos problemas associados à RAS e a necessidade urgente de encontrar soluções para mitigar seus efeitos.

O aumento acentuado na taxa de publicação a partir de 2012 sugere um avanço significativo no campo da modelagem da RAS. Isso pode ser atribuído ao desenvolvimento de novas metodologias de pesquisa, avanços na compreensão dos mecanismos da RAS e uma maior colaboração entre pesquisadores e instituições acadêmicas e industriais.

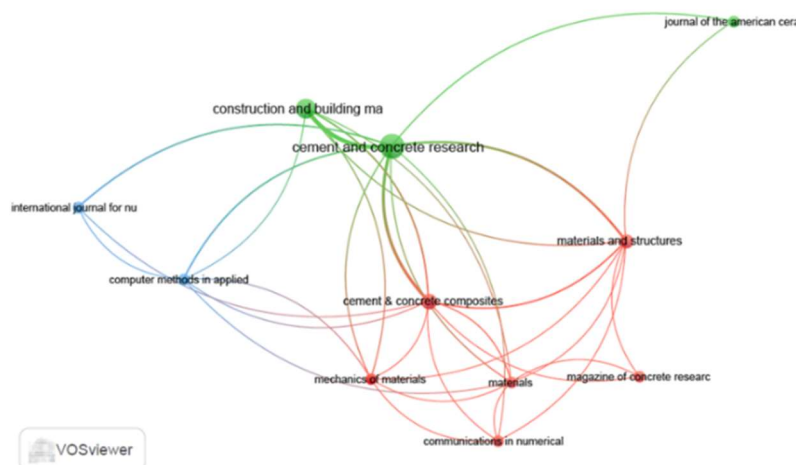
#### **4.3.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA**

A análise bibliométrica foi realizada através de dois critérios discutidos a seguir.

#### 4.3.2.1 Análise por agrupamento de fontes

O gráfico bibliométrico do agrupamento de jornais e revistas que publicam sobre modelagem matemática de RAS em concreto encontra-se exposto na Figura 29.

Figura 29 – Gráfico bibliométrico do agrupamento de jornais e revistas que publicam sobre modelagem matemática de RAS em concreto.



Fonte: O autor (2023)

Os jornais e revistas que apresentam a maior coincidência das referências bibliográficas citadas estão mais próximos entre si, como mostra gráfico da Figura 29. Os grupos formados (clusters), ligados por linhas de diferentes cores, identificam as seguintes relações:

- *Cluster verde*, cuja concentração está em revistas que tratam os resultados de pesquisas sobre as propriedades e desempenho de cimento e concreto; novas técnicas experimentais e os mais recentes métodos analíticos e de modelagem.
- *Cluster vermelho*, cuja concentração está em revistas que tratam os resultados de pesquisas sobre a microestrutura; propriedades do material; métodos de ensaio e teste; mecânica da fratura; aspectos de durabilidade; tecnologia de compósitos e modelagem.
- *Cluster azul*, cuja concentração está em revistas que tratam os resultados de pesquisas descrevendo desenvolvimentos significativos de métodos computacionais na solução de problemas de mecânica aplicada e engenharia

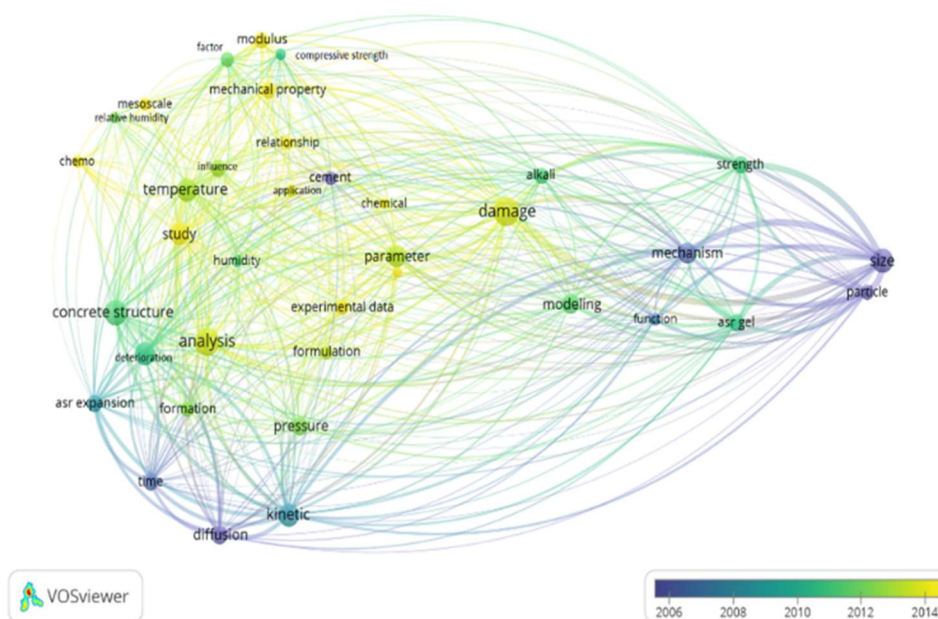
#### 4.3.2.2 Análise por agrupamento de palavras chaves

O gráfico bibliométrico gerado com base no critério das palavras-chave está apresentado na Figura 30. Para reduzir o número de palavras-chave, foi estabelecido um limiar mínimo de frequência de oito vezes. Na amostra geral, foram identificadas 1949 palavras-chave, das quais 72 atenderam ao critério de frequência mínima solicitada.

Analizando os dados da análise bibliométrica, conforme ilustrado na Figura 30, observa-se que até 2007, representado pela cor roxa, houve uma busca intensa pelo entendimento dos mecanismos da Reação Álcali-Sílica (RAS), dos impactos causados pelo gel na estrutura de concreto e dos fatores que influenciam a formação do gel do ponto de vista químico.

Neste período, os mecanismos da reação eram explicados principalmente pelo processo de difusão de íons, conforme abordado por Hirche e Wolf (1974), Svenson (1991), Bazant e Steffens (2000) e Suwito et al. (2002), que discutiam a constante de tempo característica, a latência da reação e a taxa de consumo dos álcalis por meio de leis cinéticas.

Figura 30– Gráfico bibliométrico gerado pelo critério palavra-chave.



Fonte: O autor (2023)

Nessa mesma época, iniciaram-se os desenvolvimentos de modelos considerando o efeito físico da reação, ou seja, a influência da granulometria dos agregados reativos (SUWITO et al., 2002; BAZANT et al., 2000). Esses modelos foram capazes de prever o diâmetro capaz de intensificar a reação.

Embora de 1974 a 2007 a cinética da reação já estivesse introduzida nos modelos matemáticos para a Reação Álcali-Sílica (RAS), foi apenas entre 2007 e 2009 (representado pela cor azul no gráfico) que sua influência na taxa de produção do gel e na taxa de expansão se consolidou. A partir desse entendimento, a taxa de produção de gel e, conseqüentemente, o processo de dano ao concreto, passaram a ser modelados a partir de abordagens químico-mecânicas, como em Poyet et al. (2007), Multon et al. (2009) e Comby-Peyrot et al. (2009).

Entre 2009 e 2013, os modelos incorporaram fenomenologias relacionadas às tensões internas causadas pela pressão imposta pelo gel para considerar a expansão do gel, a propagação de trincas e a expansão macroscópica, como em Pesavento et al. (2012), Dormieux et al. (2004), Esposito e Hendriks (2016) e Li et al. (2020). Nesse estágio, duas simplificações foram abordadas dada a complexidade dos fenômenos: a) a pressão do gel como pressão hidráulica nos poros; b) o comportamento microscópico das fases fluidas e sólidas como modelos micro-poro-mecânicos e químico-mecânicos.

De 2013 até os dias atuais, conforme evidenciado pela cor amarela no gráfico da Figura 30, os modelos químico-mecânicos têm se consolidado cada vez mais. Com os avanços tecnológicos, os modelos estão se tornando cada vez mais sofisticados e precisos, levando em consideração o efeito da temperatura, umidade, química da reação e propriedades mecânicas, conforme em Allahyari et al. (2020), Kawabata et al. (2017) e Grymin *et al.* (2017).

Na Tabela 8, são compilados os países, instituições e o perfil dos autores dos 31 artigos que abordam modelos matemáticos de RAS desde 1974 até julho de 2020.

Tabela 8 - Países, instituições e perfil dos autores dos 31 artigos abordando modelos matemáticos de RAS dos anos de 1974 a julho de 2020.

Autor	Características gerais das publicações			
	Ano	País	Universidade	Perfil dos autores
Hirche e Wolff [14]	1974	Alemanha	Instituto Central de Química Analítica - Instalação de Pesquisa Nuclear de Jülich	
Hobbs [28]	1981	Reino Unido	XXXXXXXX	XXXXXXXX
Svensson [15]	1991	Dinamarca	XXXXXXXX	XXXXXXXX
Nielsen <i>et al.</i> [29]	1993	Dinamarca	Universidade Técnica da Dinamarca - Laboratório de Materiais de Construção	Estruturas
Léger <i>et al.</i> [30]	1996	Canadá	Politécnica de Montreal	Estruturas e Materiais
Capra e Bournazel [31]	1998	França	École des Ponts - Laboratório de Navier	Estruturas
Bazant e Steffens [16]	2000	USA	Universidade Northwestern	Estruturas
Bazant <i>et al.</i> [18]	2000	USA	Universidade Northwestern	Estruturas
Ulm <i>et al.</i> [32]	2000	USA	Instituto de Tecnologia de Massachusetts	Estruturas e Materiais
Suwito <i>et al.</i> [17]	2002	USA	Universidade do Colorado	Estruturas
Bangert <i>et al.</i> [33]	2004	Alemanha	Instituto de Mecânica Estrutural	Estruturas
Dormieux <i>et al.</i> [23]	2004	França	École des Ponts et Chaussées	Estruturas e Materiais
Saouma e Perotti [34]	2006	USA	Universidade do Colorado	Estruturas
Poyet <i>et al.</i> [19]	2007	França	Centro de Pesquisa Nuclear - Saclay	Estruturas e Materiais
Multon <i>et al.</i> [20]	2009	França	Universidade de Toulouse	Estruturas e Materiais
Comby-Peyrot <i>et al.</i> [21]	2009	França	École des mines de Paris	Estruturas
Dunant e Scrivener [35]	2010	Suiça	Escola Superior de Engenharia - Les Labos de IMX	Materiais
Pesavento <i>et al.</i> [22]	2012	Polônia	Universidade de Padova	Estruturas e Materiais
Pignatelli <i>et al.</i> [36]	2013	Italia	Politécnica de Milão	Estruturas
Charpin e Ehrlicher [37]	2014	França	École des Ponts - Laboratório de Navier	Estruturas



Winnicki <i>et al.</i> [38]	2014	Polônia	Universidade Técnica Tadeusz Kościuszko	Estruturas e Materiais
Itam <i>et al.</i> [39]	2015	Malásia	Universiti Tenaga Nasional	Estruturas
Bazant e Rahimi-Aghdam [40]	2016	USA	Universidade Northwestern	Estruturas
Esposito e Hendriks [24]	2016	Holanda	Universidade Técnica de Delft	Estruturas
Kawabata <i>et al.</i> [26]	2017	França	Université Paris-Est	Estruturas
Grymin <i>et al.</i> [27]	2018	Polônia	Universidade de Tecnologia de Lodz	Materiais
Li <i>et al.</i>	2019	China	Universidade Heilongjiang	Materiais
Itam <i>et al.</i> [3]	2019	Malásia	Universiti Tenaga Nasional	Estruturas
Rahman e Lu [41]	2019	USA	Boise State University	Estruturas
Allahyari <i>et al.</i> [2]	2020	Austrália	Universidade Monash	Estruturas
Li <i>et al.</i> [25]	2020	China	College of Harbor	Estruturas

Fonte: O autor (2023)

Nota-se que a França e USA são os países que mais produziram pesquisas na área de modelagem para RAS, aproximadamente 45,16% dos artigos apresentados na Tabela 8 encontram-se nesses dois países. Esses países se destacam devido aos números de obras de concreto afetado pela RAS. Na “*Second International Conference on Alkaliaggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams*” realizado em 1995, foi constatado através de publicações e relatos feitos por diversos autores ao longo do tempo, que das publicações sobre RAS cerca de 50% das obras afetadas referem-se a USA e Canadá, e 5% na França (PRISZKULNIK, 2005), salientando que, houve aumento nos números de estruturas afetadas por essa reação.

Das instituições destacam-se: *Universidade Northwestern*, com três publicações, destacando Bazant e Steffens (2000), Bazant *et al.* (2000) e Bazant e Raimi-Aghdam (2016), autores com publicações de grande impacto; *École des Ponts*, com três publicações destacando Dormiux (2004), Comby-Peyrot *et al.* (2009) e Carpin e Erlacher (2014); e, a *Universidade do Colorado*, com duas publicações, sendo Suwito *et al.* (2002) e Saouma & Perotti (2006).

Do perfil dos autores nota-se que mais de 50% são engenheiros estruturais, sendo os profissionais da área de ciência e engenharia dos materiais apenas

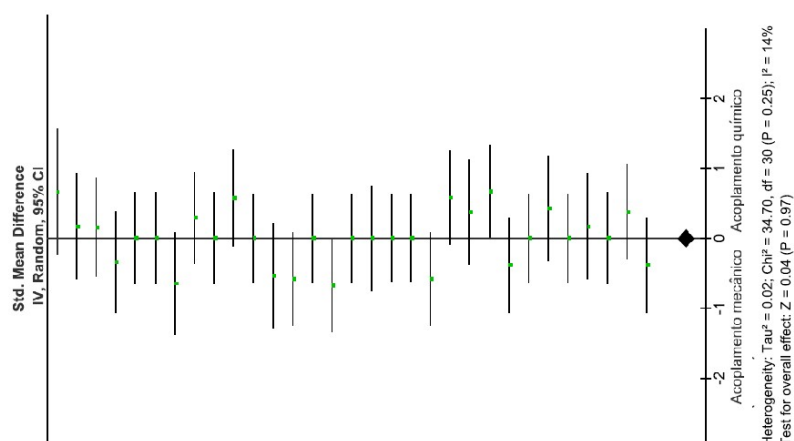
9,68% dos artigos avaliados, minoria nas publicações de modelagem de RAS em concreto. Sugere-se que ações colaborativas interdisciplinares entre especialistas em estruturas, materiais de construção, ciência e engenharia dos materiais e química é salutar para o amadurecimento e entendimento na modelagem de RAS em concreto, contribuindo para modelos mais robustos e precisos.

### 4.3.3 META-ANÁLISE

A partir da meta-análise, pode-se analisar a existência da heterogeneidade dos modelos publicados, e se existe comprovação de qual tipo de modelo tem melhor eficiência. Assim, para estimar com maior precisão, o tamanho do efeito dos 31 artigos selecionados, foi obtido o gráfico *Forest Plot* da Figura 31, onde constam os supracitados artigos classificados de acordo com o procedimento do cálculo da soma das notas dos 7 critérios, a média e o desvio padrão descritos na metodologia.

Observa-se que, para cada caso de estudo, foi realizada uma comparação entre modelagem química e mecânica. O *Forest Plot* gerado fornece a média da diferença entre grupos em um intervalo de confiança de 95%. O losango, que é o resultado da meta-análise, tem uma diferença média entre estudos de 0.00%, logo não há diferença estatística entre estudos

Figura 31 – Gráfico *Forest Plot* referente aos 31 artigos do estudo em questão.



Fonte: O autor (2023)

Conforme o gráfico *Forest Plot* apresentado na Figura 31, não há diferença significativa entre os modelos avaliados, quais sejam um modelo químico ou mecânico; e, que o tamanho do efeito é o mesmo em relação aos modelos comparados. A confiança do resultado obtido se deu pelo teste de inconsistência  $I^2=14\%$ , comprovando que a sistematização dos artigos realizada nesta pesquisa foi coerente, e considerada baixa estatisticamente, pois é menor do que limite de 25% da inconsistência.

## **5 DISCURSÃO E CONSIDERAÇÕES**

Ao longo do tempo, vários modelos para RAS foram produzidos ao redor do mundo devido os problemas ocasionados nas estruturas de concretos. Nos últimos anos, diversos pesquisadores procuraram modelar o problema de forma mais racional desenvolvendo modelos numéricos capazes de correlacionar os efeitos observados na estrutura com o comportamento físico-químico do material sujeito à reação álcali-agregado (LOPES, 2004).

Neste tópico será apresentado uma contextualização dos modelos matemáticos para RAS. A análise consiste em recolher dados dos diferentes modelos para agrupá-los e sintetizar essas informações. Assim, pode-se verificar como se deu a evolução dos modelos, e desta forma realizar uma explanação na evolução destes modelos, considerando suas falhas e o estado atual em cada tipo de abordagem, além de incluir uma discussão critica quanto as diferentes abordagens.

### **5.1 Abordagem químicas: evolução, estado atual e falhas**

A compreensão da Reação Álcali-Sílica (RAS) tem sido um desafio contínuo para a comunidade científica, especialmente no que diz respeito à sua abordagem química. Ao longo das décadas, houve uma evolução notável na modelagem matemática da RAS, impulsionada pela necessidade de compreender os mecanismos e consequências dessa reação patológica em estruturas de concreto. Nesta abordagem química, examinamos essa evolução, o estado atual e as falhas encontradas nos modelos matemáticos para a RAS.

Desde as primeiras descrições da RAS na década de 1940 até os dias atuais, os modelos matemáticos evoluíram significativamente. Nas primeiras décadas da descoberta da RAS houve um consenso sobre a reação química, e que, o mecanismo que governa essa reação é bastante complexo. Devido a casos pontuais, a pesquisa sobre RAS perdeu forças durante as décadas de 1950 e 1970.

As pesquisas e os ensaios sobre a reação álcali-silica retornaram de forma mais rigorosa na década de 1970, quando houve mais relatos dessa patologia (ARRAIS, 2011). Com o problema no âmbito mundial, houve a necessidade de tentar modelar a RAS matematicamente, e assim analisar as consequências ocasionadas.

Inicialmente, a ênfase estava na cinética da reação e nos mecanismos de difusão de íons alcalinos nos agregados reativos. Os primeiros modelos químicos surgiram na década de 1970, esses modelos analisavam a reação, ou seja, modelava o fenômeno através dos conceitos químicos envolvidos, com o intuito de explicar a reação, formação do gel e possíveis consequências. A partir desses modelos pode-se ter a sensibilidade de compreender a influência de alguns fatores, tais como: tempo, temperatura, umidade. Com o tempo, os modelos começaram a considerar também o efeito físico da reação, como a influência da granulometria dos agregados.

Dos *modelos químicos*, percebe-se o interesse sobre o gel e a fenomenologia das reações para sua formação. Se baseavam em difusão, troca e concentração de íons alcalinos para explicar as reações envolvidas na formação do gel da RAS (HIRCHE & WOLFF, 1974; SVENSSON, 1991). Neste intermeio, a taxa de formação de gel foi avaliada, através da diferença de volume de gel formado, e notou-se a formação de fissuras e expansões em barras de argamassas, constatando que a produção do gel eleva o grau de deterioração (HOBBS, 1981). Por fim, foi analisada a pressão ocasionada pelo gel no agregado (COMBY-PEYROT *et al.*, 2009).

Assim, já se tinha a sensibilidade de que haviam tensões ocasionadas na matriz do concreto, em consequência da formação do gel com suas possíveis consequências. Os primeiros modelos químicos foram eficientes para caracterizar a reação, porém houveram lacunas em relação ao comportamento estrutural.

A partir dessa deficiência, houve avanço nos modelos químicos em que foi potencializado a capacidade de avaliar o tempo de fissuração e expansão, com

base na taxa de reação considerada diretamente proporcional à quantidade de agregado reativo, porém esse avanço foi restrito as barras de argamassa (HOBBS, 1981).

Os modelos químicos não eram capazes de avaliar; a propagação das fissuras; a expansão do concreto e o deslocamento estrutural. Outros modelos químicos surgiram, após o ano 2000, entre 2007 e 2009, houve uma consolidação da influência da cinética da reação na produção de gel e na expansão, levando ao surgimento de abordagens químico-mecânicas mais precisas. Embora esses modelos apresentassem deficiência, entende-se que eles são importantes, pois todo o fenômeno da reação é envolvido por uma química muito complexa. Sendo esses modelos pós-2000, capazes de traduzir o fenômeno da reação para análise de expansão e fissuração, fechando assim algumas dessas lacunas.

Atualmente, os modelos matemáticos para a RAS estão em um estágio avançado, incorporando fenomenologias complexas relacionadas às tensões internas, propagação de trincas e expansão macroscópica causadas pelo gel. Estes modelos são cada vez mais sofisticados e precisos, levando em conta uma série de variáveis, como temperatura, umidade e propriedades mecânicas do concreto. Abordagens como redes neurais artificiais estão sendo empregadas para melhorar a precisão dos modelos e prever danos ao concreto com maior confiabilidade.

Apesar dos avanços, ainda existem algumas falhas nos modelos matemáticos para a RAS. Uma das principais limitações é a complexidade da própria reação, que envolve uma série de processos químicos e físicos interligados. Além disso, a heterogeneidade dos materiais de concreto e a variabilidade das condições ambientais dificultam a criação de modelos universalmente aplicáveis. Outra falha é a falta de padronização nos métodos de teste e na coleta de dados, o que pode levar a resultados discrepantes e dificultar a comparação entre estudos.

Em suma, enquanto os modelos matemáticos para a RAS alcançaram um nível avançado de desenvolvimento, ainda há desafios a serem superados. A

abordagem química desempenha um papel fundamental na melhoria desses modelos, exigindo uma compreensão mais profunda dos mecanismos da reação e uma integração mais precisa dos diversos fatores que influenciam seu desenvolvimento e impacto nas estruturas de concreto.

## **5.2 Abordagem mecânicas: evolução, estado atual e falhas**

A análise mecânica desempenha um papel crucial na compreensão e no desenvolvimento dos modelos matemáticos para a Reação Álcali-Sílica (RAS). Ao longo do tempo, houve uma evolução significativa nessas abordagens, refletindo a busca por uma compreensão mais profunda dos mecanismos subjacentes e uma melhor previsão do comportamento das estruturas de concreto afetadas pela RAS. Nesta abordagem mecânica, exploramos essa evolução, o estado atual e as falhas encontradas nos modelos matemáticos para a RAS.

Com os avanços das pesquisas, houve várias teorias sobre o mecanismo de reação dessa patologia. As teorias de modo geral, eram bastante complexas e, portanto, difícil de avaliar quantitativamente o fenômeno. Dessa forma os modelos mecânicos, foram desenvolvidos no contexto em que as consequências da reação eram de maior interesse do que a reação.

Os primeiros modelos matemáticos para a RAS se concentraram principalmente na cinética da reação e nos mecanismos de difusão de íons alcalinos nos agregados reativos. Com o tempo, esses modelos evoluíram para considerar também os aspectos físicos da reação, como a influência da granulometria dos agregados e as tensões internas geradas pela expansão do gel. Posteriormente, surgiram abordagens mais sofisticadas que combinam aspectos químicos e mecânicos da RAS, permitindo uma análise mais abrangente e precisa do fenômeno.

Dessa forma para o desenvolvimento dos modelos mecânicos, os pesquisadores passaram a considerar a pressão exercida pelo gel, causando tanto as fissuras no agregado reativo, como na matriz cimentícia circundante. Assim, a análise

das tensões e deformações em estruturas de concreto submetidas à RAS (NIELSEN *et al.*, 1993), bem como a análise do diâmetro do agregado que intensificava a reação (BAZANT *et al.*, 2000) passaram a considerar a pressão interna gerada pelo gel como uma carga interna. Com o avanço das técnicas laboratoriais, pôde-se analisar de forma analítica o crescimento do gel formado e a velocidade da reação, sendo definida pela dissolução da sílica, da difusão e absorção da água (BAZANT *et al.*, 2000).

Com as investigações baseadas na interação pasta de cimento-agregado, houve a possibilidade de avaliar o impacto da expansão do gel em duas escalas, sendo elas, *escala mesoscópica* que avalia a pressão exercida pelo gel na matriz, e *escala macroscópica* que avalia a expansão, para explicar os efeitos induzidos da RAS no concreto. A partir do entendimento do processo de expansão, várias abordagens foram desenvolvidas principalmente em estruturas maciças de concreto, como barragens por exemplo.

Atualmente, os modelos matemáticos para a RAS estão em um estágio avançado de desenvolvimento, incorporando fenômenos mecânicos complexos, como a propagação de trincas, a expansão macroscópica do concreto e a resposta estrutural às deformações causadas pela reação. Esses modelos são capazes de prever com maior precisão os danos causados pela RAS e fornecer insights valiosos para o projeto e manutenção de estruturas de concreto.

Embora os modelos mecânicos tenham dado um grande salto para cálculos estruturais em que, poderia haver uma previsão das tensões internas ocasionadas pela pressão exercida pelo gel, e os deslocamentos ocasionados pela produção de gel. Percebeu-se que, as deformações do concreto induzidas por RAS não poderia ser modelada considerando uma expansão térmica equivalente. Assim, foi reconhecido que o processo de expansão depende das condições de contorno (ambientais e materiais) que foram tratados nos modelos químicos, e do estado de tensão do concreto.

Assim, as leis fenomenológicas foram adotadas para descrever a evolução da expansão do concreto em função da temperatura, umidade e tensão



(PESAVENTO *et al.*, 2012; LÉGER *et al.*, 1996; CAPRA & BOURNAZEL, 1998; SAOUMA & PEROTTI, 2006), que ao longo do tempo foram introduzidos nos modelos de danos. Desta forma, os modelos obtiveram uma grande quantidade de parâmetros de entrada, que nem sempre estão disponíveis para grande quantidade de mistura do concreto, condições ambientais e estado de tensão (ESPOSITO & HENDRIKS, 2019).

Apesar dos avanços, ainda existem algumas falhas nos modelos matemáticos para a RAS do ponto de vista mecânico. Uma das principais limitações é a simplificação excessiva de alguns aspectos do fenômeno, o que pode levar a previsões imprecisas em situações reais. Além disso, a falta de dados experimentais suficientes para validar e calibrar esses modelos pode comprometer sua confiabilidade e utilidade prática. Outra falha é a dificuldade em capturar a variabilidade dos materiais de concreto e as condições ambientais nas quais a reação ocorre, o que pode resultar em estimativas imprecisas dos danos causados pela RAS.

Em suma, embora os modelos matemáticos para a RAS tenham avançado consideravelmente, ainda há desafios a serem superados na abordagem mecânica. A integração de aspectos químicos e mecânicos, juntamente com uma validação rigorosa dos modelos por meio de dados experimentais, é essencial para melhorar sua precisão e aplicabilidade em diversas situações do mundo real.

### **5.3 Abordagens químico-mecânicas: evolução, estado atual e falhas**

As abordagens químico-mecânicas têm desempenhado um papel fundamental na evolução dos modelos matemáticos para a Reação Álcali-Sílica (RAS). Essas abordagens combinam aspectos químicos e mecânicos para proporcionar uma compreensão mais abrangente do fenômeno e uma melhor previsão do comportamento das estruturas de concreto afetadas pela RAS. Nesta análise,

examinamos a evolução, o estado atual e as falhas encontradas nas abordagens químico-mecânicas dos modelos matemáticos para a RAS.

No início do século XXI, houve a necessidade de modelos que quantificassem a reação quimicamente através dos conceitos fenomenológicos e consequentemente os danos ocasionados na estrutura. Assim, o acoplamento entre os conceitos adotados nas modelagens já existentes, ocasionou o surgimento dos *modelos químico-mecânicos*, que leva em consideração a interação entre agregado reativo e o concreto.

A evolução das abordagens químico-mecânicas começou com modelos que consideravam principalmente os aspectos químicos da RAS, como a cinética da reação, a formação do gel expansivo e conceitos termodinâmicos. Com o tempo, esses modelos foram aprimorados para incorporar também os aspectos mecânicos, como as tensões internas geradas pela expansão do gel e a propagação de trincas no concreto. Essa integração gradual de aspectos químicos e mecânicos permitiu uma compreensão mais completa da RAS e uma melhor capacidade de prever seus efeitos nas estruturas de concreto.

Deste modo, pode-se estabelecer uma conexão entre produto da reação e processo expansivo. Em que, o comportamento expansivo pode ser avaliado através da variação de massa (PIGNATELLI *et al.*, 2013) ou variação de volume (CHARPIN & EHRLACHER, 2014).

A livre expansão do concreto é resultado da propagação de fissuras após o preenchimento da porosidade pelo gel da RAS. O gel pode ser vinculado à cinética da reação, para quantificar sua produção em massa, e assim analisar o processo de dano (DORMIEUX *et al.*, 2004) e posteriormente avaliar o dano no concreto submetido a qualquer combinação de cargas externas e internas (ESPOSITO & HENDRIKS, 2016).

Atualmente, as abordagens químico-mecânicas para os modelos matemáticos da RAS estão em um estágio avançado de desenvolvimento. Essas abordagens

consideram tanto os aspectos químicos quanto os mecânicos da reação, permitindo uma análise mais detalhada e precisa do fenômeno.

Recentemente, os modelos físico-mecânicos que tratam da pressão interna e produção de gel foram aprimorados com o desenvolvimento de modelos de difusão-reação, a fim de simular a formação dos produtos de reação, considerando o efeito da granulometria do agregado, que potencializa a reação (SUWITO *et al.*, 2002; MULTON *et al.*, 2009), o efeito térmico na cinética, para quantificar a formação de gel (ALLAHYARI *et al.*, 2020; SUWITO *et al.*, 2002; MULTON *et al.*, 2009; Rahman & Lu, 2019), transporte de íons, que influencia na mudança de concentração sódio ( $\text{Na}^+$ ) e cálcio ( $\text{Ca}^+$ ) (POYET *et al.*, 2007; Rahman & Lu, 2019) e a interação do agregado reativo, analisado pela difusão e cinética, com o concreto, em que avalia os danos estruturais, ou seja, as tensões e deformações (BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, 2016).

Os modelos atuais são capazes de simular a formação do gel, a expansão do concreto, a propagação de trincas e outros efeitos mecânicos, levando em consideração as condições específicas de cada estrutura e as características dos materiais envolvidos.

Apesar dos avanços, ainda existem algumas falhas nas abordagens químico-mecânicas dos modelos matemáticos para a RAS. Uma das principais falhas é a complexidade excessiva de alguns modelos, o que pode dificultar sua implementação prática e interpretação dos resultados. Além disso, a falta de dados experimentais suficientes para validar e calibrar esses modelos pode comprometer sua precisão e confiabilidade. Outra falha é a dificuldade em capturar adequadamente a interação entre os aspectos químicos e mecânicos da RAS, o que pode levar a previsões imprecisas em certas condições.

Em resumo, as abordagens químico-mecânicas têm sido fundamentais para o desenvolvimento dos modelos matemáticos para a RAS, proporcionando uma compreensão mais abrangente do fenômeno. No entanto, ainda há desafios a serem superados, especialmente em relação à simplificação dos modelos, validação experimental e integração eficaz de aspectos químicos e mecânicos.

Essas falhas precisam ser endereçadas para melhorar a precisão e utilidade prática dos modelos na prevenção e mitigação dos danos causados pela RAS em estruturas de concreto.

#### **5.4 Discussão crítica quanto às diferentes abordagens químicas, mecânicas e químico-mecânicas**

As diferentes abordagens químicas, mecânicas e químico-mecânicas para modelos matemáticos da reação álcali-sílica (RAS) têm sido desenvolvidas com o objetivo de proporcionar uma compreensão mais abrangente e precisa desse fenômeno patológico. Cada uma dessas abordagens possui vantagens e desafios específicos, e uma discussão crítica sobre suas características é fundamental para avaliar sua eficácia e utilidade na prática. Abaixo, exploramos os pontos críticos de cada uma dessas abordagens:

##### **1. Abordagens Químicas:**

*Vantagens:* As abordagens químicas se concentram na compreensão dos mecanismos químicos subjacentes à RAS, como a cinética de formação do gel expansivo. Isso permite uma análise detalhada das reações químicas envolvidas e uma previsão inicial do potencial de danos causados pelo processo.

*Desafios:* No entanto, as abordagens puramente químicas podem negligenciar importantes aspectos mecânicos da RAS, como a propagação de trincas e o efeito da expansão do gel na integridade estrutural. Além disso, essas abordagens podem ser limitadas pela falta de dados experimentais para validar e calibrar os modelos.

##### **2. Abordagens Mecânicas**

*Vantagens:* As abordagens mecânicas se concentram nos efeitos mecânicos da RAS, como a deformação e fissuração do concreto devido à expansão do gel.

Isso permite uma avaliação mais direta dos danos estruturais e uma melhor compreensão de como a RAS afeta o desempenho das estruturas de concreto.

*Desafios:* No entanto, as abordagens puramente mecânicas podem subestimar a importância dos mecanismos químicos subjacentes à RAS, levando a previsões imprecisas. Além disso, essas abordagens podem ser limitadas pela complexidade dos fenômenos mecânicos envolvidos e pela dificuldade em integrar adequadamente os aspectos químicos e mecânicos.

### **3. Abordagens Químico-Mecânicas**

*Vantagens:* As abordagens químico-mecânicas combinam aspectos químicos e mecânicos para proporcionar uma compreensão mais abrangente da RAS. Isso permite uma análise mais precisa dos mecanismos de formação do gel, expansão do concreto e propagação de trincas, levando a previsões mais confiáveis do comportamento das estruturas.

*Desafios:* No entanto, as abordagens químico-mecânicas podem ser complexas e computacionalmente intensivas, o que pode dificultar sua implementação prática. Além disso, a integração eficaz de aspectos químicos e mecânicos pode ser desafiadora e requer dados experimentais suficientes para validar e calibrar os modelos.

Em suma, uma abordagem crítica às diferentes abordagens químicas, mecânicas e químico-mecânicas para modelos matemáticos da RAS é essencial para identificar suas vantagens, desafios e limitações. Idealmente, uma abordagem integrada que combine aspectos químicos e mecânicos de forma equilibrada pode fornecer as previsões mais precisas e úteis do comportamento da RAS em estruturas de concreto.

## **5.5 MODELOS MATEMÁTICOS DE RAS PARA CONCRETO**

Esposito e Hendriks (2019) categorizaram os modelos matemáticos da RAS em quatro tipos distintos: 1) difusão, 2) produção de gel, 3) expansão do concreto e

4) pressão interna. Os resultados dessas categorizações estão consolidados na Tabela 9, onde os 31 artigos selecionados foram classificados de acordo com esses tipos de modelagem, fornecendo uma visão abrangente das abordagens utilizadas para estudar o comportamento do concreto exposto à RAS.































Em relação aos níveis de modelagem descritos na Tabela 9, refere-se às diferentes escalas nas quais os modelos podem ser aplicados. A modelagem em nível de produto pode fazer referência à escala microscópica, enquanto a modelagem em nível agregado pode ser subdividida em escalas mesoscópica e macroscópica. Na escala mesoscópica, a interação entre a pasta de cimento e o agregado é avaliada, com foco nas tensões internas causadas pela pressão do gel. Por fim, na escala macroscópica, são analisadas as expansões e os deslocamentos do concreto.

Analisando os 31 artigos selecionados, observa-se que nove autores desenvolveram modelos baseados em difusão (Tipo 1), quatro autores basearam-se na produção de gel (Tipo 2), doze autores optaram por modelos que consideram a expansão do concreto causada pelo gel (Tipo 3) e seis autores centraram-se na pressão gerada pelo gel (Tipo 4).

Além disso, uma análise temporal revela uma tendência na evolução dos modelos matemáticos para abordagens focadas na expansão do concreto sob RAS. Dos 14 artigos selecionados para leitura na última década, oito adotaram modelos matemáticos seguindo essa tendência.

Tabela 9- Abordagens nos modelos matemáticos de RAS dos anos de 1974 a julho-2020.

Década	Autores	Nível	1. Difusão	2. Produção de gel	3. Expansão	4. Pressão interna
1970 – 1980 (1)	Hirche e Wolf (1974)	Produto				
1981 – 1990 (1)	Hobbs (1981)	Produto				

1991 – 2000 (7)	Svensson (1991)	Produto			
	Nielsen <i>et al.</i> (1993)	Agregado			
	Léger <i>et al.</i> (1996)	Agregado			
	Capra e Bournazel (1998)	Agregado			
	Bazant e Steffens (2000)	Produto			
	Bazant <i>et al.</i> (2000)	Agregado			
	Ulm <i>et al.</i> (2000)	Agregado			
2001 – 2010 (7)	Suwito <i>et al.</i> (2002)	Produto			
	Bangert <i>et al.</i> (2004)	Agregado			
	Dormieux <i>et al.</i> (2004)	Agregado			
	Saouma e Perotti (2006)	Agregado			
	Poyet <i>et al.</i> (2007)	Produto			
	Multon <i>et al.</i> (2009)	Produto			
	Comby-Peyrot <i>et al.</i> (2009)	Agregado			
	Dunant e Scrivener (2010)	Produto			
2011 – 2020 (14)	Pesavento <i>et al.</i> (2012)	Agregado			
	Pignatelli <i>et al.</i> (2013)	Produto			
	Charpin e Ehrlacher (2014)	Produto			
	Winnicki <i>et al.</i> (2014)	Agregado			
	Itam <i>et al.</i> (2015)	Agregado			
	Bazant e Rahimi-Aghdam (2016)	Produto			
	Esposito e Hendriks (2016)	Agregado			
	Kawabata <i>et al.</i> (2017)	Agregado			
	Grymin <i>et al.</i> (2017)	Agregado			
	Li <i>et al.</i> (2018)	Agregado			
	Rahman e Lu (2019)	Produto			
	Itam <i>et al.</i> (2019)	Agregado			
	Allahyari <i>et al.</i>	Produto			
	Li <i>et al.</i> (2020)	Agregado			

Fonte: O autor (2023)

De maneira geral, a Tabela 10 proporciona uma compreensão mais ampla dos modelos matemáticos propostos ao longo do tempo. Ela apresenta uma visão detalhada das variáveis e parâmetros considerados por cada autor em sua respectiva modelagem. Assim, busca-se melhor compreender os mecanismos da RAS, o impacto do gel na estrutura do concreto e os fatores que influenciam a formação do gel sob uma perspectiva química.

[illegible]





foi vinculado aos modelos de danos existentes para analisar a interação entre o processo da RAS e o comportamento mecânico do concreto (SUWITO *et al.*, 2002; POYET *et al.*, 2007; MULTON *et al.*, 2009). Recentemente, os modelos referentes ao produto da reação foram aprimorados de acordo com o desenvolvimento dos modelos de difusão-reação, a fim de simular o processo químico, a formação dos produtos de reação e sua expansão (ALLAHYARI *et al.*, 2020; BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, 2017; RAHMAN & LU, 2019).

Para o entendimento macroscópico da reação álcali-sílica, é necessário informações e entendimento do que ocorre na escala micro-mecânica. A redução do potencial químico de todo o sistema é ocasionada por processos termodinâmicos e cinéticos, no qual controlam os micro-mecanismos da reação (PETERSON, 2000).

O modelo original desenvolvido por Hirche e Wolff (1974) e Svenson (1991) foi bastante interessante. O modelo fenomenológico foi baseado no processo difusivo e troca de íons alcalinos. Através de experimentos, pode-se também analisar a influência do tamanho do agregado no processo difusivo e formação de fissuras (HIRCHE & WOLFF, 1974).

Posteriormente, o conceito de difusão foi acoplado em uma nova contribuição, e foi postulado que a fissura circundante na matriz cimentícia e no agregado era devido a tensores formados pelo processo de transportes de íons alcalinos e não pela pressão exercida pelo gel durante o processo de expansão. Desta forma o modelo foi capaz de explicar qualitativamente algumas características da RAS como efeito do tempo e tamanho do agregado. Os resultados observados no modelo sustentaram a hipótese acima mencionada, analisando as tensões geradas pelo processo de difusão (SVENSON, 1991).

Os modelos de Bazant e Steffens (2000) e Suwito *et al.* (2002) foram de grande importância, pois foram capazes de explicar os efeitos das partículas reativas como também o pior tamanho que potencializa a RAS. Os modelos representaram de forma quantitativa a expansão do concreto.

- *Modelo matemático Bazant & Steffens (2000)*

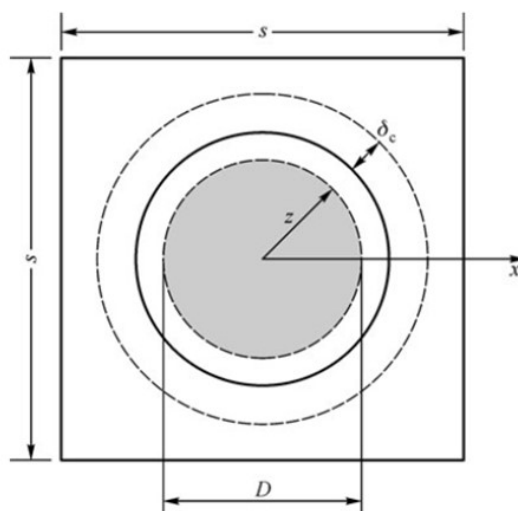
Bazant e Steffens (2000) avaliaram a expansão através da velocidade de reação e seu estágio final. O modelo tentava representar de forma quantitativa a expansão por RAS, que consistiu na análise de uma célula unitária característica do concreto contendo uma partícula esférica de vidro completamente reativa conforme Figura 34. A velocidade de reação e seu estágio final, ou seja, o crescimento radial da camada esférica do gel da reação na partícula de vidro foi assumido que são determinadas pela difusão da água e da camada de gel formada ao redor da partícula.

A análise paramétrica do modelo explicou os efeitos das partículas e o pior tamanho do agregado, ou seja, granulometria que intensifica a reação álcali-sílica. O modelo se limita a concretos que incorporam vidro residual como agregado, logo esse modelo não se aplica a concretos comuns.

Na Figura 33 tem-se uma célula cúbica com uma partícula esférica de diâmetro  $D$  e  $\delta c$  representa a espessura da camada com poros capilares e rachaduras ao redor da partícula. O modelo descreve bem a reação, mas considera um efeito de cálculo simplificado, em que o crescimento do gel se dá de forma radial.

Os modelos teóricos mencionados anteriormente destacam o mecanismo de difusão e expansão da reação. Bazant et al. (2000) continuando o seu modelo anterior, desenvolveu uma teoria da mecânica da fratura para prever o pior diâmetro do agregado.

Figura 33— célula unitária característica do concreto contendo uma partícula esférica de vidro.



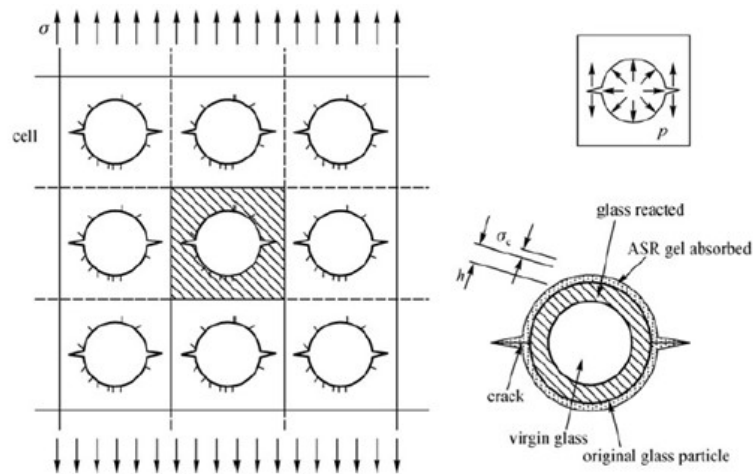
Fonte: Bazant e Steffens (2000).

No modelo, foi estabelecida uma matriz que regula células cúbicas, no qual cada célula continha uma partícula esférica de vidro introduzida na matriz de pasta de cimento conforme Figura 34. No lado esquerdo da Figura 34 mostra a matriz cúbica com partículas esféricas de vidro em expansão cercada por falhas e fissuras sendo preenchida pelo gel formado.

Na parte superior direita encontra-se uma célula com partícula de vidro já na parte inferior mostra o vidro reagindo e formação do gel crescendo ocasionando tensão nos poros capilares do concreto.

Ao restringir uma célula o autor percebeu que o campo de tensão causada pela pressão  $p$  induzida pelo gel nas superfícies trincadas e vazias foi um efeito da superposição do campo de tensão ocasionada pela pressão hidrostática  $p$  onde o campo de tensão causado pela tração aplicada é externamente dado por  $\sigma = -p$  conforme mostrado na Figura 35.

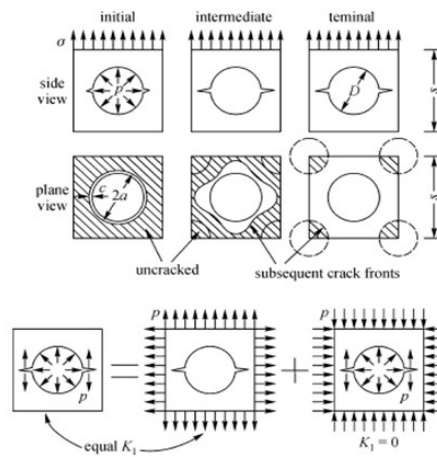
Figura 34– Modelo de matriz de células cúbicas contendo partículas esféricas de vidro.



Fonte: Bazant et al. (2000).

A Figura 35 demonstra a evolução idealizada da trinca desde o estágio inicial até estágio final de pequenos ligamentos circulares sem trincas, o efeito da superposição na parte de baixo revela a equivalência da tensão aplicada em uma célula.

Figura 35–. campo de tensão causada pela pressão p induzida pelo gel



Fonte: Bazant et al. (2000).

O fator de intensidade de tensão nas falhas preexistentes na superfície das partículas foi determinado como demonstrado na equação 1:

$$K_I = (\sigma + p)\sqrt{sk(w)}$$

Onde:

$K(w)$  – É o fator intensivo de tensão adimensional;

$w$  – É a variável de dano adimensional definida, equação 2:

$$w = \frac{A_c}{s^2} \quad 2$$

Onde:

$A_c$  – É a área da fissura;

$s^2$  – É o tamanho do vazio esférico em um cubo.

O fator intensivo de tensão adimensional  $k(w)$  foi aproximado através de uma abordagem de correspondência, assim o fator de intensidade de tensão KI nas falhas preexistentes foi determinado e utilizado para avaliar a propagação de trinca (PAN et al., 2012).

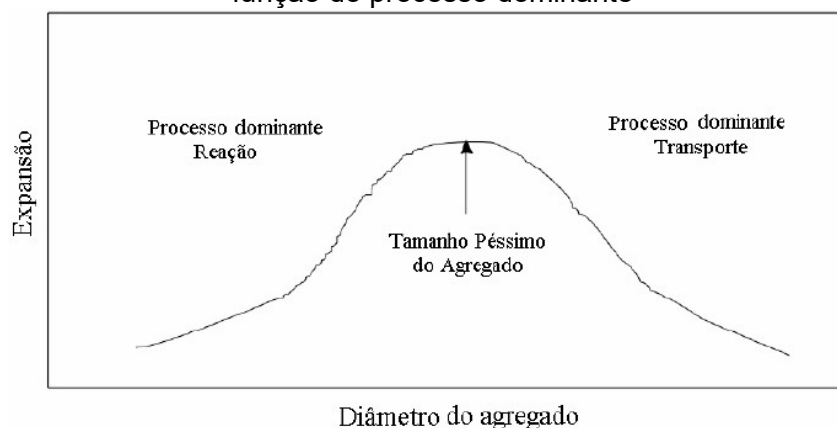
- *Modelo proposto por Suwito et al. (2002)*

Suwito et al. (2002), foram capazes de prever a expansão ocasionada pela RAS através da caracterização de parâmetros que potencializam a expansão. Nesse cenário, o modelo considerou o efeito químico-mecânico, distribuição granulométrica do agregado e características micro estruturais do concreto.

Das características micro estruturais destaca-se a porosidade da pasta de cimento e porosidade ocasionada pela distribuição do tamanho de partículas (agregado) dando um aporte mais robusto ao modelo. De acordo com o modelo, quanto menor for a partícula de agregado, para um volume de agregado fixo, ocasiona um aumento da expansão, por causa do aumento da área superficial.

Se o agregado for suficientemente pequeno à medida que o volume do gel formado possa ser comparado com o espaço poroso disponível na pasta de cimento circundante, a pressão ocasionada pelo gel é aliviada e a expansão reduzida. Na Figura 36 pode ser observada a relação entre o tamanho da partícula de agregado e a expansão ocasionada pelo gel da RAA.

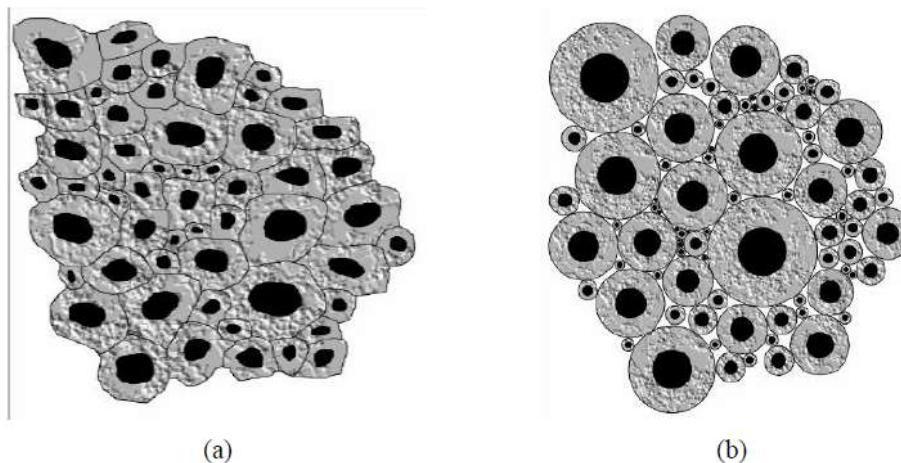
Figura 36– Relação entre o diâmetro do agregado e a expansão por RAA, em função do processo dominante



Fonte: Xi e Suwito (2002)

O modelo consiste em uma partícula esférica circundada por um material cimentício de espessura constante. A microestrutura de um sistema de duas fases pode ser considerada como uma matriz com inclusões distribuídas randomicamente, conforme mostrado na Figura 37.a. Para reduzir o problema em uma direção um sistema equivalente é proposto onde os elementos são aproximados por esferas conforme Figura 37.b.

Figura 37 – (a) Configuração mesoestrutural de um compósito de duas fases.  
(b) Configuração equivalente com elementos esféricos



Fonte: Xi e Suwito (2002)

Para descrever o sistema de duas fases, foi utilizada a equação para a magnitude da expansão macroscópica por RAA conforme equação 3.

$$\varepsilon_A = \frac{K_{ag}\varepsilon_{ag}V_{ag}(3K_m+4G_m)}{K_m(3K_{ag}+4G_m)-4V_{ag}G_m(K_m-K_{ag})}$$

Onde:

$K_{ag}$  e  $K_m$  – São os módulos de deformação volumétrica dos agregados e da matriz cimentícia respectivamente;

$G_{ag}$ ,  $G_m$  – São os módulos de cisalhamento dos agregados e da matriz cimentícia respectivamente;

$\varepsilon_{ag}$  – Expansão do agregado;

$V_{ag}$  – Volume do agregado que reagiu.

A expressão  $\varepsilon_{ag}$  é dada pela equação 4

$$\varepsilon_{ag} = \sum \delta_i \varepsilon_i^{Ri} \quad 4$$

Onde:

$i$  – Representa o  $i$ -ésimo agregado;

$\delta_i$  – Fração do volume do agregado com raio equivalente  $R_i$ ;

$\varepsilon_i^{Ri}$  – Deformação ocasionada pela expansão do agregado de raio  $R_i$ . Logo,  $\varepsilon_i^{Ri}$  é calculado pela equação 5

$$\varepsilon_i^{Ri} = \frac{(V_{gel} - V_{pg} - |V_{gel} - V_{pg}|)}{2\delta_i V_{ag}} \quad 5$$

$V_{gel}$  – Volume de gel produzido;

$V_{pg}$  – Volume de gel absorvido pelo poro do agregado.

O modelo avalia que o aumento de volume de gel é ocasionado pela cinética da reação, no qual é controlada pela difusão. A temperatura foi mantida constante e o ambiente saturado, portanto, não são variáveis consideradas intervenientes na cinética da reação.

Vários modelos químico-mecânicos foram desenvolvidos por Poyet *et al.* (2007), Multon *et al.* (2009), Bažant e Rahimi-Aghdam (2017), Rahman e Lu (2019) e Allahyari *et al.* (2020). Esses modelos divergem quando se considera os parâmetros de entrada e robustez, embora eles descrevam os aspectos físico-químicos da reação em maior detalhe e em função de diversas variáveis adicionais.

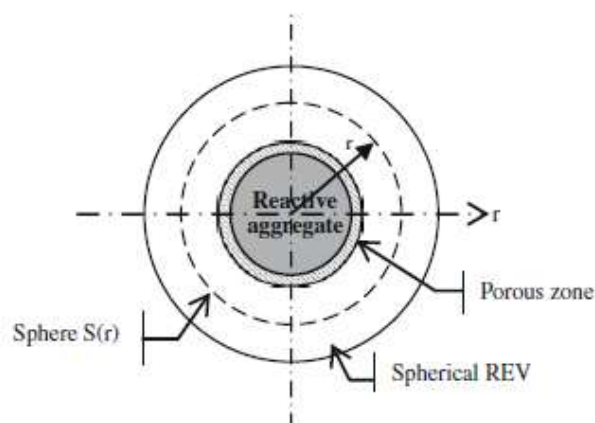


- *Modelo proposto por Poyet et al. (2007)*

O efeito cinético da RAS nos agregados esféricos foi avaliado por Poyet *et al.* (2007). O modelo foi baseado na mecânica de reação de Dent Glasser e Kataoka (1981). Para o modelo foi suposto que: a) Os agregados reativos são esféricos e distribuídos estatisticamente de forma homogênea dentro de concreto; b) Os materiais e a RAS são isotrópicos; c) Em presença de sílica reativa suficiente, todos os íons que tiveram contato com os agregados reativos reagiram.

Assim, estas suposições permitiram que os autores estudassem um Volume Elementar Representativo (VER), em que todas as concentrações desconhecidas dependem apenas do raio  $r$ , conforme Figura 38. Foi assumido que o produto da reação está situado nas bordas do agregado.

Figura 38 – Exemplo de VER para um agregado reativo



Fonte: Poyet *et al.* (2007).

A sílica reativa presente no agregado interage com os íons alcalinos a fim de criar géis. Fora dos agregados reativos, há equilíbrio entre álcalis, íons de cálcio e portlandita (POYET *et al.*, 2007). Desta forma, existe um termo de fonte suplementar na equação de difusão. Ela representa a dissolução/ precipitação de portlandita no modelo. Logo, o equilíbrio pode ser descrito usando o seguinte: Equilíbrio de Portlandite conforme a equação 6.

$$(Ca^{+2})(OH^{-}) = 10^{-pK_{CH}}$$

6

Onde:

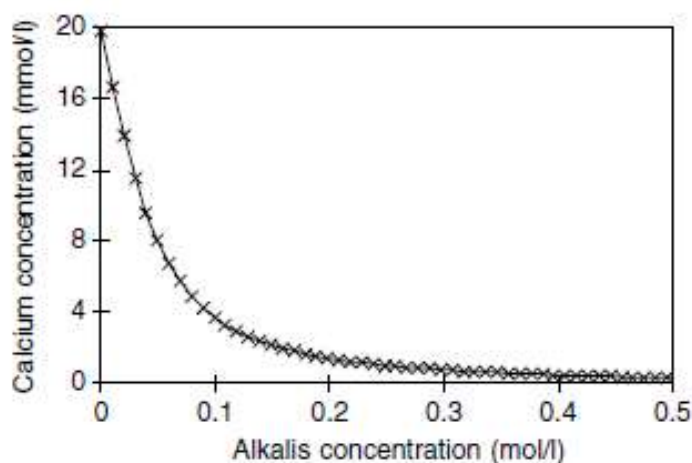
$(Ca^{+2})(OH^{-})$  – representam a atividade iônica dos íons de cálcio e hidroxilas respectivamente;

$pK_{CH}$  – valor igual 5,1

No modelo foi avaliado o transporte de íons de sódio e cálcio nos agregados através do equilíbrio da concentração, que se localizam externamente. As análises conduziram a um conjunto de equações não lineares que foram resolvidos através de cálculo iterativo.

O resultado pode ser observado na Figura 39, que à medida que a concentração de álcalis diminui a concentração de cálcio aumenta. Este equilíbrio entre os álcalis e os íons de cálcio em solução pode ser descrito.

Figura 39 - Equilíbrio teórico entre os álcalis e os íons de cálcio em solução, na presença suficiente de portlandita.



Fonte: Poyet *et al.* (2007).

No modelo de Poyet *et al.* (2007), a expansão induzida por RAS era determinada analisando as quantidades de álcalis e íons de cálcio que reagiram. Então no modelo foi verificado a porcentagem de sílica reativa do agregado que foi calculada através de conjuntos de equações de difusão. Outro ponto importante,

os autores puderam identificar dois produtos distintos na RAS: um gel formado e C-S-H, no qual os volumes desses produtos foram calculados usando conhecimento de volume molar dos géis.

Foi presumido que esses produtos se precipitavam dentro da zona porosa ao redor do agregado. Assim, a expansão induzida ocorreria quando esta zona porosa estivesse completamente preenchida, ocasionando o dano isotrópico descrito na equação 7.

$$\varepsilon^{asr}(t) = \epsilon_0^{asr} \frac{d(t)}{1-d(t)} \quad 7$$

Onde:

$d(t)$  – Dano isotrópico

$\epsilon_0^{asr}$  – Expansão inicial

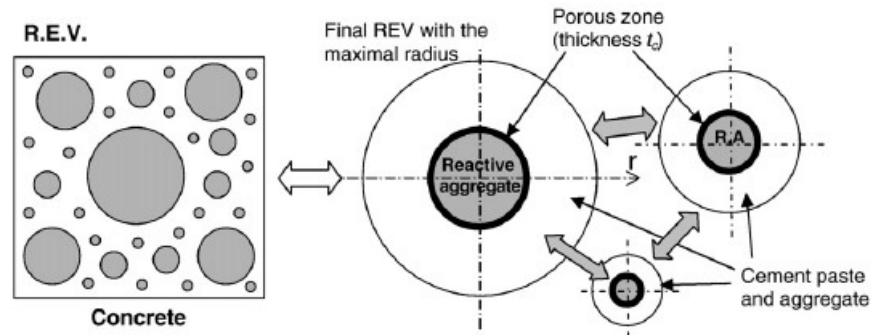
O processo de difusão foi considerado dependente também da precipitação de Portlandita, que influencia a taxa de expansão do concreto. O modelo foi validado, em relação a livre expansão do concreto, para amostras de laboratório, que se distinguem apenas nos tipos de agregados utilizados.

- *Modelo proposto por Multon et al. (2009)*

Multon *et al.* (2009) apresentaram uma análise microscópica para avaliar o desenvolvimento da expansão de argamassa com agregados reativos em diferentes granulometrias. A RAS ocorre em um meio complexo, por esse motivo foi adotado simplificações desta reação a fim de modelar a expansão do fenômeno.

Então foi adotado um Volume Elementar Relativo (VER) de concreto ao redor do agregado reativo. Esse VER foi proposto por Poyet *et al.* (2006), e adotado por Multon *et al.* (2009) como estratégia para analisar os vários tamanhos de agregados reativos como demonstrado na Figura 40.

Figura 40 - Definição do Volume Elementar Relativo para vários tamanhos de agregados reativos



Fonte: Poyet *et al.* (2006) *apud* Multon *et al.* (2009)

O modelo proposto dividiu a reação em duas partes. A primeira parte da reação foi dada pela difusão dos íons alcalinos e hidroxilas no agregado reativo e a distribuição das ligações silanol (SiOH) e siloxano (Si-O-Si) contida na sílica reativa.

A difusão do álcali no agregado foi controlada pela equação do balanço de massa, para representar o consumo de álcalis durante a formação do gel da RAS. O volume de gel produzido pela reação, pôde ser calculada a partir do álcali consumido, através da equação de equilíbrio de massa conforme expressão 8.

$$\frac{\partial}{\partial t} (P_{agg} S_r C_{Na}) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( D * r^2 \frac{dC_{Na}}{dr} \right) + S(C_{Na}) \quad 8$$

Onde:

t – Tempo;

$P_{agg}$  – Porosidade do agregado;

$S_r$  – Grau de saturação;

$C_{Na}$  – Concentração de álcalis (Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>);

D – Coeficiente de difusão de álcalis no agregado;

$S(C_{Na})$  – O termo de esgotamento que representa o consumo de álcalis.

A segunda parte da reação é referente a formação dos géis na presença de íons de cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e água com base no mecanismo já proposto. Assim, após

formação do gel que permeia a zona porosa entre o agregado reativo e a pasta de cimento, haverá o preenchimento de uma parte desta porosidade. Em seguida, o gel exercerá uma pressão que ocasionará fissuras e expansão no concreto.

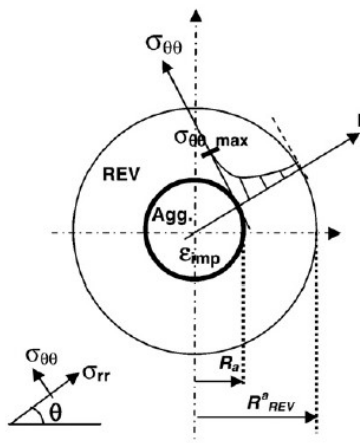
Na modelagem química apresentada, supõe-se que 1 mol de  $\text{Na}_2\text{O}_{eq}$  reage com 5 mol de  $\text{SiO}_2$  para dar 1 mol de gel de RAS. Para cada tamanho de agregado foi calculado o volume de gel produzido (ng).

Então, para calcular o  $V_g$  (volume gel formado pela reação), principal resultado da modelagem química, foi obtido pela multiplicação do mol de gel da RAS produzida pelo agregado e pelo  $V_{gel}^{mol}$  (volume molar do gel). O volume do gel é utilizado para calcular a tensão induzida e posteriormente a expansão do concreto conforme expressão 9.

$$V_g = \sum_i n_g^a \times V_{gel}^{mol} \quad 9$$

Referente a modelagem química, as equações de equilíbrio mecânico são calculadas no VRE esférica, como já foi descrito para condições elásticas. Na modelagem mecânica no VER, as equações mecânicas são utilizadas para dois meios: a) analisar o agregado em estudo; b) analisar o concreto a redor do agregado em estudo (SC), conforme Figura 41.

Figura 41 - Tensão de tração no VER submetido a tensões induzidas pela RAS.



Fonte: Multon *et al.* (2009)

Analisando a Figura 41 percebe-se que a formação do gel ocasiona máxima tensão próxima do agregado reativo. Devido a expansão do gel, o agregado é submetido a uma tensão isotrópica. Esta tensão isotrópica é equilibrada pela tensão compressiva radial no concreto ao redor do agregado. Nessa modelagem, o problema mecânico foi suposto ser não-linear e elástico, devido à introdução da variável danos (MULTON *et al.*, 2009).

A expansão ocasionada pela RAS pode ser levada em conta como uma tensão imposta na lei constitutiva elástica do agregado conforme equação 10.

$$\sigma_a = \lambda_a Tr \varepsilon_a . I + 2 . \mu_a \varepsilon_a - (3\lambda_a + 2\mu_a) . \varepsilon_{imp1}(t) \quad 10$$

A lei constitutiva do meio SC considera apenas o efeito elástico do material de acordo com a expressão 11.

$$\sigma_{SC} = \lambda_{SC} Tr \varepsilon_{SC} . I + 2 . \mu_{SC} \varepsilon_{SC} \quad 11$$

Onde:

$\sigma$  – A matriz de tensão para cada material;

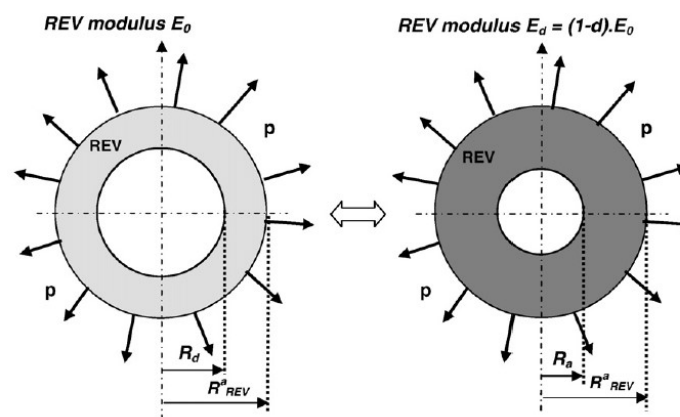
$\varepsilon$  – A matriz de tensão para cada material;

$I$  – A matriz da unidade.

As equações mecânicas podem ser resolvidas, e a variação da variável danificada foi definida por tensões nos dois meios (agregado e pasta) e desta forma a variável danificada pode ser analisada. Analisando as interações entres as fissuras dos diferentes agregados no VER, foi observado uma diminuição no módulo de elasticidade do concreto, que foi modelada por uma variável de dano Figura 42.

O método de avaliação do dano foi baseado no princípio da equivalência de tensão Figura 43, onde o meio fissurado foi substituído por um meio equivalente sem rachadura, porém com módulo de elasticidade inferior, conforme Figura 42.

Figura 42 - Determinação do módulo do concreto danificado.



Fonte: Multon *et al.* (2009)

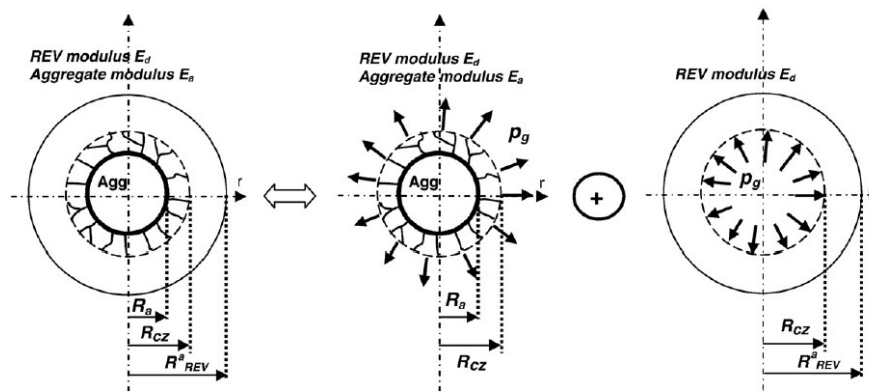
Desta forma, como a zona fissurada não pode resistir à tensão radial que excede a resistência à tração, o concreto residual não fissurado ao redor é substituído por uma esfera oca equivalente, com raios internos e externos iguais a  $R_d$  e  $R_a$ .

De acordo com o princípio de equivalência de tensão, a tensão radial desta esfera oca deve ser igual ao esforço radial da esfera oca não fissurada com raios internos e externos iguais a  $R_a$  e  $R_a$ .

Por fim, o problema mecânico estudado para avaliar a expansão do concreto por RAS é demonstrado na Figura 43. O modelo assume que as fissuras próximas do agregado são preenchidas pelo gel da RAS, desta forma, pode-se observar três partes na Figura 44 o agregado central (entre os raios 0 e  $R_a$ ), a zona fissurada preenchida pelo gel (entre os raios  $R_a$  e  $R_{cz}$ ) e a parte do REV ainda não fissurada.

Quando o gel atinge as fissuras ligadas ao agregado reativo, o raio  $R_{cz}$  corresponde ao raio  $R_d$  é utilizado para determinar o dano como demonstrado na Figura 43.

Figura 43 - Equilíbrio mecânico do REV danificado.



Fonte: Multon *et al.* (2009)

Para determinar o processo de expansão, foi acoplado a modelagem química a modelagem mecânica. Assim, a expansão induzida por RAS pode ser calculada em cada fração de tamanho de agregado. Para cada fração de tamanho de agregado pode ser calculada de acordo com a expressão 12.

$$\varepsilon_a = \frac{u_{rr}(R_{VER}^a)}{R_{VER}^a} \quad 12$$

Onde:

$u$  – Deslocamento;

$R_{VER}^a$  – O raio do VER correspondente ao tamanho agregado fração  $i$ .

Se o concreto contiver várias frações de tamanho agregado, é assumido que a tensão resultante é a soma das expansões induzidas por cada fração (equação 13).

$$\varepsilon_{RAS} = \sum_a \varepsilon_a \quad 13$$

O modelo apresentado foi feito em uma escala microscópica empírica melhorada para avaliar o processo de expansão. A modelagem mecânica, utilizou uma variável de dano a fim de determinam a expansão da RAS devido ao volume de gel produzido pela reação, que foi determinada pela parte físico-química do modelo.



A difusão e a fixação do álcali foram avaliadas com a equação do balanço de massa. A cinética de consumo de álcalis é assumida como proporcional à diferença entre a concentração de álcalis no agregado e o limite acima do qual a dissolução de sílica começa

Como desvantagem pode-se mencionar às suposições sobre as composições dos géis produzidas pela reação, pois as composições dos géis dependem de muitos parâmetros. Depende também da posição do gel no concreto (dentro ou fora do agregado) e sua idade. E como vantagem os parâmetros do modelo mecânico não precisa de ajustes.

- *Modelo proposto por Bazant & Rahimi-Aghdam (2017)*

Bazant & Rahimi-Aghdam (2017) propuseram um modelo que tenta levar em consideração a interação entre agregado reativo (difusão, cinética) e concreto (tensões e deformações). O modelo foi baseado no processo de difusão e fluência, combinado com o modelo de microplano.

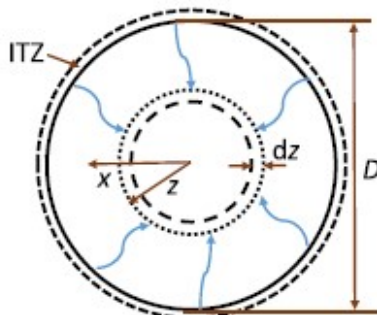
Para modelar a parte cinética foi adotado o modelo modificado proposto por Alnaggar *et al.* (2013). Esse modelo foi escolhido para representar a cinética da reação, por ser o modelo melhorado de Bazant e Steffens (2000) e não considerar a forma do agregado, assim a simplificação para agregados esféricos pôde ser adotada no modelo.

Como a RAS ocorre em vários pontos discretos e de forma aleatória no agregado, a penetração de álcalis na matriz de argamassa poderá ativar os primeiros pontos reativos do agregado localizados em sua superfície. O tempo para iniciar a reação dentro do agregado, onde existe pontos reativos, irá aumentar em relação a sua profundidade.

Para descrever o comportamento de  $n$  agregados, um modelo contínuo foi introduzido, adotando a difusão da água de forma radial no agregado esférico. Assim, presume-se que a reação ASR ocorra instantaneamente na frente

esférica de penetração da água, que forma uma superfície esférica de raio decrescente  $z$ , conforme Figura 44 (BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, 2017).

Figura 44 - Formação de gel da RAS devido à difusão da água em agregado reativo: idealização com difusão esférica



Fonte: Bazant e Rahimi-Aghdam (2017)

Os autores concluíram que a reação é retardada pela difusão da água no agregado, particularmente pela camada de gel da RAS formada em seu interior. Portanto, a difusão radial da água através da barreira de gel previamente formada, controla a taxa de reação da RAS.

Então, para simplificar, o perfil radial de concentração de água  $\xi_w$  (massa de água por unidade de volume de agregado) foi considerado fixo e é assumido como a solução da equação de difusão linear em coordenadas esféricas (BAZANT & STEFFENS, 2000). Então foi proposto as condições de contorno adequadas a seguir (equações 14; 15; 16 e 17).

$$\xi_w = w_s F(\bar{x}) \quad 14$$

$$F(\bar{x}) = \frac{1 - \bar{z}/\bar{x}}{1 - \bar{z}} \quad 15$$

$$\bar{x} = \frac{2x}{D} \quad 16$$

$$\bar{z} = \frac{2z}{D} \quad 17$$

Onde:

$x$  – Coordenada radial;

$\bar{x}$  – Coordenada radial sem dimensões;

$w_s$  – Concentração de água na superfície do agregado;

$F(\bar{x})$  – Concentração sem dimensão, perfil obtido como a solução da equação de Laplace para a equação esférica geometria (BAZANT & STEFFENS, 2000)

Um outro mecanismo que controla a taxa da RAS, é a expulsão de gel de uma fonte para os poros adjacentes. Esse mecanismo foi tratado como um fluxo de difusão que obedecia à lei de Darcy. Com uma análise crítica, os autores puderam proceder a uma equação diferencial pontual para a difusão em coordenada  $x$ .

Porém, devido as simplificações inevitáveis e incertezas o fluxo de velocidade  $Z$  foi substituído pela velocidade  $dx/dt$  da frente de difusão à distância  $x$  da fonte de gel. O gradiente de pressão adotado como gradiente de pressão médio. Desta forma, chegou-se à equação de difusão simplificada de Darcy conforme expressão 18.

$$\frac{dx}{dt} = bD \frac{p}{x} \quad 18$$

Onde:

$bD$  – Permeabilidade de Darcy;

$p$  – Pressão

$x$  – Distância da fonte de gel

Quando a pressão do gel da RAS aumenta, ocasiona um ambiente (concreto) propício a fissurar. Essas possíveis fissuras acarretará um aumento significativo na permeabilidade do concreto. Desta forma, a difusão é influenciada em primeiro momento pelo aumento da pressão que acelera o processo difusivo. Em segundo momento a difusão é acelerada pelo aumento da permeabilidade do concreto, devido as fissuras ocasionadas pela pressão do gel.

Com a formação do gel, os poros são facilmente preenchidos. Essa fração de volume de poros  $V_0$  é separada em três categorias, sendo elas: (a) poros dentro do agregado; (b) poros da pasta de cimento e (c) poros na interface da zona de transição (IZT).

O preenchimento desses poros, leva bastante tempo podendo ser anos ou até décadas. Só após totalmente preenchidos, a pressão ocasionada pelo gel da RAS começará a ser significativa, difundindo-se em vazios e fissuras conforme Figura 45a. e para cada caminho de infiltração do gel é possível escrever a seguinte equação 19 com base na Figura 45b.

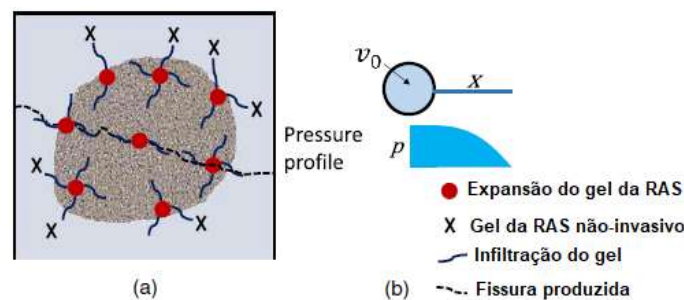
$$dv_1 = a_f dx = a_f b_D \frac{p}{x} dt \quad 19$$

Onde:

$v_1$  – Fração de volume de um caminho de infiltração do gel;

$a_f$  – Área média da seção transversal do caminho de infiltração;

Figura 45 - Transporte de gel da RAS esquematizado



(a) infiltração do gel da RAS e dano global produzido; (b) um caminho ideal de infiltração do gel

Fonte: Bazant e Rahimi-Aghdam (2017)

Os autores consideraram que o  $V_0$  era facilmente acessível e preenchida a uma pressão quase zero, sem gradiente de pressão, que provavelmente ocasionaria uma pressão uniforme, porém não nula, após os poros serem totalmente preenchidos conforme equação 20.

$$x = [v_1 - v_0]/a_f \quad 20$$

Onde:

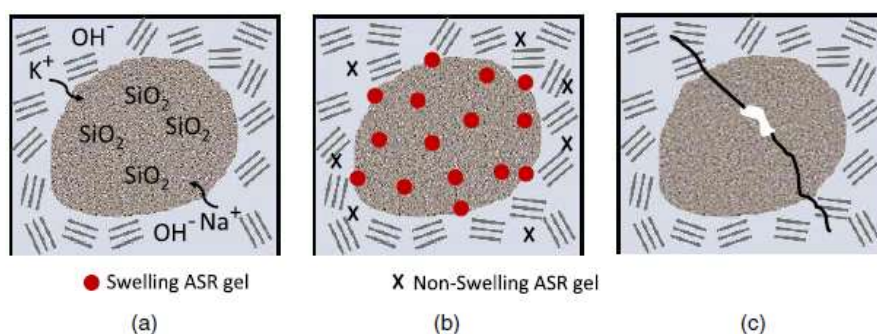
$v_0$  – Fração de volume de poros de fácil acesso por caminho de infiltração do gel;

Assim a equação 20 pode ser reescrita da seguinte forma, como demonstrado na expressão 21.

$$dv_1 = a_f dx = a_f b_D \frac{a_f p}{v_1 - v_0} dt \quad 21$$

Para o modelo foi considerada várias fontes de gel da RAS em cada agregado com sílica reativa. De cada fonte, o gel pode se difundir em várias direções tais como poros, na zona de interface de transição (ZIT) e nas fissuras como demonstrado na Figura 46.

Figura 46 - Processo da RAS e ilustração esquemática dos danos induzidos por RAS



(a) reação álcali-sílica; (b) formação de expansão do gel da RAS; (c) danos e fissuras induzidos por RAS.

Fonte: Bazant e Rahimi-Aghdam (2017)

Após toda modelagem química envolvendo cinética e difusão, o modelo parta para uma análise sólida do concreto adotando o modelo de microplano M7. Pôr na maioria dos casos de RAS, a estrutura é submetida a estado de tensão multiaxial, espera-se que os danos ocasionados sejam de forma anisotrópica.

Assim, os danos anisotrópicos na estrutura de concreto, pode ser descrito pelo modelo constitutivo do microplano, em que a estratégia é expressar em termos de vetores as tensão e deformação que estariam atuando em um plano genérico de qualquer orientação na microestrutura do concreto, chamado microplano conforme Figura 40. Desta forma, o vetor de tensão em cada microplano é a projeção do tensor de tensão macroscópico, conforme equação 22.

$$\sigma_{ij} = \frac{3}{2\pi} \int_{\Omega} (N_{ij}\sigma_N + M_{ij}\sigma_M + L_{ij}\sigma_L) d\Omega$$

22

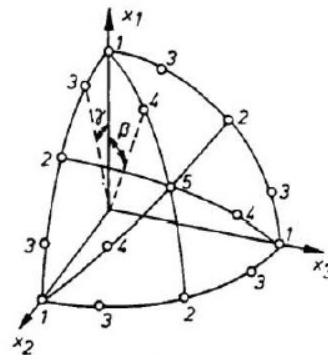
Onde:

$\Omega$  – Unidade hemisférica, sobre a qual a integração é levada numericamente, por uma fórmula ótima de integração gaussiana (Figura 47);

$N_{ij}$ ;  $M_{ij}$ ;  $L_{ij}$  – Direção de cada microplano;

$\sigma_N$ ;  $\sigma_M$ ;  $\sigma_L$  – O princípio do trabalho virtual.

Figura 47 - Modelo em microplano: Conjunto de pontos de integração

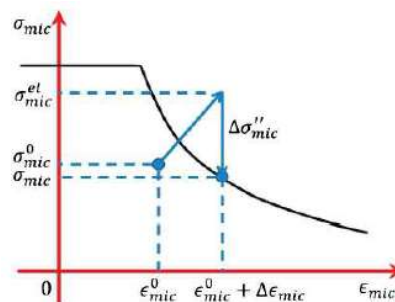


Fonte: Bazant e Rahimi-Aghdam (2017)

O modelo calcula a tensão do vetor microplano através do vetor de deformação do microplano. No cálculo, está envolvido tensão-deformação limite, em que o comportamento pode ser elástico ou inelástico (dano).

Quando o incremento elástico excede os limites do ponto de tensão e cai com uma tensão constante até o limite, esta queda representa o estado inelástico (dano) conforme Figura 48.

Figura 48 - Modelo em microplano: Retorno vertical à deformação por esforço limite



Fonte: Bazant e Rahimi-Aghdam (2017)

O modelo considera o processo microscópico, ou seja, formação do gel e expansão em que ocasiona pressão interna, e consequente as tensão e deformações a nível macroscópico traduzida a vetor de tensão associado a microplanos. O modelo de microplanos considera a anisotropia das tensões devido o concreto estar submetido ao estado de tensão multiaxial, ou seja, tensão axial e cisalhamento.

Assim, o intuito do modelo é expressar as tensões e deformações em termos de vetores atuando em um plano genérico de qualquer orientação na microestrutura do concreto. O modelo tem muitos parâmetros, porém tem uma representatividade do que realmente ocorre na estrutura.

- *Modelo proposto por Rahman e Lu (2019)*

Rahman e Lu (2019) desenvolveram um modelo dependente do tempo. O modelo proposto foi desenvolvido para quantificar a cinética da RAS e analisar o comportamento mecânico. A cinética da reação RAS foi considerada no estudo como a taxa de reação do mecanismo de reação.

Para cada estágio (hidratação, neutralização e osmose) a taxa de reação é diferente. Desta forma, foram atribuídas as taxas de reação  $K_1, K_2, K_3$  atribuída a cada estágio respectivamente (hidratação, neutralização e osmose). Essas taxas dependem da temperatura e está vinculada através da equação de Arrhenius conforme expressão 23:

$$k = Ae^{(-E_a/RgT)} \quad 23$$

Onde:

$k$  – Taxa de reação;  
 $A$  – Fator de frequência;  
 $E_a$  – Energia de ativação;  
 $Rg$  – Constate do gás;  
 $T$  – Temperatura.

A partir da taxa de reação, pode-se calcular a taxa de mudança de concentração de cada espécie química conforme as equações 23. Na pesquisa foram consideradas todas as espécies químicas que participam da cinética da RAS.

Desta forma, houve a quantificação da concentração total de gel da RAS em concreto após certo período de tempo, baseado em todas etapas envolvidas na cinética química, conforme as expressões 24; 25; 26; 27; 28 e 29.

$$\frac{d[\text{siloxano}]}{dt} = -K_1[\text{siloxano}][\text{ROH}] \quad 24$$

$$\frac{d[\text{ROH}]}{dt} = -K_1[\text{siloxano}][\text{ROH}] - K_2[\text{silanol}][\text{ROH}] \quad 25$$

$$\frac{d[\text{RAS gel}]}{dt} = K_1[\text{siloxano}][\text{ROH}] + [\text{silanol}][\text{ROH}] - K_3[\text{RAS gel}][\text{H}_2\text{O}] \quad 26$$

$$\frac{d[\text{silanol}]}{dt} = K_1[\text{siloxano}][\text{ROH}] - K_2[\text{silanol}][\text{ROH}] \quad 27$$

$$\frac{d[\text{H}_2\text{O}]}{dt} = K_2[\text{silanol}][\text{ROH}] - K_3[\text{RAS gel}][\text{H}_2\text{O}] \quad 28$$

$$\frac{d[\text{expansão do gel RAS}]}{dt} = K_3[\text{RAS gel}][\text{H}_2\text{O}] \quad 29$$

Onde:

[siloxano]; [silanol]; [ROH]; [RAS gel]; [H<sub>2</sub>O] e [Expansão do gel RAS] – Representa a concentração de cada espécie química.

A RAS se desenvolve à medida que ocorre mudança na concentração das espécies químicas envolvidas. Desta forma, ocorre a formação do gel e a penetração nos poros depois o gel flui ao longo das fissuras. No estudo proposto por Rahman e Lu (2019), foi adotado o método de elementos finitos (MEF) para calcular e prever a expansão induzida pelo ASR.

No modelo foi demonstrado que seis espécie química participa do mecanismo da RAS de acordo com a cinética química. Assim, para resolver o problema foi necessário um sistema de seis acoplamentos. No modelo os autores utilizaram o princípio de equilíbrio de massa e momento de equilíbrio.

Para o equilíbrio de massa foi adotado a lei de Darcy, para simular o transporte e difusão de gel nos meios porosos do concreto. Foi formulado uma equação



que demonstra esse equilíbrio das espécies químicas envolvidas e modela o transporte químico através da difusão, conforme expressão 30

$$\frac{\partial}{\partial t} c_i + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + u \cdot \nabla c_i = R_i \quad 30$$

Onde:

$c_i$  – É a concentração da espécie i (mol/m<sup>3</sup>);

$D_i$  – Coeficiente de difusão da espécie i (m<sup>2</sup>/s);

$u$  – É o vetor velocidade do fluido (m/s) com componentes x, y e z respectivamente;

$R_i$  – É o termo fonte da espécie i (mol/(m<sup>3</sup>/s)).

Esta equação de equilíbrio considera o mecanismo de transporte, ou seja, o transporte das espécies pelo processo de difusão e pelo processo de diluição, para as espécies químicas que permanecem nos poros do concreto. A variável dependente nesta equação é a concentração das espécies químicas envolvidas no mecanismo de reação.

Para modelar o fluxo do gel no meio poroso do concreto, foi adotado a equação da lei de Darcy. Esse modelo matemático pode avaliar uma grande variedade de aplicações envolvendo fluxos. Portanto, a lei de Darcy foi utilizada pelos autores para modelar fluxos de baixa velocidade do gel nos meios porosos onde o gradiente de pressão é a maior força motriz.

Levando em consideração a viscosidade do gel, a lei de Darcy descreve a permeação do gel na pasta de cimento, que ocasiona pressão no agregado. Essa equação é descrita conforme expressão 31 e 32, e observa-se que a variável dependente nesta equação é a pressão.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho) + \nabla (\rho u) = Q_m \quad 31$$

$$u = -\frac{K}{\mu} \nabla p \quad 32$$

Onde:

$\varepsilon_p$  – É a porosidade;

$\rho$  – A densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>);  
 $u$  – Vetor velocidade (m/s);  
 $Q_m$  – Fonte de massa do fluido (kg/(m<sup>3</sup>.s));  
 $K$  – É a permeabilidade do meio poroso (m<sup>2</sup>);  
 $\mu$  – É a viscosidade do fluido (Pa.s);  
 $p$  – Pressão (Pa).

No processo, os autores mantiveram a permeabilidade constante, pois consideraram o modelo no estado saturado durante a simulação. Para evitar a complexidade na simulação Rahman e Lu (2019) consideraram que: a) a reação ocorre em condições suficiente de umidade e sílica reativa; b) que durante o processo químico não haveria nenhuma mudança de massa, ou seja, massa do concreto constante; c) que não haveria cálcio, e assim, não teria reação entre o gel da RAS e íons de cálcio; d) foi suposto que os íons  $Na^+$  e  $K^+$  teriam o mesmo efeito no modelo e e) o ataque é uniforme no agregado.

Conforme o mecanismo da RAS, os danos progridem com a difusão do gel (RAHMAN E LU, 41). Desta forma, a expansão do gel da RAS se dá pela mudança de volume ao longo do tempo. A tensão volumétrica se dá pela variação volumétrica em relação ao volume total do concreto, conforme equação 33.

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} \quad 33$$

Sendo:

$\Delta V$  – Variação do volume;

$V$  – Volume total do concreto.

Esse processo volumétrico é lento, assim as tensões volumétricas não são visíveis logo após o início da RAS. O gel vai preenchendo os poros das parta de cimento, e desta forma não há mudança volumétrica. Após o preenchimento total dos poros, se pode observa uma mudança volumétrica inicial.

Os danos ocasionados no concreto devido a RAS pode não ser isotrópico em estruturas reais. Porém, na pesquisa os autores desenvolveram o modelo

baseado na isotropia do dano sob carga aplicada. Tensão induzida na estrutura de concreto devido à variação volumétrica pode ser expressa usando a Lei de Hooke, conforme expressão 34.

$$\sigma = E\varepsilon \quad 34$$

Onde:

$\sigma$  – Tensor de tensão;

$E$  – Módulo de elasticidade;

$\varepsilon$  – Tensor de tensão volumétrica.

O tensor de variação volumétrica pode ser expresso da seguinte equação 35 (forma matricial).

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 1 & 1 \\ 1 & \varepsilon_{22} & 1 \\ 1 & 1 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad 35$$

De acordo com o estudo de Balbo *et al.* (2015), um critério de dano químico pode ser formulado em termos de função de danos, como se segue:

$$D = \begin{cases} 0 & \text{Quando, } \varepsilon_{gel} \leq 0,1\% \\ W & \text{Quando, } \varepsilon_{gel} > 0,1\% \end{cases}$$

Sendo:

$W = 2,021x \varepsilon_{gel} - 0,195$ ,  $\varepsilon_{gel}$  – Representa tensão volumétrica gerada pelo gel da RAS.

Quando a tensão volumétrica supera a tensão de confinamento, iniciasse o processo de fissuras na estrutura de concreto. Assim, a densidade do concreto no estado danificado não é a mesma comparada a sua densidade inicial.

A tensão volumétrica induzida pela RAS ( $\varepsilon_{gel}$ ) foi expressa em relação a densidade do concreto na situação danificada e não danificada, conforme equação 36.

$$\varepsilon_{gel} = 1 - \frac{\rho_c}{\rho'} = 1 - \frac{\rho_c}{\rho_c + \rho_{gel}} \quad 36$$

O modelo proposto por Rahman e Lu (2019), desenvolveu o equilíbrio de massa e sua implementação numérica, considerando a cinética da reação que foi uma grande contribuição da pesquisa, para prever o dano ocasionado por RAS.

Os resultados da pesquisa confirmaram que a expansão média em concreto começa após o período de latência e depois continua a aumentar com uma taxa decrescente.

O modelo proposto é interessante, pois pode ser calibrado mais para qualquer estrutura de concreto, alterando as concentrações iniciais de espécies químicas, densidade do concreto e condições de carga de acordo com a finalidade, proporção ou propriedades do domínio de concreto.

Como desvantagem, pode-se mencionar algumas simplificações necessárias adotadas no modelo para compensar o custo computacional, sendo incluído a consideração de danos isotrópicos.

- *Modelo proposto por Allahyari et al. (2020)*

Com o avanço tecnológico nas últimas décadas, as Redes Neurais Artificiais (RNAs), foram introduzidas como ferramenta poderosa para modelar problemas complexos. Uma RNAs, é, de fato, um sistema de processamento de dados que consiste em um grande número de elementos computacionais interconectados chamados neurônios (ALLAHYARI *et al.*, 2020).

O modelo proposto por Allahyari *et al.* (2020), utilizou uma abordagem de aprendizado de máquina, ou seja, rede neural artificial (RNA), propuseram um modelo que combina abordagens quimo-mecânicas e cinéticas para desenvolver um ambiente dependente do tempo e da temperatura para geração de gráficos e assim avaliar convenientemente as estruturas de concreto existentes.

- RESUMO DOS MODELOS MATEMÁTICOS BASEADOS NO PROCESSO DE DIFUSÃO (TIPO1)

Os modelos matemáticos baseados em difusão para a reação álcali-sílica (RAS) em concreto têm sido amplamente estudados e aplicados devido à sua capacidade de capturar os processos de transporte de íons alcalinos e reativos dentro da matriz do concreto. Esses modelos buscam descrever como os íons alcalinos provenientes de fontes externas, como agregados reativos, penetram no concreto, interagem com a sílica presente nos agregados e iniciam a reação de expansão.

Uma das principais vantagens dos modelos baseados em difusão é a sua capacidade de fornecer uma representação física realista dos processos que ocorrem dentro do concreto. Eles são fundamentados em princípios de transporte de massa e difusão, o que os torna consistentes com as leis da física e da química. Além disso, esses modelos podem ser adaptados para considerar uma variedade de condições ambientais e materiais, permitindo uma análise mais precisa e detalhada do comportamento da RAS em diferentes contextos.

No entanto, os modelos de difusão também apresentam algumas limitações e desafios. Um dos principais desafios é a complexidade da matriz de concreto e dos processos envolvidos na RAS, que podem ser influenciados por uma série de fatores, como a composição do concreto, as condições ambientais e as características dos agregados. Modelar com precisão todos esses aspectos pode ser extremamente desafiador e requer um entendimento profundo dos mecanismos subjacentes.

Além disso, os modelos de difusão muitas vezes dependem de parâmetros empíricos que podem variar dependendo das condições específicas do local e do tipo de concreto. Isso pode dificultar a aplicação direta desses modelos em diferentes situações sem uma calibração adequada.

Outra limitação dos modelos de difusão é que eles tendem a se concentrar apenas na fase inicial da RAS, ou seja, na penetração dos íons alcalinos e na formação do gel de sílica. Eles podem não capturar adequadamente os efeitos

de longo prazo da expansão do gel e suas consequências para a durabilidade e integridade estrutural do concreto.

Em resumo, os modelos matemáticos baseados em difusão para a RAS oferecem uma abordagem valiosa para entender e prever o comportamento do concreto exposto a essa reação. No entanto, eles também apresentam desafios significativos em termos de complexidade e precisão, destacando a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento nesta área. A Tabela 11 mostra um resumo dos modelos destacando o tipo e o mecanismo.

Tabela 11 - Modelos baseados no processo de difusão.

<b>Autor</b>	<b>Tipo do modelo</b>	<b>Mecânica de difusão</b>
Hirche e Wolff (1974)	Fenomenológico com base na difusão	Difusão e troca de íons alcalinos
Svenson (1991)	Fenomenológico com base na difusão governada pela equação de Fourier	Concentração de íons; Difusividade; Tempo e Tensores.
Bazant e Steffens (2000)	Analítico	Dissolução da sílica; Difusão da água e Absorção de água na região porosa.
Suwito <i>et al.</i> (2002)	Químico-micro-poro-Mecânico	Difusão de íons; Difusão do gel na pasta de cimento.
Poyet <i>et al.</i> (2007)	Químico-mecânico	Difusão dos íons de sódio e cálcio no gel
Multon <i>et al.</i> (2009)	Químico-micro-poro-Mecânico	Difusão dos íons de sódio e cálcio no gel
Bazant e Rahimi-Aghdam (2016)	Difusão e Fluência	Dissolução da sílica; Difusão da água e Absorção de água na região porosa.
Md. Asif Rahman e Yang Lu (2019)	Matemático químico-mecânico	Mudança na concentração de espécies químicas; Transportes de íons; Difusão do gel nos meios porosos.
Allahyari <i>et al.</i> (2020)	Químico-mecânico	Cinética dependente do tempo e da temperatura; Coeficiente de difusão dos agregados; Difusão de íons.

Fonte: O autor (2023).

### 5.5.2 Modelos matemáticos de RAS para concreto baseados na produção de gel (Tipo 2)

Sabe-se que a definição de um gel consiste como um sólido ocupando a totalidade do volume do líquido que o originou. Já a definição de um precipitado consiste em um sólido formado por partículas proveniente de um material denso isoladamente disperso ou em uma solução. A formação de um gel ou de um precipitado, após a desestabilização das soluções silico-alcalinas por adição de íons cálcio, é função da natureza da solução silico-alcalina inicial (LOPES, 2004).

Vários estudos convergiram também em relação à importância dos íons de cálcio, no desenvolvimento da RAS. De acordo com Chatterji (1989), citado por Peterson (PETERSON, 2000), foi sugerido que a difusão da sílica para outros pontos é controlada por concentração local de cálcio ( $Ca^{+2}$ ). De acordo com Rahman e Lu (RAHMAN & LU, 2019), o início do processo da reação se dá com a dissolução dos componentes siliciosos na superfície das partículas do agregado reativo, e também avaliou a mudança de concentração e o transporte de íons.

Para propor a produção do gel formado na RAS diversos autores propuseram modelos em que foi considerada quantidade de agregados reativos, associando os fenômenos físico-químicos da RAS ao comportamento mecânico do concreto (HOBBS, 1981; DUNANT & SCRIVENER, 2010; PIGNATELLI *et al.* 2013; CHARPIN & EHRLACHER, 2014).

Nesses modelos a variação de massa, ou do volume do gel formado, são avaliados. Muitas vezes, para a validação, são realizados testes laboratoriais, pois a variação, seja de massa ou volume de gel, impõe uma pressão interna que ocasiona fissuras e fluência na estrutura (KAWABATA *et al.*, 2017; BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, (2017). Nessa abordagem, a cinética é considerada como uma função da mudança de volume ou de massa do gel da RAS. Além disso, a cinética da RAS é introduzida por alguns autores aos modelos com abordagem químico-mecânica (BANGERT *et al.*, 2004; SAOUMA & PEROTTI, 2006).

- *Modelo de Hobbs (1981)*

Hobbs (1981) apresentou um modelo em que a taxa de reação era diretamente proporcional à quantidade de agregado reativo. O modelo era capaz de prever o tempo de fissuração e expansão, e foi validado de acordo com o comportamento observado nas amostras de argamassas que continha sílica opalina. No entanto, a sua proposta de modelo estava limitada à argamassa, pois à necessidade de mais energia para iniciar a fissuração e expansão no concreto são maiores do que na argamassa, logo o modelo não estava apto a prever o comportamento de fissuração e expansão no concreto.

- *Modelo de Dunant & Scrivener (2010).*

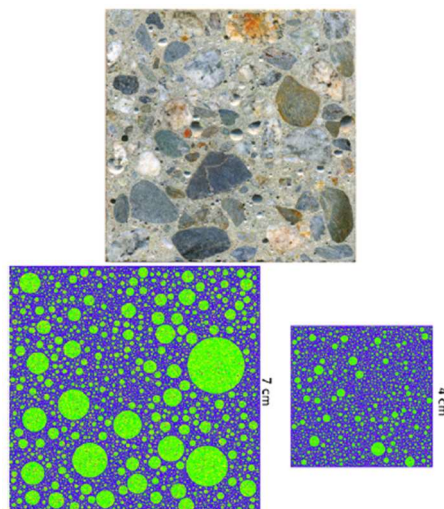
Dunant & Scrivener (2010) utilizaram o método de elementos finitos estendidos (XFEM) para modelar a evolução da estrutura do concreto na escala mesoscópica e macroscópica, ou seja, avaliou as tensões e deformações ocasionadas pela formação do gel da RAS. Para simular a RAS, foi realizado uma distribuição granulométrica, em seguida foi analisado as zonas reativas dos agregados que geraram uma configuração de dados.

Os dados foram representados por uma estrutura de representação discreta conforme Figura 49. Em cada etapa, foram aplicadas condições de contorno e as zonas reativas dos agregados foram expandidas. Os danos causados por esta expansão foram calculados e as propriedades macroscópicas extraídas. O processo foi repetido por um número especificado de etapas.

Para investigar em detalhes os efeitos do ASR na escala, foi necessária uma representação numérica explícita de muitos fatores. Isto implicou em grandes simulações, ou seja, uma seção transversal de barra de argamassa padrão de malha fina de 40 mm×40 mm.



Figura 49 – Concreto simulado (centro) e microestruturas de argamassa (direita), em comparação com uma fatia real (esquerda).



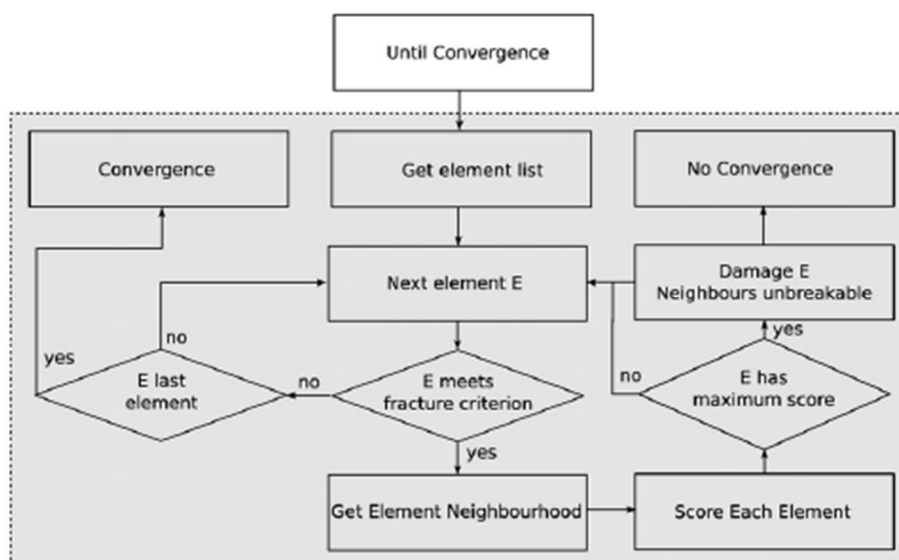
Fonte: Dunant & Scrivener (2010)

Essas simulações foram necessárias, pois a partir delas foram produzidos caminhos de fissuras dentro de agregados que abrangem toda a distribuição granulométrica; a comparação da simulação com os dados experimentais foi direto e, além disso, características tais como o efeito de parede na superfície do molde também foram simuladas. Os agregados esféricos foram utilizados para simplificar.

As propriedades mecânicas da pasta e dos agregados (rigidez, tensão crítica) foram obtidas experimentalmente. A simulação da variabilidade intrínseca da pasta e dos agregados foi importante para estabilizar a propagação da fissura, bem como simular o início da fissura em defeitos locais. Os agregados nas estruturas afetadas pelo ASR apresentaram mineralogias variáveis e, portanto, suas propriedades mecânicas variaram.

Os danos na meso-escala foram induzidos por uma densa rede de fissuras. Devido à multiplicidade dessas rachaduras, deve-se ter um cuidado especial que sua propagação corresponde a um mínimo de energia global. O algoritmo delineado na Fig. 50 garante que este seja o caso, mesmo que múltiplos critérios de fratura e mecanismos de dano coexistem.

Figura 50 - Diagrama de fluxo do algoritmo que determina qual elemento deve ser danificado



Fonte: Dunant & Scrivener (2010)

A observação microscópica de uma ampla gama de agregados mineralogicamente diferentes demonstrou consistentemente a presença de bolsas de gel ASR no agregado. A originalidade do modelo reside no fato de que as bolsas de gel foram consideradas, de modo que os danos nos agregados e na pasta emergem da meso-estrutura diretamente.

O produto da reação foi considerado dentro dos agregados com fases de bolsa de gel aleatoriamente distribuída. O processo de expansão foi simulado pelo crescimento da bolsa de gel. Esse crescimento foi predefinido por uma porcentagem de agregado reagido, ou seja, foi considerado que apenas 3% da partícula tenha reagido e nesse momento a reação foi interrompida para análise.

O modelo destacou o efeito predominante da formação de gel nos agregados e consequentemente analisa o mecanismo de degradação por RAS. O modelo também demonstrou uma robustez para a variação do parâmetro de ajuste e que a perda de propriedades mecânicas pode ser explicada pelo dano induzido pelo gel.

- *Modelo proposto por Pignatelli et al. (2013)*

Pignatelli *et al.* (2013) formularam um modelo baseado na porosidade para determinar os efeitos mecânicos ocasionados no concreto. Foram adotadas duas variáveis internas: o dano químico e o dano mecânico. O dano químico, relacionado à evolução da reação, é causado pela pressão gerada pelo gel da RAS em expansão no concreto. Já o dano mecânico descreve a degradação da resistência e rigidez do concreto, induzidas pelas cargas externas.

O modelo proposto por Pignatelli *et al.* (2013) foi baseado nos modelos de Ulm *et al.* (2000), Poyet *et al.* (2006) e Comi *et al.* (2009), porém esses três últimos modelos mencionados não levaram em consideração a porosidade do concreto. O aprimoramento desses últimos modelos foi realizado por Pignatelli *et al.* (2013) no qual introduziu duas porosidades: a porosidade comum do concreto preenchida pelo gel e uma porosidade adicional devido ao dano químico da RAS. Esta escolha permite a previsão correta do comportamento geral e da pressão interna.

O modelo reproduziu satisfatoriamente o efeito das tensões de confinamento no concreto. Várias melhorias no modelo podem ser realizadas para previsão do comportamento mecânico de estruturas reais de concreto afetadas por RAS.

- *Modelo proposto por Charpin e Ehrlacher (2014).*

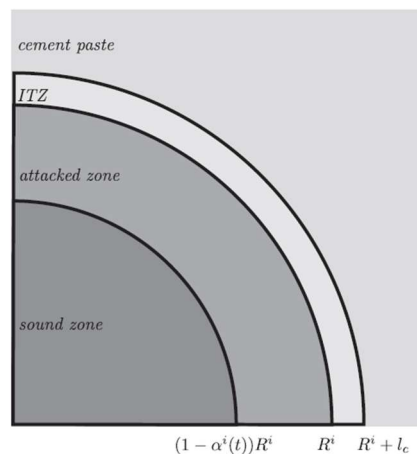
Charpin e Ehrlacher (2014) propuseram um modelo que considera a anisotropia da reação, para avaliar o comportamento expansivo do gel, sem levar em consideração a fluência. Neste modelo o concreto é composto por dois componentes principais: matriz de agregados e pasta de cimento e foram consideradas três fases, sendo: agregados, zona de transição de interface (ZTI) e pasta de cimento, que se comportam elasticamente.

Para simplificar os cálculos, todos os grãos foram considerados esféricos. O grão considerado como uma partícula reativa denominada  $i$  com raio  $R_i$  cuja

existe uma proporção do raio que sofre ataque químico denominado grau de ataque  $\alpha_i(t)$  em função do tempo.

A casca entre os raios  $(1 - \alpha_i(t))R_i$  e  $R_i$  foi denominada de zona de ataque, enquanto a esfera de raio  $(1 - \alpha_i(t))R_i$  foi considerada de zona de sã, no momento  $t$  (Fig. 51). A zona sã tem as propriedades mecânicas de um agregado inerte. Portanto, é tomada como um material isotrópico elástico linear, cujo tensor de rigidez é chamado  $\mathbb{C}_a$ . A zona atacada foi parcialmente dissolvida pelo ataque de íons provenientes da pasta de cimento que pode ser descrito por uma série de grau de ataque.

Figura 5 – Ataque esquemático da RAS no agregado



Fonte: Charpin e Ehrlacher (2014)

O modelo foi elaborado por um conjunto de parâmetros dependentes do tempo  $\alpha_i(t)$ , que representam o grau de ataque para cada local presente na amostra. Após as análises, o segundo parâmetro adotado foi referente a tensão a nível macroscópico, ou seja, carga externa isso constituiu que os deslocamentos foram definidos no limite externo.

No modelo proposto, o principal objetivo foi mostrar que era possível construir modelos simples de reação álcali-silica baseados na micromecânica. Para isso, foi optado por representar o comportamento do concreto contendo agregados de tal modo que a maior parte dos danos ocorresse na interface entre os agregados e a pasta de cimento e na pasta de cimento

Foi considerada a formação do gel na borda do agregado e sua expansão flui para dentro da zona porosa da ZTI. De fato, o modelo avaliou a resposta estrutural da estrutura de uma barragem, mas as suas conclusões vão de acordo com o que foi observado na maioria das análises da literatura. Logo, pode-se supor que o modelo não é capaz de descrever as implicações estruturais da RAA em toda a sua extensão.

- RESUMO DOS MODELOS MATEMÁTICOS BASEADO NA PRODUÇÃO DE GEL (TIPO 2)

Os modelos matemáticos baseados na produção de gel para a reação álcali-silica (RAS) em concreto são uma abordagem interessante para compreender como a interação entre os álcalis presentes no concreto e os agregados reativos resulta na formação de um gel expansivo de sílica, que é responsável pela deterioração do material. Esses modelos se concentram na cinética da reação e na quantidade de gel produzido ao longo do tempo, oferecendo uma visão detalhada do processo de degradação.

Uma das principais vantagens dos modelos baseados na produção de gel é sua capacidade de capturar a relação entre a quantidade de álcalis disponíveis no concreto, a quantidade de sílica nos agregados e a taxa de formação do gel. Isso permite aos engenheiros e pesquisadores prever como diferentes condições de exposição e composições de concreto podem afetar a progressão da RAS ao longo do tempo.

Esses modelos também podem ser úteis para avaliar o desempenho de estratégias de mitigação e controle da RAS, permitindo uma análise mais precisa dos efeitos de medidas preventivas, como o uso de aditivos redutores de álcalis ou a seleção de agregados não reativos.

No entanto, os modelos baseados na produção de gel também têm algumas limitações. Um desafio significativo é a necessidade de determinar parâmetros cinéticos precisos que descrevam a taxa de formação do gel em diferentes

condições. Esses parâmetros podem variar consideravelmente dependendo de fatores como a temperatura, a umidade, a concentração de álcalis e a composição do concreto, o que torna a modelagem da RAS uma tarefa complexa e desafiadora.

Além disso, os modelos baseados na produção de gel muitas vezes simplificam a complexidade do processo de interação álcali-sílica, focando apenas na formação do gel e não levando em consideração outros aspectos importantes, como a influência de outros produtos de reação na expansão do concreto.

Em resumo, os modelos matemáticos baseados na produção de gel são uma ferramenta valiosa para entender e prever a progressão da RAS em concreto. No entanto, sua aplicação eficaz requer uma compreensão detalhada dos mecanismos envolvidos e uma cuidadosa calibração dos parâmetros do modelo para diferentes condições de exposição e composições de concreto. Um resumo dos modelos destacando o tipo e o tipo de variação do gel pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12 - Modelos baseados na produção do gel.

Autor	Tipo de Modelo	Variação de gel
Hobbs (1981)	Fenomenológico	Volume de gel formado
Dunant e Scrivener (2010)	XFEM	Superfície do agregado
Pignatelli <i>et al.</i> (2013)	Químico-poro-mecânico	Massa
Charpin e Ehrlacher (2014)	Químico-poro-mecânico	Volume de gel

Fonte: O autor (2023)

### 5.5.3 Modelos matemáticos de RAS para concreto baseados na expansão do concreto (Tipo 3)

O foco principal desses modelos, está na análise de estruturas de concreto maciço, por exemplo, as barragens. A evolução das tensões, devido aos efeitos da RAS, foi derivada das leis cinéticas com base em princípios termodinâmicos e leis fenomenológicas da reação. Para unir a expansão ocasionada pelo gel ao critério de dano no concreto, foi usado o método dos elementos finitos (MEF)

(ITAM *et al.*, 2019; PESAVENTO *et al.*, 2012; GRYMIN *et al.*, 2017; CAPRA & BOURNAZEL, 1998).

Posteriormente, a cinética foi formulada considerando os aspectos termodinâmicos, ou seja, como a variação da temperatura interfere nas propriedades químico-mecânicas do concreto. Também foi analisado como as condições de contorno do sistema e as condições ambientais interferem no processo de expansão do concreto (KAWABATA *et al.*, 2017; LÉGER *et al.*, 1996; CAPRA & BOURNAZEL, 1998; ULM *et al.*, 2000; SAOUMA & PEROTTI, 2004; WINNICKI *et al.*, 2014; ITAM *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2018).

As leis fenomenológicas adotadas foram para descrever como se dava a evolução da expansão do concreto, devido a todos os efeitos envolvidos no processo. Esses efeitos, tais como temperatura, umidade e tensão foram implementados como funções das leis fenomenológicas.

- *Modelo proposto por Léger et al. (1996)*

Léger *et al.* (1996) desenvolveram um modelo de expansão no qual a expansão do concreto era induzido e dependia do estado de tensão do concreto, da temperatura, da umidade, do teor de álcalis e tipo de agregado. Esta quantidade de parâmetros se deve ao fato da complexidade da reação, desse modo foi proposta uma simulação numérica do efeito expansivo da RAA determinada no decorrer do tempo juntamente com os parâmetros associados aos fatores que influenciam o fenômeno.

A vantagem deste modelo é a permissão do ajuste dos deslocamentos calculados com seus respectivos valores obtidos no sistema de monitoramento de campo. Porém, como desvantagem, o desenvolvimento das deformações é simulado de forma rudimentar na qual utiliza uma analogia de carga térmica fictícia e não há relação entre a realidade física do fenômeno e as deformações.

- *Modelo proposto por Capra & Bournazel (1998)*

O modelo de Capra & Bournazel (1998) teve base na mecânica da fratura e na probabilidade para descrever a expansão anisotrópica do gel em uma estrutura de concreto afetada por RAS. No modelo é necessária a caracterização das fissuras iniciais, feito a partir do valor médio e do desvio padrão.

Esses valores são retirados das imagens de distribuição de fissura. O modelo considerou o concreto com propriedade elástica linear. Foi obtido resultado satisfatório, mas a desvantagem do modelo é a extração do parâmetro pela análise da imagem da massa fissurada, como também, sua complexa formulação de danos.

- *Modelo proposto por Ulm et al. (2000)*

Uma análise do impacto ocasionado pela expansão da RAS na estabilidade da estrutura de concreto foi realizada por Ulm et al. (2000). Os autores, foram um dos primeiros a implementar as descobertas de Larive (1997), o que lhes permitiu começar a descrever a RAA com mais precisão. O autor combinou o problema de difusão de calor e cinética e analisou de forma quantitativa o seu efeito acoplado.

A partir dos micros mecanismos que governam a expansão da RAS, é desenvolvido um modelo quimo-elástico que explica a cinética da RAS destacando como a temperatura desempenha um papel importante no efeito cinético da expansão e a pressão de inchamento exercida pelos produtos da reação no esqueleto. O seu modelo apresenta algumas desvantagens tais como: expansão isotrópica, não acoplou a fluência, utilizou umidade constante.

- *Modelo proposto por Bangert et al. (2004)*

Bangert et al. (2004) apresentaram um modelo que descreveu a deterioração do concreto devido a RAS. O modelo considerou o efeito químico-mecânico juntamente com os conceitos da teoria dos meios porosos. Foi avaliado através



do balanço de massa para avaliar o processo de expansão do gel, caracterizado pela densidade de massa. Baseado no modelo proposto por Bazant e Steffens (2000), o autor divide o processo de modelagem em duas partes.

A primeira parte da modelagem foi realizada em relação à formação do gel e no processo de dissolução dos íons, que englobam os conceitos de difusão. E na segunda parte, na expansão do gel ocasionada pela saturação dos poros por meio da umidade. O modelo descreve bem os aspectos físico-químicos da reação, porém o modelo é bastante complexo.

- *Modelo proposto por Saouma & Perotti (2006)*

Saouma e Perotti (2006) desenvolveram um modelo enraizado na química da reação com foco na cinética e na física no processo de fissuração e no efeito da compressão. Possivelmente esse modelo é o mais importante até hoje. A principal abordagem do modelo é a suposição de uma expansão volumétrica relacionada as tensões internas.

O campo de tensão afeta a cinética da reação, que é uma ligeira modificação de Larive (1997). Os autores focalizaram principalmente o efeito de redistribuição de expansão gerado pelo acoplamento entre o inchaço interno e o estado de tensão do material. O modelo é simples e preciso, e provavelmente por esses motivos que vários modelos após 2006 os referenciam, como ponto inicial. Como desvantagem, pode-se mencionar a simulação em duas dimensões (2D) e não consideram a fluência.

- *Modelo proposto por Pesavento et al. (2012)*

Pesavento *et al.* (2012) adotaram um modelo baseado na mecânica de meios porosos reativos multifásicos, composto por um esqueleto sólido e porosidade capilar. Também adotou a teoria de danos isotrópicos, ou seja, danos em todas as direções, com igual intensidade.

A variável de dano associada à reação química foi derivada ajustando os resultados experimentais em termos de expansão *versus* curva do módulo de Young. A expansão da RAS é modelada como uma deformação imposta, dependendo da temperatura e umidade do material e considera a fase de iniciação da RAS.

- *Modelo proposto por Winnicki et al. (2014)*

Winnicki *et al.* (2014) apresentaram uma abordagem simples em relação aos modelos de Poyet (2003) e Comi *et al.* (2009), porque não considerou a resolução do problema térmico com o acoplamento da modelagem mecânica. Por sua vez, o resultado obtido e as deformações ocasionadas foram usados como dados de entrada para um modelo mecânico.

Também destacou a dependência da cinética da reação em relação às variáveis temperatura e umidade. Assim, a cinética foi denominada como extensão da reação, ou seja, descreve o progresso da RAS ao longo do tempo dependente da temperatura e umidade. A extensão da reação foi considerada como uma variável escalar e o desenvolvimento das tensões induzidas foram considerados como função do tempo, assim foi possível elaborar um modelo químico-plástico.

- *Modelo proposto por Itam & Husain (2015)*

Itam & Husain (2015) propuseram um modelo composto de um material heterogêneo em duas fases: agregados e a matriz cimentícia com poros intersticiais. No modelo foi considerado dois aspectos importantes: a cinética da reação química e os danos mecânicos ocasionados pela expansão.

Foi suposto que os danos a certa temperatura e umidade tenham comportamentos isotrópicos, e assim determinar a extensão da reação local por métodos de integração de Backward, levando em consideração os perfis de umidade e temperatura correspondentes para cada etapa do procedimento numérico.

- *Modelo proposto por Kawabata et al. (2017)*

Kawabata *et al.* (2017) levaram em consideração no seu modelo, a influência da fluência no comportamento expansivo do concreto. Havia a suposição de que a tensão de fluência é adicionada às deformações elásticas, e as deformações induzidas por retração e indução química da RAS.

Foi verificado que o estado de tensão influencia fortemente a expansão anisotrópica. Assim, não há uma expansão uniforme do gel que pode desenvolver mais para uma direção do que para outra. Através dessas análises foi formulado um modelo de dano em função da expansão química.

- *Modelo proposto por Grymin et al. (2017)*

Grymin *et al.* (2017) propuseram um modelo matemático que considera o fenômeno químico-higro-termo-mecânico em meios porosos parcialmente saturados. Este modelo foi baseado na proposta de Pesavento *et al.* (2012) no qual utilizou em escala macroscópica. Nessa nova abordagem Grymin *et al.* (2017) melhoraram o modelo levando em consideração a difusão de álcalis e sua influência no desenvolvimento da reação.

É baseado na mecânica de meios porosos multifásicos e foi validado por comparação com os resultados experimentais, obtendo uma boa concordância entre resultado do modelo e resultado experimental. Usando esta abordagem, é possível levar em consideração a influência da microestrutura do material na difusão do álcali e, portanto, também no desenvolvimento da reação (GRYMIN *et al.*, 2017).

- *Modelo proposto por Ben Li et al. (2018)*

Ben Li *et al.* (2018) propuseram um modelo de expansão que considera a teoria de danos. Teve como objetivo investigar e quantificar as influências da temperatura de cura na expansão devido a RAS. Utilizou diferentes condições experimentais combinado com as concentrações dos elementos (Na e Si). Esses

elementos foram analisados no modelo, baseados nas diferenças de áreas submetidas em diferentes temperaturas.

Assim, foram produzidos mapas de cores bidimensionais onde cada cor representava diferentes valores e propriedades do elemento. A expansão proposta na pesquisa foi comparada com os resultados da análise do modelo de Suwito *et al.* (2002) e Multon *et al.* (2009). Os resultados indicaram que o aumento da temperatura de cura reduziu a expansão da pasta de cimento.

- *Modelo proposto por Itam et al. (2019)*

O modelo de Itam *et al.* (2019) consiste em prever o comportamento físico e químico da estrutura de concreto sob a influência da RAS. O modelo realiza uma simulação numérica da anisotropia das tensões, ou seja, tensão com intensidades diferentes no meio de propagação do gel ocasionada pela RAS.

Leva em consideração a ativação térmica da reação, e sua dependência com a umidade. O modelo foi testado em uma barragem de concreto. Os efeitos da temperatura, umidade relativa e carregamento mecânicos foram testados isolados e combinados.

- RESUMO DOS MODELOS MATEMÁTICOS BASEADO NA EXPANSÃO DO CONCRETO (TIPO 3)

Os modelos matemáticos baseados na expansão do concreto para a reação álcali-sílica (RAS) são uma abordagem importante para compreender os efeitos da expansão do gel de sílica nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. Esses modelos buscam descrever como a formação e a expansão do gel de sílica dentro da matriz de concreto afetam seu volume e suas características estruturais ao longo do tempo.

Uma das principais vantagens dos modelos baseados na expansão do concreto é sua capacidade de fornecer uma representação direta dos efeitos da RAS na integridade estrutural do concreto. Eles permitem aos engenheiros prever como

a expansão do gel pode levar a fissuras, deformações e perda de resistência ao longo da vida útil do material, ajudando assim na tomada de decisões relacionadas ao projeto, manutenção e reabilitação de estruturas de concreto.

Além disso, esses modelos podem ser utilizados para avaliar a eficácia de medidas de mitigação e controle da RAS, permitindo uma análise detalhada dos efeitos de estratégias como o uso de aditivos redutores de álcalis, a seleção de agregados não reativos e a aplicação de revestimentos de proteção.

No entanto, os modelos baseados na expansão do concreto também apresentam algumas limitações e desafios. Um dos principais desafios é a complexidade dos processos envolvidos na expansão do gel de sílica e sua interação com a matriz de concreto. Modelar com precisão esses processos requer uma compreensão detalhada dos mecanismos físicos e químicos envolvidos, bem como a consideração de uma série de variáveis, como a composição do concreto, as condições ambientais e a geometria da estrutura.

Além disso, os modelos baseados na expansão do concreto muitas vezes dependem de parâmetros empíricos que podem variar dependendo das características específicas do concreto e do ambiente de exposição. Isso pode limitar sua aplicabilidade em diferentes situações sem uma calibração adequada. Outra limitação é que esses modelos tendem a se concentrar principalmente nos efeitos imediatos da expansão do gel de sílica, sem considerar adequadamente os efeitos de longo prazo, como a progressão das fissuras e a deterioração contínua da estrutura ao longo do tempo.

Em resumo, os modelos matemáticos baseados na expansão do concreto são uma ferramenta valiosa para entender e prever os efeitos da RAS na integridade estrutural do concreto. No entanto, sua aplicação eficaz requer uma compreensão detalhada dos mecanismos envolvidos, uma cuidadosa calibração dos parâmetros do modelo e considerações sobre suas limitações e incertezas. Um resumo dos modelos destacando o tipo de modelo e a expansão dependente dos parâmetros encontra-se exposto na Tabela 13.

Tabela 13 - Modelos baseado na expansão do concreto

Autor	Tipo de Modelo	* Fatores
Léger <i>et al.</i> (1996)	Fenomenológico	TP, T, U, R
Capra e Bournazel (1998)	Fenomenológico e Probabilístico	TP, T, U, R
Ulm <i>et al.</i> (2000)	Termoquímico	TP
Bangert <i>et al.</i> (2004)	Termo-higro-químico-mecânica	TP, U
Saouma e Perotti (2006)	Termo-higro-químico	TP, T, U
Pesavento <i>et al.</i> (2012)	Termo-hidro-químico-mecânico	T, U
Winnicki <i>et al.</i> (2014)	Termo-higro-químico	TP, T, U
Itam <i>et al.</i> (2015)	Termo-químico-hidro-mecânico	TP, T, U
Kawabata <i>et al.</i> (2017)	Químico-mecânico	TP, T, U
Grymin <i>et al.</i> (2017)	Termo-químico-higro-mecânico	TP, T
Ben Li <i>et al.</i> (2018)	Micro-mecânico	TP, T, U, R
Itam <i>et al.</i> (2019)	Termo-químico-higro-mecânico	U, R

\* Que influenciam na expansão: (TP) Temperatura; (T) Tensão; (U) Umidade; e, (R) Reatividade.

Fonte: O autor (2023)

#### 5.5.4 Modelos matemáticos de RAS para concreto baseados na pressão interna (Tipo 4)

Com a evolução das pesquisas, as observações microscópicas da RAS, demonstraram um vínculo entre a pressão interna (Tipo 4), ocasionada pela expansão do gel, e o comportamento do concreto. O concreto foi considerado um material heterogêneo composto por agregado, pasta de cimento e em alguns modelos contendo uma zona porosa.

Os modelos foram desenvolvidos para entender os efeitos do fenômeno da RAS no comportamento do concreto. A complexidade da pressão do gel foi simplificada como pressão hidráulica dos poros, e o micro comportamento das fases fluida e sólida traduzidos em relações constitutivas, nos modelos micro-poro-mecânico.

- *Modelo proposto por Nielsen et al. (1993)*

Nielsen *et al.* (1993) desenvolveram um trabalho que analisa as tensões e deformações em estrutura de concreto armado no decorrer do tempo. O modelo, além de ser capaz de determinar as tensões e deformações no concreto, está acoplado com um programa computacional capaz de calcular o fluxo de umidade que influencia desenvolvimento da RAS.

O cálculo leva em consideração as dimensões da estrutura, qualidade do concreto, o conteúdo de sílica reativa e fator ambiente. O autor mostrou que as trincas eram desenvolvidas localmente ao redor das partículas reagentes.

- *Modelo proposto por Bazant & Steffens (2000)*

Bazant e Steffens (2000) destacaram o mecanismo de difusão e expansão. Dando continuidade ao modelo anterior, Bazant *et al.* (2000) realizaram uma abordagem mecanicista incorporando a mecânica da fratura para prever o pior diâmetro do agregado.

No modelo foi estabelecido uma matriz cúbica contendo uma única partícula esférica do agregado na matriz cimentícia. A pressão interna induzida pelo gel expansivo foi considerada como uma carga interna. O enfoque principal do modelo foi identificar o tamanho do agregado que ocasionava a máxima expansão do concreto.

- *Modelo proposto por Dormieux et al. (2004)*

Dormieux *et al.* (2004) consideraram a porosidade no concreto para processo de modelagem. Essa zona porosa é preenchida com o gel expansivo formado, confinado em uma matriz sólida que representava o esqueleto do concreto. As equações de estados e características mecânicas foram avaliadas analiticamente, o fenômeno da RAS foi simulado por meio de fissuras crescentes nas proximidades dos agregados, que não foram explicitamente consideradas. A teoria cinética foi abordada para vincular a produção em massa de gel e o processo de dano.

Os autores mostraram que a livre expansão do concreto é resultado da propagação de fissuras após o espaço poroso ficar completamente preenchido. Portanto, a tensão interna ocasionada pela pressão do gel se dá após o preenchimento dos poros, ou seja, a expansão do concreto está diretamente relacionada ao preenchimento da porosidade inicial. Como ponto negativo, o

modelo tem bastante parâmetros e análises complexas tornando o modelo robusto.

- *Modelo proposto por Comby-Peyrot et al. (2009).*

Comby-Peyrot *et al.* (2009) consideraram a heterogeneidade do concreto. Utilizaram elementos finitos na elaboração de uma estrutura tridimensional de concreto no qual era composta de duas fases. O método consistiu em colocar os agregados um por um e que cumprisse com as seguintes exigências:

- A localização dos agregados tinha que ser selecionada aleatoriamente;
- A distribuição dos agregados tinha que ser relativamente uniforme;
- Alguns aspectos físicos, por exemplo, espessura máxima de pasta foi levado em conta.

A espessura máxima da pasta é a distância média entre dois agregados que estão em contato durante o empilhamento a seco do material. Após a fixação do cimento, estes agregados foram circundados por uma camada de pasta. Esta distância agiu como uma distância de exclusão entre os maiores agregados. A espessura da pasta, notada aqui "I", é proporcional ao diâmetro do agregado, conforme equação

$$I = d_{max} \left( \sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right)$$

Onde

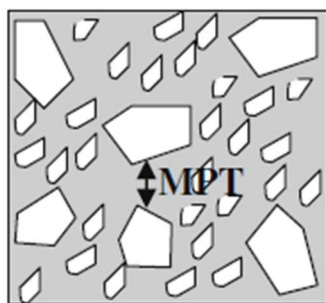
$d_{max}$  – É o tamanho máximo dos agregados;

$g$  – É o volume de agregados em uma amostra de concreto;

$g^*$  – É a concentração máxima de agregados (mostrado na Figura 52).



Figura 52 – O concreto definido como um empilhamento seco injetado com a pasta de argamassa.



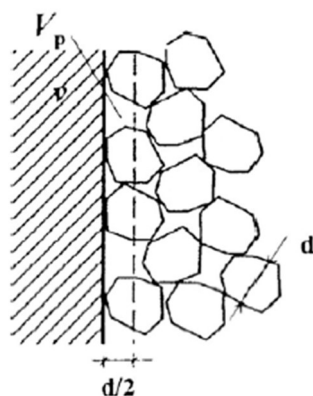
Fonte: Comby-Peyrot *et al.* (2009)

Para o cálculo da concentração máxima  $g^*$ , foi utilizado uma formula diferente que depende da forma dos agregados conforme equação a seguir:

$$g^* = 1 - 0,47 \left( \frac{d_{min}}{d_{max}} \right)^{0,22}$$

Em que o  $d_{min}$  é o tamanho mínimo dos agregados. O efeito de borda implica que o conteúdo de agregados é menos importante perto das faces de uma amostra de concreto. Foi considerado um volume localizado entre a borda e a distância  $d/2$  (chamado de VP), onde  $d$  é o considerado diâmetro agregado, a compacidade em VP é menor do que a compacidade a no centro da amostra conforme Figura 53.

Figura 53 – Efeito de fixação da parede em um empilhamento de grãos de tamanho único



Fonte: Comby-Peyrot *et al.* (2009)

As propriedades tanto dos agregados quanto da pasta de cimento foram consideradas na modelagem. Numa primeira abordagem, se assumiu que os agregados são puramente elásticos. Foi suposto que a argamassa era um material elástico danificado. Assim, a modelagem analisou a modificação do comportamento elástico do material com uma variável de dano escalar que afeta a rigidez.

A variável de dano, notado  $D$ , é o indicador que afeta a rigidez do material.  $D$  inclui os danos devidos, tanto a compressão como a tensão; seu valor varia de 0 (para material sem fissura) a 1 (para material fissurado). A variação de  $D$  era governada pela tensão equivalente  $\check{\varepsilon}$ .

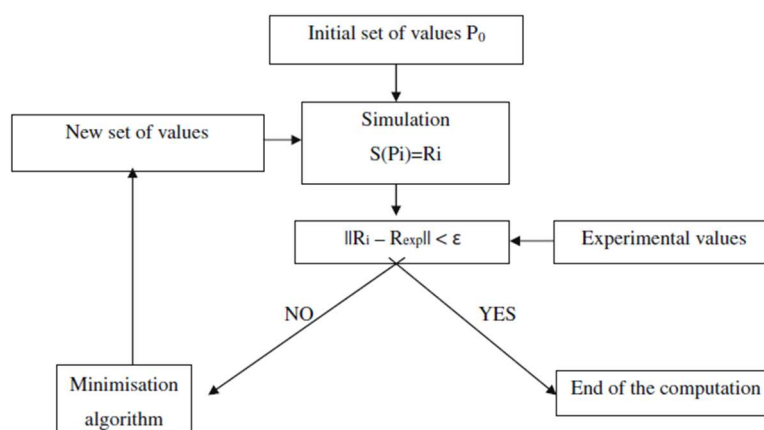
$$\check{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle \varepsilon_i \rangle_+^2}$$

Onde,  $\langle \dots \rangle_+^2$  é a parte positiva ( $\langle \varepsilon_i \rangle_+ = \frac{\varepsilon_i + |\varepsilon_i|}{2}$ ) e  $(\varepsilon_i)_{i \in [1,3]}$  é o principal componente da deformação. Foi introduzido um dano evolutivo  $k$  no modelo que depende da variável  $D$ . Para um determinado estado de dano o modelo é dado pela seguinte equação:

$$f(\varepsilon, D) = \check{\varepsilon} - K(D)$$

No estudo foi desenvolvida uma ferramenta de análise inversa, chamada de RheoConcrete. O processo de identificação permitiu encontrar uma boa aproximação dos valores numéricos. Foi baseado em dados experimentais que foram comparados com os numéricos. Em cada simulação foi usado um critério para estimar se era necessário melhorar a precisão dos parâmetros numéricos. A Figura 54 resume o procedimento.

Figura 54 – Fluxograma de análise inversa do modelo



Fonte: Comby-Peyrot *et al.* (2009)

O modelo de Comby-Peyrot *et al.* (2009) consideraram o comportamento do agregado como elástico linear e da pasta de cimento como elástico não linear. Como ponto positivo, pode-se inferir que modelo simula com certa precisão a distribuição de trincas e a degradação química do concreto é um modelo mais robusto do que as abordagens deterministas comuns

- *Modelo proposto por Charpin & Ehrlacher (2014)*

Charpin e Ehrlacher (2014) propuseram um modelo para simular a expansão em condições livres de tensão e sob carga. Esposito e Hendriks (2016) também propuseram um modelo para prever o comportamento não linear de concreto de forma analítica sujeita a compressão uniaxial e teste de tensão. Tem base na teoria mecânica da fratura, e na pressão baseada na teoria de micro poros desenvolvidos por Dormieu *et al.* (2004).

No modelo o concreto é considerado como material heterogêneo, ou seja, agregado imerso na pasta de cimento. A microestrutura foi composta por trincas embutidas em uma matriz sólida formada por agregados e pasta de cimento. A abordagem resultou em um modelo tridimensional, que visa caracterizar a deterioração macroscópica do concreto submetido a qualquer combinação de cargas externas e internas.

- *Modelo proposto por Shagan Li et al. (2020)*

Shagang Li *et al.* (2020) propuseram um modelo para descrever a degradação da resistência à flexão induzida por RAS. O processo de dano da RAS foi representado pela propagação de trincas neste modelo. A condição não drenada das fissuras foi considerada para o efeito de enchimento dos géis da RAS.

De acordo com a heterogeneidade da argamassa em diferentes escalas, a microestrutura é dividida em quatro níveis básicos de acordo com Ulm *et al.* (2004). Para validar este modelo, o foi testada a resistência da argamassa totalmente imersa em soluções de NaOH a 5% e 10%. Os cálculos mostraram boa concordância com os resultados experimentais.

- RESUMO DOS MODELOS MATEMÁTICOS BASEADO NA PRESSÃO INTERNA (TIPO 4)

Os modelos matemáticos baseados na pressão interna para a reação álcali-sílica (RAS) em concreto são uma abordagem interessante para compreender os efeitos mecânicos da expansão do gel de sílica dentro da matriz de concreto. Esses modelos se concentram na quantificação da pressão gerada pelo gel de sílica à medida que ele se expande, o que pode levar a fissuras, deformações e perda de resistência no concreto.

Uma das principais vantagens dos modelos baseados na pressão interna é sua capacidade de fornecer uma representação direta dos efeitos mecânicos da RAS. Eles permitem aos engenheiros e pesquisadores prever como a expansão do gel de sílica pode afetar a integridade estrutural do concreto, facilitando assim a tomada de decisões relacionadas ao projeto, manutenção e reabilitação de estruturas de concreto.

Esses modelos também podem ser úteis para avaliar a eficácia de medidas de mitigação e controle da RAS, permitindo uma análise detalhada dos efeitos de estratégias como o uso de aditivos redutores de álcalis, a seleção de agregados não reativos e a aplicação de revestimentos de proteção.

No entanto, os modelos baseados na pressão interna também apresentam algumas limitações e desafios. Um dos principais desafios é a complexidade dos processos envolvidos na expansão do gel de sílica e sua interação com a matriz de concreto. Modelar com precisão esses processos requer uma compreensão detalhada dos mecanismos físicos e químicos envolvidos, bem como a consideração de uma série de variáveis, como a composição do concreto, as condições ambientais e a geometria da estrutura.

Além disso, esses modelos muitas vezes dependem de parâmetros empíricos que podem variar dependendo das características específicas do concreto e do ambiente de exposição. Isso pode limitar sua aplicabilidade em diferentes situações sem uma calibração adequada.

Outra limitação é que esses modelos tendem a se concentrar principalmente nos efeitos mecânicos imediatos da expansão do gel de sílica, sem considerar adequadamente os efeitos de longo prazo, como a progressão das fissuras e a deterioração contínua da estrutura ao longo do tempo.

Em resumo, os modelos matemáticos baseados na pressão interna são uma ferramenta valiosa para entender e prever os efeitos mecânicos da RAS na integridade estrutural do concreto. No entanto, sua aplicação eficaz requer uma compreensão detalhada dos mecanismos envolvidos, uma cuidadosa calibração dos parâmetros do modelo e considerações sobre suas limitações e incertezas. Um resumo dos modelos destacando o tipo de modelo e o efeito da pressão pode ser visto na Tabela 14.

Tabela 14 - Modelos baseado na pressão interna.

<b>Autor</b>	<b>Tipo de Modelo</b>	<b>Pressão</b>
Nielsen <i>et al.</i> (1993)	Geométrico	Pressão
Bazant <i>et al.</i> (2000)	Mecânico	Pressão no agregado
Dormieux <i>et al.</i> (2004)	Químico-poro-mecânico	Pressão no poro
Comby-Peyrot <i>et al.</i> (2009)	Fenomenológico	Pressão no agregado

Esposito e Hendriks (2016)	Químico-poro-mecânico	Pressão
Shagang Li <i>et al.</i> (2020)	Micro-poro-mecânica	Pressão no poro
Fonte: O autor (2023)		

### 5.5.5 RESUMO

Ao longo dos anos, observa-se um avanço significativo e diversificado nas pesquisas sobre a reação álcali-sílica (RAS). Cada modelo desenvolvido visa atender à necessidade de compreender o sistema de reação e seu impacto deteriorativo no concreto (Esposito & Hendriks, 2019; Carles-Gibergues & Hornain, 2014; Pan et al., 2012; Saouma & Xi, 2004; Gomes, 2017).

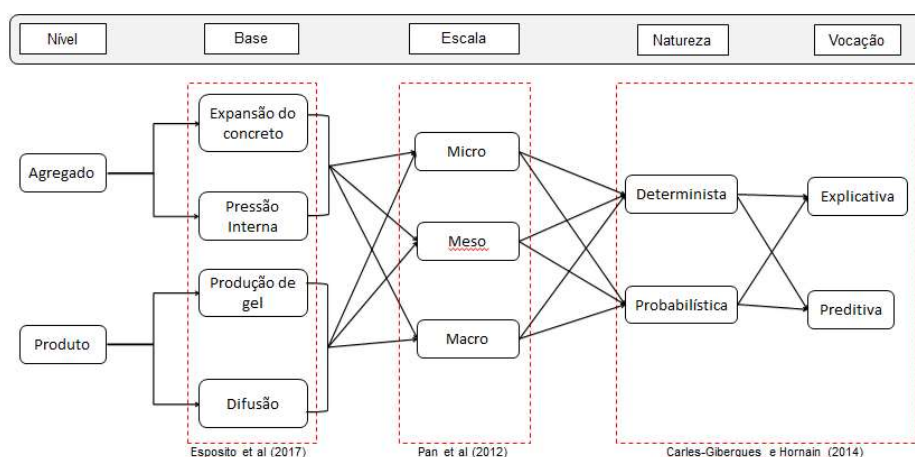
A heterogeneidade dos modelos matemáticos para a RAS, abordando aspectos como pressão interna, difusão, expansão e produção de gel, reflete a complexidade do fenômeno e as múltiplas perspectivas de pesquisa e desenvolvimento na área. Embora cada abordagem apresente vantagens e desvantagens específicas, essa diversidade pode apresentar desafios e incertezas para engenheiros e pesquisadores que buscam entender e prever o comportamento da RAS em diferentes cenários.

Uma das questões principais relacionadas à diversidade dos modelos é a ausência de consenso sobre a abordagem mais precisa para representar a RAS. Cada tipo de modelo possui suas limitações e simplificações intrínsecas, o que pode resultar em resultados discrepantes e dificultar a comparação entre estudos, bem como a aplicação prática dos resultados.

Por exemplo, enquanto os modelos baseados na difusão se concentram nos processos de transporte de íons alcalinos e reativos dentro da matriz de concreto, podem não ser capazes de capturar completamente os efeitos mecânicos da expansão do gel de sílica. Já os modelos que consideram a expansão do gel e a pressão interna podem oferecer uma representação mais direta dos efeitos mecânicos da RAS, porém podem simplificar excessivamente os processos de transporte e reação química envolvidos.

Ademais, a formulação dos modelos matemáticos frequentemente segue a caracterização esquemática apresentada na Figura 55. Essa esquematização pode servir de guia tanto para o desenvolvimento de novos modelos matemáticos de RAS para concreto, quanto para o aprimoramento dos modelos já existentes.

Figura 55 – Esquematização das classificações dos modelos matemáticos para RAS.



Fonte: O autor (2023)

Verificou-se, que a modelagem de RAS e da expansão resultante são necessárias para se obter uma previsão relevante da resposta estrutural dos elementos danificados. Desta forma, os modelos devem levar em consideração os aspectos químicos e físicos, para serem eficientes e confiáveis (MULTON *et al.*, 2009).

A crescente taxa de pesquisa sobre RAS no mundo se dá pelo alto índices de casos, como também, a necessidade de desenvolver modelos numéricos capaz de analisar os problemas relacionados ao dano no concreto, o que se tornou um ponto crucial nas investigações sobre o fenômeno.

A heterogeneidade desses modelos para RAS dificulta analisar tendencias. Os modelos podem variar em escala, parâmetros de entrada e saída, variação na fenomenologia da reação (HIRCHE & WOLF, 1974; HOBBS, 1981; SVENSON, 1991; LÉGER *et al.*, 1996; CARPRA & BOURNAZEL, 1998; COMBY-PEYROT *et al.*, 2009), entre outros. Embora o caráter heterogêneo pode-se agrupar os artigos em seis grupos distintos conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Tabela de caracterização da heterogeneidade dos modelos

<b>Legenda</b>		
Modelo escala micro	QM	Químico-mecânico
	QTM	Químio-termo-mecânico
	TQHM	Termo-químio-higro-mecânico
Modelo escala meso e macro	MPM	Micro-poro-mecânico
	MM	Micro-mecânico
	McroM	Macro-mecânico

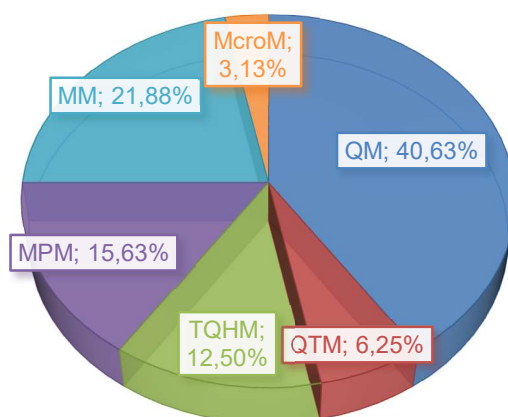
Fonte: O autor (2023)

Observa-se na Tabela três padrões de modelos na escala microscópica e três padrões de modelos nas escalas mesoscópicas e macroscópica. Comparado as padronizações estabelecidas por Esposito e Hendriks (2016) tem-se que o modelo QM trata de difusão de íons e cinética Esposito e Hendriks (2016) reportam modelagem baseada no mecanismo de difusão; o modelo QTM e TQHM trata do processo de expansão do gel reportado por Esposito e Hendriks (2016) como modelagem baseada na expansão do concreto; o modelo MPM, MM e McroM tratam da pressão no agregado, no poro e na pasta de cimento reportado por Esposito e Hendriks (2016) modelagem baseada na pressão interna e por fim alguns QM trata da variação do gel tanto em massa como em volume reportado por Esposito e Hendriks (2016) modelagem baseada na produção de gel.

Dentre os modelos observou-se que 43,63% foi composto por modelos QM, 21,88% são modelos MM e 15,63% os modelos MPM que junto totalizam 81,14% dos artigos publicados conforme Gráfico 2. Essa tendência está correlacionada a uma ligação entre alterações microestruturais e propriedades mecânicas constatada por Ben Haha (2006) em seus estudos, como também por envolver processo difusivo, cinética e alguns desses modelos baseados na produção de gel no qual tem caráter hidrofílico, assim na presença de umidade pode expandir, gerando fissurações e deslocamentos, sendo capazes de comprometer as estruturas de concreto (Hasparyk, 2005; FERRARIS, 2000).



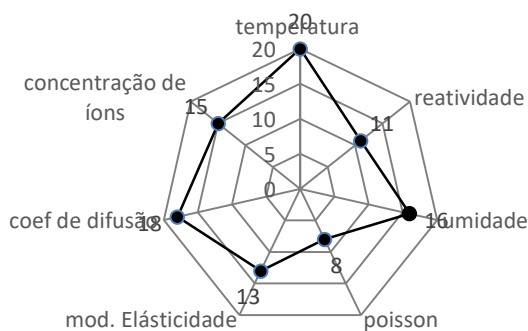
Gráfico 2 – Tendência dos padrões de publicação dos modelos



Fonte: O autor (2023)

Na análise dos inputs de entrada dos modelos percebe-se claramente a heterogeneidade, que variam de propriedades intrínsecas do concreto a condições externas em que são expostas as estruturas de concreto. De forma geral, foi analisado os dados de entrada mais usados nos modelos, sendo eles relacionados às propriedades mecânicas, composição física e química do concreto, conforme Gráfico 3.

Gráfico 3 - Dados de entrada mais usados nos modelos



Fonte: O autor (2023)

Ao analisar o Gráfico 3, nota-se que o parâmetro mais utilizado nos modelos é a temperatura, como demonstrado em diversos estudos que a temperatura afeta

a cinética da reação e consequentemente ocasiona um aumento de expansão no concreto (PAULON, 1981; LARIVE, 1997; ITAM et al., 2019).

Percebe-se que a temperatura tem um efeito direto no processo de reação, e que sua influência acelera a taxa de formação do gel expansivo. Esse aumento na taxa de produção está correlacionado com a velocidade da reação, que é aumentada pelo fator temperatura, ou seja, para incremento de temperatura haverá um aumento na velocidade da reação que por consequência acarretará uma maior produção de gel.

Essa tendência, observada em vários estudos (PAULON, 1981; LARIVE, 1997; ITAM et al., 2019), possibilitou modelar essa taxa de produção de gel nos modelos matemáticos, a fim de correlacionar taxa de produção de gel e expansão (HOBBS, 1981; DUNANT & SCRIVENER, 2010; PIGNATELLI et al., 2013; CHARPIN & EHRLACHER, 2014) desta forma, os modelos convergiam para o comportamento real das estruturas afetadas por RAS.

Em seguida tem o coeficiente de difusão, que acoplado ao processo difusivo no modelo tenta esclarecer o motivo pela qual a reação química leva a formação de produto expansível. Os coeficientes de difusão foram acoplados aos modelos para descrever o fluxo de íons e de água, considerando a difusão e expansão do gel (HIRCHE & WOLFF, 1974; SVENSSON, 1991; BAZANT & STEFFENS, 2000).

Posteriormente, este modelo foi vinculado aos modelos de danos existentes para analisar a interação entre o processo da RAS e o comportamento mecânico do concreto (SUWITO et al., 2002; POYET et al., 2007; MULTON et al., 2009). Recentemente, os modelos referentes ao produto da reação foram aprimorados de acordo com o desenvolvimento dos modelos de difusão-reação, a fim de simular o processo químico, a formação dos produtos de reação e sua expansão (ALLAHYARI et al., 2020; BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, 2017; RAHMAN & LU, 2019).

O terceiro parâmetro mais utilizado foi a umidade, pois é um dos requisitos para ocorrência de RAS confirmada em diversos estudos. Carpra et al. (1995) apud Lopes (2004) relata que a umidade deve ser aproximadamente 85% para que a

RAA se desencadeie. Outro ponto importante é referente ao duplo papel da umidade no processo da RAS, primeiramente como transportador de cátions alcalinos e de íons hidroxilas e em segundo momento como agente intumescente do gel (ITAM et al.,2019).

É indiscutível que a umidade tem influência no processo expansivo, tanto que, para os modelos químicos e químico-mecânico é uma variável independente é que pode ser avaliada em intervalos, sendo este intervalo, o limite considerado prejudicial para a ocorrência da RAS conforme verificado por Swamy (1992). O intervalo pode variar de 50% a 100% de umidade, em que, umidade a partir de 50% foi constatado início de expansões mínimas, e umidade superior a 80%, com expansões significativas. Desta forma, o processo expansivo pode ser analisado em intervalos significantes de teor de umidade, e assim, ser analisado o comportamento expansivo frente a essas taxas.

Os demais parâmetros foram concentração de íons, módulo de elasticidade reatividade do agregado e Poisson em menor número nos modelos, mas ainda assim sendo parâmetros necessários para algumas das simulações. Com o entendimento mais refinado sobre o mecanismo de reação e suas consequências, os modelos foram adquirindo mais robustez.

Devido ao atrelamento de fatores internos (composição química do concreto) e externos (condições ambientais), como também a dificuldade do entendimento do mecanismo de reação, a modelagem da RAS em estrutura de concreto se torna complexa (PIGNATELLI, 2012). Neste cenário, observa-se a prática de aprimoramento de modelos matemáticos de RAS para concreto já existente, como compilado na Tabela 15.

Tabela 16 - Evolução dos modelos matemáticos para RAS com base em aprimorando modelos já existentes.

Autor e ano do modelo de base	Autor e ano do modelo de evolução	Fragilidade do modelo base	Acoplamento de melhoria no modelo base	Modelo matemático para RAS
Bazant e Steffens (2000)	Bazante et al. (2000)	Simplificações acerca do crescimento do gel radial da camada esférica	Uso da mecânica da fratura	Tipo 1 e 4

Suwito <i>et al.</i> (1999) apud Suwito <i>et al.</i> (2002)	Suwito <i>et al.</i> (2002); Xi e Suwito (2002)	Caracterização de parâmetros que potencializam a expansão	Considera o efeito químico-mecânico, distribuição granulométrica do agregado e características macroestruturais do concreto.  Adotou a teoria dos meios porosos, e o balanço de massa para avaliar o processo de expansão do gel. Dividiu o processo de modelagem em duas partes: formação do gel e expansão do gel.	Tipo 1
Bazant e Steffens (2000)	Bangert <i>et al.</i> (2004)	Simplificações acerca do crescimento do gel radial da camada esférica	Suposição de uma expansão volumétrica relacionada ao tensor de tensão, e o campo de tensão afeta a cinética.	Tipo 1 e 3
Larive (1997)	Saouma e Perotti (2006)	Cinética da reação	Considerou o efeito cinético da reação, e assumiu que o gel formado está na borda do agregado. A difusão foi acoplada no modelo.	Tipo 3
Dent Glasser e Kataoka (1981)	Poyet <i>et al.</i> (2007)	Modelo da mecânica da reação e transporte dos íons sódio e cálcio nos agregados.	Baseado na porosidade para determinar os efeitos mecânicos ocasionados no concreto	Tipo 1
Ulm <i>et al.</i> (2000), Poyet <i>et al.</i> (2006) e Comi <i>et al.</i> (2009)	Pignatelli <i>et al.</i> (2013)	Não levou em consideração a porosidade do concreto	Considera a interação entre agregado reativo (difusão e cinética) e concreto (tensões e deformações). O modelo foi baseado no processo de difusão e fluência, combinado com o modelo de microplano.	Tipo 2
Bazant e Steffens (2000)	Bazant e Rahimi-Aghdam (2016)	Simplificações acerca do crescimento do gel radial da camada esférica	Adotou no modelo a teoria mecânica da fratura e pressão, com base na teoria de micro poros.	Tipo 1
Dormieux et al. (2004)	Esposito e Hendriks (2016)	Adotou a teoria de micro poros na modelagem	Considerou a difusão de álcalis e sua influência no desenvolvimento da reação	Tipo 4
Pesavento et al. (2012)	Grymin et al. (2017)	Modelo baseado na mecânica de meios porosos, sem considerar a influência dos álcalis.		Tipo 3

Fonte: O autor (2023)

Com base nos dados apresentados na Tabela 16, fica claro que os novos modelos estão promovendo melhorias nos modelos já estabelecidos. Esse avanço provavelmente se deve a dois principais fatores. Primeiramente, o investimento de tempo, recursos financeiros e esforços laboratoriais na pesquisa inicial, que serviram como base para o desenvolvimento dos modelos originais, tem contribuído significativamente para a análise da RAS. Em segundo lugar, a

complexidade envolvida no processo de iniciar uma nova modelagem impulsiona a melhoria contínua dos modelos existentes.

É notável que a matemática utilizada para aprimorar esses novos modelos esteja se tornando cada vez mais sofisticada. Isso resulta em modelos mais robustos, demandando uma maior necessidade de ajustes nos parâmetros para garantir sua precisão.

Além disso, a diversidade de modelos pode representar um desafio na transferência de conhecimento entre diferentes áreas de pesquisa e na aplicação prática dos resultados. Por exemplo, um modelo desenvolvido para prever a progressão da RAS em um ambiente laboratorial pode não ser diretamente aplicável em condições de campo, devido às variações nas condições ambientais e nas propriedades do concreto.

Outro desafio associado à heterogeneidade dos modelos é a interpretação e validação dos resultados. Como diferentes modelos podem produzir resultados discrepantes com base em suposições e parâmetros variáveis, pode ser complicado determinar qual modelo é mais confiável e preciso em uma determinada situação. Isso pode resultar em incertezas na tomada de decisões relacionadas ao projeto, manutenção e reabilitação de estruturas de concreto sujeitas à RAS.

Em resumo, a diversidade de modelos matemáticos para a RAS reflete a complexidade do fenômeno e o progresso contínuo na área. No entanto, essa diversidade também apresenta desafios em termos de interpretação, validação e aplicação dos resultados. Uma abordagem integrada, que combine diferentes tipos de modelos e leve em consideração uma variedade de condições e cenários, pode ser necessária para uma compreensão abrangente e precisa da RAS e suas implicações para as estruturas de concreto.

## **5.6 Evolução das técnicas computacionais empregadas nos modelos de RAS para concreto, equações preditivas, variáveis dependentes e variáveis independentes**

Os modelos matemáticos foram sendo implementados ao longo dos anos, devido à sofisticação das técnicas matemáticas e computacionais, tornando-os mais robustos e complexos.

Os modelos paramétricos e analíticos foram sendo modelados com base no método dos elementos finitos, tornando capazes de analisar o efeito da reação gradativamente, ou seja, ponto a ponto em uma malha discretizada. Dessa forma, a utilização de software foi acrescida conforme a robustez dos modelos em elementos finitos. A Figura 56 demonstra uma linha do tempo referente aos softwares utilizados nos artigos selecionados nesta pesquisa.

A utilização dos softwares possibilitou resolução mais rápida e precisa dos modelos. Analisando a Figura 56, percebe-se a utilização dos softwares para elementos finitos, sendo eles: FORGE 3 utilizado por Comby-Peyrot (2009), FORTRAN adotado para a análise do modelo de Pignatelli *et al.* (2013) e o STOCHASTIC, que possibilita uma abordagem probabilística no modelo, foi utilizado por Itam *et al.* (2019). O software RGIB foi utilizado para criar o algoritmo de cálculo e realizar análises numéricas no modelo de Kawabata (2017).

Diferente dos outros algoritmos, as redes neurais artificiais têm um caráter de aprendizado durante o desenvolvimento das informações. É composta por várias unidades de processamento bastante simples, tornando o software MATLAB uma forte ferramenta para análise (ALLAHYARI *et al.*, 2020).

Os demais artigos de 1974 – 2006 selecionados nesta pesquisa, não mencionam o uso de softwares. De 2006-2012, alguns autores mencionam uso de software para análise em elementos finitos, porém não especificam qual software está sendo usado (PESAVENTO *et al.*, 2012; DUNANT & SCRIVENER, 2010). Já outros autores nem mencionam o uso de software (ESPOSITO & HENDRIKS, 2016; SAOUMA & PEROTTI, 2006; CHAROIN & EHRLACHER, 2014). A não

especificação desse software prejudica uma análise acerca dos softwares que estão sendo mais utilizando no meio científico, para análise e simulação dos modelos.

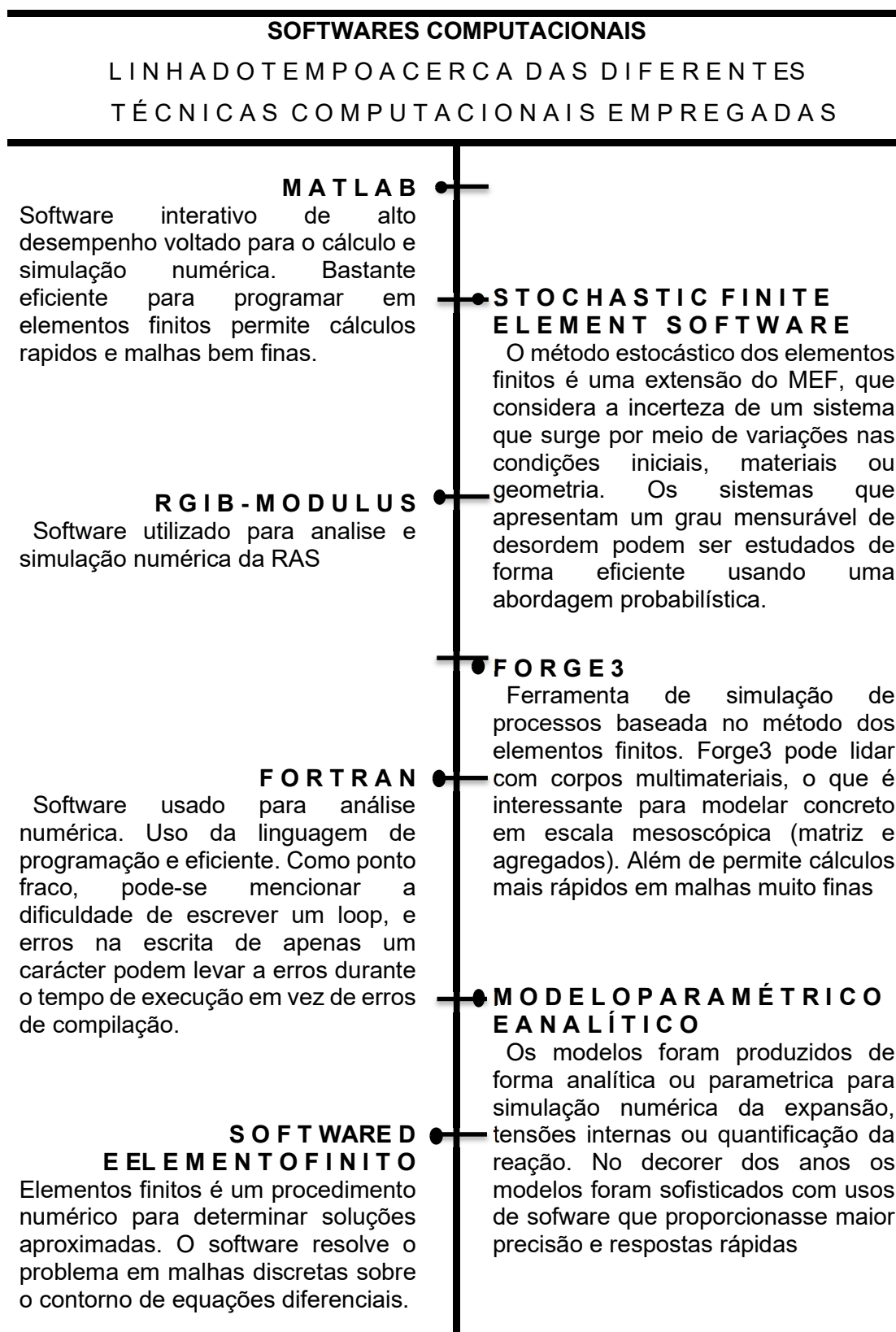
Alguns desses modelos poderão ser compilados conforme Tabela 17. Dos modelos das décadas anteriores ao ano 2000, foram compilados na Tabela 17, apenas os modelos de Capra e Bournazel (1998), por terem sido modelos importantes na época. Os demais modelos anteriores aos anos 2000, foram considerados desatualizados, devido novas concepções sobre o mecanismo da RAS.

No modelo de Léger *et al.* (1996) percebe-se a formulação paramétrica teoricamente simples, porém bem complexas no seu desenvolvimento ao ponto que se considerou a anisotropia da reação. Já no modelo de Capra e Bournazel (1998) foi acoplado uma análise probabilística.

A partir dos anos 2000 vários modelos foram propostos. Devido à complexidade da matemática, dos softwares computacionais e a complexa formulação dos conceitos adotados, a compilação de alguns desses modelos em tabela é difícil (PESAVENTO *et al.*, 2012, DORMIEUX *et al.*, 2004; LI *et al.*, 2020; PIGNATELLI *et al.*, 2013; CHARPIN & EHRLACHER, 2014; LI *et al.*, 2018).

Os modelos compilados pós 2000, foram possíveis devido a formulação do processo expansivo ser formulado por somatório de fatores (MULTON *et al.*, 2009; KAWABATA *et al.*, 2017) ou produto de fatores (ALLAHYARI *et al.*, 2020; BAZANT *et al.*, 2000; POYET *et al.*, 2007; SAOUMA & PEROTTI, 2006) que influenciam a RAS. Na Tabela 17 observam-se as descrições empregadas na modelagem. Assim, percebeu-se que as variáveis dependentes mais requeridas nos modelos foram: tempo; temperatura; tensão; umidade; pressão hidrostática; coeficiente de difusão; teor de sílica; porosidade e granulometria.

Figura 56 - Infograma dos softwares computacionais utilizados nos modelos de RAS



Fonte: O autor (2023)



Tabela 17 - Compilação das equações da modelagem matemática para RAS.

Modelo	Autor	Equação	Descrição
Paramétricos e Analíticos	Léger <i>et al.</i> (1996)	$CTRM = \sum F(A + B + C + D)$ $D_m = D^{máx} \cdot CTRM$	CTRM = Somatório dos Fatores que influenciam a reação A- Fator de umidade B- temperatura C- reatividade D- tensão de confinamento Dm- deslocamento no ponto
	Capra e Bournazel (1998)	$\varepsilon^{RAS}(\theta, t) = \varepsilon_0^{RAS}(A, B, C, D) \cdot \frac{f(\theta, t)}{f(\theta, \alpha)}$	$\varepsilon(A, B, C, D)$ = Fatores que influenciam a reação A- fator de umidade B- temperatura C- reatividade D- tensão de confinamento f(θ,t)- propagação de fissura na direção θ no tempo
	Bazant <i>et al.</i> (2000)	$K_I = (\sigma + p) \cdot \sqrt{S \cdot K(w)}$	K = Fatores de intensidade de tensão nas falhas preexistente nas superfícies das partículas σ-tensão p- pressão hidrostática K(w)- fator intensidade de tensão adimensional w- variável de dano adimensional
	Poyet <i>et al.</i> (2007)	$\varepsilon^{RAS}(t) = \varepsilon_0^{RAS} \cdot \frac{d(t)}{1 - d(t)}$	ε(t) = Expansão isotrópica ε0- Expansão inicial d(t)- Dano isotrópico dependente do volume da zona porosa em torno do agregado reativo e o volume dos produtos de reação criados pelo agregado reativo. Também é adotada uma constante que depende da compressibilidade do gel e da rigidez do concreto.
	Multon <i>et al.</i> (2009)	$\varepsilon_{RAS} = \sum_a \varepsilon_a$	ε = Deformações resultantes, considerando a soma das expansões induzidas por cada fração de agregado. εa-Expansão induzida por ASR em cada fração de tamanho agregado. O dano ao concreto é obtido pela substituição do

			volume de gel determinado pela modelagem química
<b>Numérica</b>	Kawabata <i>et al.</i> (2017)	$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_x + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{sh}$	$\varepsilon$ = Somatório de todas as expansões $\varepsilon_e$ - Deformação elástica $\varepsilon_x$ - Deformação ocasionada pela anisotropia $\varepsilon_{cr}$ - Deformação de fluência $\varepsilon_{sh}$ -Deformação por retração
<b>Elementos Finitos</b>	Saouma e Perotti (2006)	$\varepsilon_i = W_i \cdot \varepsilon_V^{RAS}$	$\varepsilon_v$ = - Expansão volumétrica considerando: o componente cinético; temperatura; deslocamento de abertura de fissura; expansão livre determinada em laboratório; tensão de compressão e hidrostática. $W_i$ - Determinação do peso por meio de um sistema bilinear
<b>Elementos finitos e Redes neurais artificiais</b>	Allayari <i>et al.</i> (2020)	$ASRIE = K(x) \cdot \text{Expf}(y)$	$ASRIE$ = Expansão dependente de dois termos $K(t, T, Da)$ - tempo, temperatura e coeficiente de difusão que afetam a cinética. $\text{Expfinal}(r, s, b, T_c)$ - conteúdo da sílica, tamanho do agregado, tamanho das amostras e espessura dos poros, que afetam a expansão final

Fonte: O autor (2023)

#### • RESUMO DA EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS COMPUTACIONAIS EMPREGADAS NOS MODELOS DE RAS PARA CONCRETO

A evolução das técnicas computacionais empregadas nos modelos matemáticos para a reação álcali-sílica (RAS) em concreto é um reflexo do avanço da tecnologia e da crescente demanda por abordagens mais sofisticadas e precisas para prever o comportamento desse fenômeno complexo. Ao longo do tempo, tem havido uma transição de métodos mais

simples e empíricos para técnicas computacionais mais avançadas e baseadas em princípios físicos e químicos.

Inicialmente, muitos modelos para RAS baseavam-se em equações empíricas derivadas de observações experimentais e dados de campo. Essas equações preditivas frequentemente dependiam de variáveis simplificadas e dependiam fortemente de parâmetros empíricos, o que limitava sua precisão e aplicabilidade em diferentes cenários.

Com o avanço das técnicas computacionais, surgiram modelos mais complexos e baseados em simulações numéricas. Estes modelos utilizam algoritmos avançados para resolver equações diferenciais que descrevem os processos físicos e químicos envolvidos na RAS. Eles são capazes de considerar uma gama mais ampla de variáveis dependentes e independentes, bem como interações não-lineares entre essas variáveis.

Uma das vantagens desses modelos é sua capacidade de capturar a dinâmica temporal da RAS e prever seu comportamento ao longo do tempo. Eles também permitem uma análise mais detalhada dos efeitos de diferentes parâmetros e condições ambientais na progressão da RAS.

No entanto, apesar dos benefícios das técnicas computacionais avançadas, esses modelos também apresentam desafios significativos. Eles requerem uma compreensão profunda dos processos físicos e químicos envolvidos na RAS, bem como um conhecimento sólido de métodos numéricos e programação de computadores. Além disso, a validação desses modelos pode ser complicada devido à complexidade dos processos simulados e à falta de dados experimentais para comparação.

Outro desafio é a seleção adequada de variáveis dependentes e independentes. Embora um grande número de variáveis possa ser considerado em modelos computacionais avançados, é importante identificar quais são os mais relevantes e significativos para o problema em questão, a fim de evitar a redundância e simplificar a análise.

Em resumo, a evolução das técnicas computacionais empregadas nos modelos matemáticos para a RAS representa um avanço significativo na compreensão e previsão desse fenômeno complexo. No entanto, essas técnicas também apresentam desafios em termos de complexidade, validação e seleção de variáveis, destacando a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento nesta área.

### **5.7 Tendência para os modelos de RAS para concreto**

Uma tendência emergente nos modelos matemáticos para a reação álcali-sílica (RAS) em concreto é a busca por abordagens mais integrativas e multidisciplinares, que combinem diferentes técnicas e enfoques para melhor compreender e prever o comportamento da RAS em diversas situações. Essa tendência reflete a complexidade do fenômeno da RAS e a necessidade de uma abordagem holística para sua análise.

Uma abordagem integrativa pode incluir a combinação de modelos baseados em princípios físicos e químicos com técnicas computacionais avançadas, como simulações numéricas e modelagem de elementos finitos. Isso permite uma análise mais completa dos processos envolvidos na RAS, desde a difusão de íons até a formação e expansão do gel de sílica, levando em consideração a interação entre diferentes variáveis e fatores ambientais.

Além disso, uma tendência promissora é a inclusão de dados experimentais e observações de campo na formulação e validação dos modelos. Isso ajuda a garantir que os modelos sejam representativos da realidade e que possam ser aplicados com confiança em diferentes situações e contextos. A colaboração entre pesquisadores de diferentes disciplinas, como engenharia civil, química e ciência da computação, também é fundamental para o desenvolvimento de modelos mais robustos e precisos.

No entanto, apesar das vantagens de abordagens integrativas, existem desafios significativos a serem enfrentados. A complexidade dos modelos pode tornar sua implementação e validação mais difícil, especialmente quando se trata de

incorporar uma ampla gama de variáveis e processos. Além disso, a interpretação dos resultados e a aplicabilidade dos modelos em situações do mundo real podem ser complicadas devido à sua complexidade e à incerteza associada aos parâmetros e pressupostos utilizados.

Um desafio adicional reside na necessidade de manter os modelos atualizados e alinhados com as últimas descobertas e avanços tecnológicos. À medida que a pesquisa progride e novos dados se tornam disponíveis, os modelos devem ser constantemente revisados e refinados para garantir sua relevância contínua e precisão.

A capacidade de oferecer soluções para problemas complexos e multifacetados, como a reação álcali-silica (RAS), que é caracterizada por sua natureza heterogênea e dificuldade de precisão, torna as redes neurais artificiais (RNAs) uma abordagem altamente promissora. Nos últimos anos, as RNAs têm sido introduzidas como uma poderosa ferramenta nesse contexto.

As redes neurais são uma forma de aprendizado de máquina, onde algoritmos criam redes neurais artificiais que permitem ao computador aprender e assimilar novos dados. Conforme descrito por Story e Fry (2014) e Nikbin et al. (2017), as RNAs constituem sistemas de processamento de dados que interconectam vários elementos computacionais, conhecidos como neurônios. Durante o processo de aprendizado, essas redes são ajustadas e adaptadas para minimizar o erro de previsão, resultando em modelos mais precisos e confiáveis.

Pesquisas no campo da engenharia civil vêm tendo resultados modelados com base nas RNAs, em que se pode tornar uma tendência. Trabalho publicado por Yeh (2007) que modelou o fluxo de *slump* do concreto e otimizou misturas de concreto com base na RNA. Olivito (2003) mediu a deformação em materiais através de um sistema de diagnóstico neural. Allahyari *et al.* (2020) utilizou a RNA para modelar a RAS e comparar os resultados obtidos com modelos químico-mecânicos já existentes.

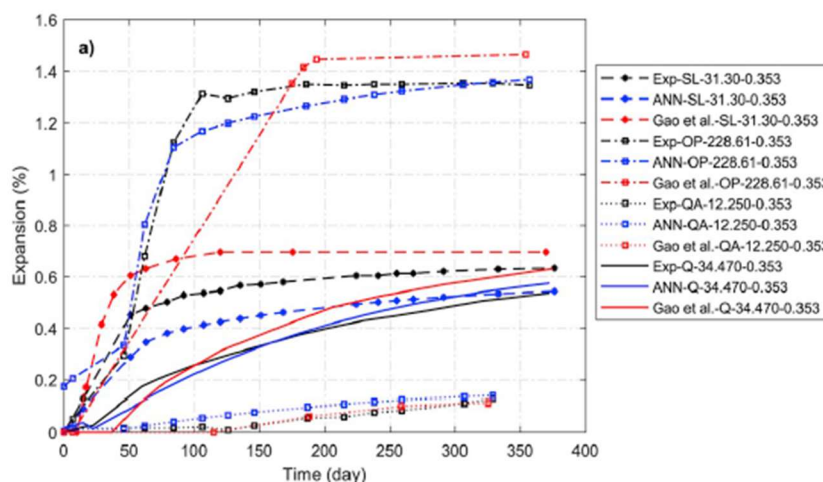
Allahyari *et al.* (2020) utilizaram uma abordagem de aprendizado de máquina para alcançar um grau mais alto de confiança na precisão do modelo ou para novas formulações de modelos para RAS em concreto. Lee e David Lee (2004) apud Allahyari *et al.* (2020), dizem que os neurônios estão altamente conectados com matrizes de conexão, contendo pesos e desvios padrão. Durante o processo de aprendizado, essas matrizes são atualizadas e adaptadas para obter o erro mínimo de previsão (Allahyari *et al.*, 2020).

O modelo foi separado em dois termos, um termo onde os parâmetros tempo, temperatura e o coeficiente de difusão afetam apenas a cinética, sendo esses dados consolidados na literatura consultada, e o segundo termo dependem de parâmetros experimentais que afetam apenas a expansão (dimensões das barras do ensaio acelerado, conteúdo da sílica reativa, tamanho do agregado e espessura da porosidade).

O modelo em redes neurais artificiais proposto por Allahyari *et al.* (2020) ilustra uma comparação em modelo experimental e modelo numérico proposto tanto por Allahyari *et al.* (2020) quanto por Gao *et al.* (2013), conforme Figura Ad, sendo esta comparação a uma temperatura de 60° C tanto para o de Gao *et al.* (2013) como para qualquer outro modelo em sua pesquisa.

No Gráfico 4, verificasse que o modelo baseado na rede neural artificial (RNA) com sigla ANN é superior ao modelo desenvolvido por Gao *et al.* (2013). Ao analisar a idade após 100 dias, a expansão do modelo de Gao é cerca de 0,5% maior do que a expansão real, enquanto a expansão prevista pelo modelo de RNA é apenas 0,15% maior do que a expansão real. O erro absoluto máximo de expansão final previsto pela RNA é inferior a 0,1%, enquanto o erro absoluto máximo do modelo introduzido por Gao *et al.* (2013) é cerca de 0,2%.

Gráfico 4 – Comparação entre modelo experimental, modelo numérico e modelo por RNA



Fonte: Allayari *et al.* (2020)

A validação do modelo foi realizada por comparação de dados experimentais. Embora tenha sido afetiva e bem calibrada os parâmetros de entrada e os resultados satisfatórios, o modelo se tornou bastante complexo, tornando pouco atraente para implementação em grande escala.

Em resumo, a tendência para os modelos matemáticos para a RAS é uma abordagem mais integrativa e multidisciplinar, que combina diferentes técnicas e dados para uma análise mais completa e precisa do fenômeno. No entanto, essa abordagem também apresenta desafios em termos de complexidade, validação e interpretação dos modelos, destacando a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento nesta área.

## 5.8 Ensaios experimentos importantes

Para calibrar e validar os modelos de RAS, principalmente os que tratam da expansão do gel, é necessário cruzar os resultados numéricos com os resultados experimentais. Pesquisadores vêm buscando de forma eficiente elaborar pesquisas, capaz de caracterizar os agregados em inócuo ou deletério. Existem na literatura, já bem consolidada, vários tipos de ensaios, sendo alguns deles internacionalmente conhecidos. Esses ensaios podem ser agrupados de quatro formas, como demonstrado na Tabela 18.

Tabela 18 - Grupos de ensaios para RAS

Tipo	Descrição	Ensaios
I	Avaliam apenas os agregados	Análise petrográfica; Método químico; Osipov e Rochas Carbonáticas
II	Avaliam amostras de concreto e argamassa	Método das barras e Método das barras acelerado
III	Combinam métodos para avaliar cimento e agregado	Método das barras e Acelerado
IV	Avalia o produto da reação	Microscopia eletrônica de varredura

Fonte: O autor (2023)

É importante analisar o desempenho de cada ensaio, e avaliar se dará o resultado requerido. Considera-se importante proceder com combinações de ensaios para investigar profundamente a RAS, e assim obter mais evidencia em relação à reação e ao desempenho do agregado.

Nos modelos matemáticos analisados nesta pesquisa, observou-se que os ensaios mais utilizados foram: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) que foi utilizado para analisar e caracterizar o produto da reação; Análise petrográfica para avaliar o agregado; Método das barras e Método das barras acelerado para analisar a expansão ocorrida no concreto. A seguir, encontra-se uma explanação geral acerca dos quatros ensaios mencionado acima:

**Análise petrográfica:** Utilizado para analisar a reatividade do agregado. Nesse método, pode-se obter informações sobre os minerais e natureza do agregado, ou nas amostras de concreto. Segundo Viera e Oliveira (1997), a petrografia pode fornecer características da composição mineral e a textura dos agregados, que podem conter informações de tensões latentes, ocasionadas pela atuação dos processos geológicos sobre a rocha.

A composição mineralógica pode ser considerada um bom indicador do potencial reativo. Valduga (2007) menciona que a petrografia não pode prever o comportamento do agregado no concreto ou na argamassa, embora de forma rápida, fornece resultados na previsão do potencial reativo. A petrografia pode



ser realizada nas amostras de rochas e concreto, sendo o ensaio normatizado pela NBR 15577-3:2018 (2018).

**Microscopia eletrônica de varredura (MEV):** Utilizado para analisar e classificar os géis formados pela reação álcalis-agregado. Por ser uma reação complexa, podem-se formar diversos tipos de géis expansíveis quimicamente diferentes. O método possibilita identificar a reação nas bordas do agregado na interface da pasta de cimento com o agregado, e a possível existência de gel álcali-silicoso disperso na argamassa, nos poros e nas fissuras do agregado.

**Método Acelerado das Barras de Argamassa:** Ensaio normatizado por ASTM C-1260:2018 (2014), é o método mais utilizado mundialmente. Requer menor espaço nos laboratórios, e obtém o comportamento do agregado exposto a RAS de forma mais rápida. No ensaio, a reação é analisada por meio da variação das barras de argamassa moldadas, e requer que todos os agregados estejam enquadrados em frações pré-estabelecidas.

A essência do ensaio é aproximadamente o mesmo que o método da barra. Esses ensaios diferem na temperatura da solução de imersão, na natureza da solução, e nas idades de ensaios para a avaliação. Para o método acelerado das barras de argamassa, o tempo é reduzido em comparação ao método das barras de argamassa.

O limite de expansão, para esse método, é realizado na leitura de referência aos 16 dias de idade, no qual o limite de acordo com ASTM C-1260:2018 (2014) está demonstrado na Tabela 19.

Tabela 19 - Descrição da indicação da potencialidade reativa do agregado.

Expansão	Tempo (dias)	Descrição
$\varepsilon < 0.1$	16	Indicam um comportamento inócuo na maior parte dos casos

$0.1 \leq \varepsilon \leq 0.2$	16	Indicam possibilidade de o agregado possuir comportamento tanto inócuo como deletério
$\varepsilon > 0.2$	16	Indicam expansão potencialmente deletéria

---

Fonte O autor (2023)

### 5.8.1 Oportunidade e objetivos da modelagem

Muitos modelos foram propostos e simulados em condições que facilitassem os cálculos, ou seja, condições geométricas do agregado considerado circular, reação isotrópica, conseqüentemente formação e expansão do gel em formato radial (ITAM *et al.*, 2019; BAZANT & STEFFENS, 2000; SUWITO *et al.*, 2002; BAZANT *et al.*, 2000; POYET *et al.*, 2007; MULTON *et al.*, 2009; NIELSEN *et al.*, 1993; DUNANT & SCRIVENER, 2010; CHARPIN & EHRLACHER, 2014; ITAM & HUSAIN, 2015; BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, 2017; LI *et al.*, 2018). Com o entendimento da reação amadurecida ao longo do tempo, e com base na evolução dos modelos, há possibilidades de fundamentar novos modelos matemáticos para RAS.

Dessa forma, a contribuição de novos modelos químico-mecânico que englobem as condições de anisotropia da reação e da expansão, que foram considerados em alguns modelos (ITAM *et al.*, 2019; KAWABATA *et al.*, 2017; SAOUMA & PEROTTI, 2006; BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, 2017); a influência da fluência (KAWABATA *et al.*, 2017; BAZANT & RAHIMI-AGHDAM, 2017); e a aleatoriedade da reação (ITAM *et al.*, 2019; CAPRA & BOURNAZEL, 1998), ou contribuir com a implementação nos modelos já existentes.

A modelagem matemática para a reação álcali-sílica (RAS) apresenta diversas oportunidades e objetivos para o futuro, mas também levanta algumas questões críticas que merecem consideração como:

**Oportunidades:**

*Precisão Preditiva:* A modelagem matemática avançada pode oferecer previsões mais precisas sobre o comportamento da RAS em diferentes condições ambientais e composições de concreto. Isso permite a antecipação de problemas potenciais e a implementação de medidas preventivas antes que ocorram danos estruturais.

*Otimização de Materiais:* Modelos matemáticos podem ser utilizados para otimizar a composição de materiais de concreto, levando em consideração a reatividade álcali-agregado e minimizando os riscos de expansão prejudicial.

*Desenvolvimento Sustentável:* Uma compreensão mais profunda da RAS através da modelagem matemática pode contribuir para o desenvolvimento de práticas de construção mais sustentáveis, reduzindo o desperdício de materiais e prolongando a vida útil das estruturas de concreto.

*Guiar Pesquisas Futuras:* Modelos matemáticos podem identificar lacunas no conhecimento e direcionar pesquisas futuras para áreas específicas que necessitam de mais investigação, promovendo avanços contínuos na compreensão da RAS.

**Objetivos:**

*Precisão e Validade:* Os modelos matemáticos devem ser desenvolvidos e validados com rigor científico para garantir sua precisão e confiabilidade na previsão do comportamento da RAS. Isso envolve a incorporação de dados experimentais e observações de campo para validar os resultados do modelo.

*Generalização:* Os modelos devem ser capazes de representar uma ampla variedade de condições e cenários encontrados na prática, garantindo sua aplicabilidade em diferentes contextos.

*Acessibilidade e Usabilidade:* Os modelos devem ser acessíveis e de fácil utilização para engenheiros e profissionais da construção civil, sem exigir conhecimentos avançados em matemática ou computação.

A consideração dessas abordagens, torna possível uma modelagem mais robusta e com maior precisão, para simular de forma mais precisa o que realmente ocorre nas estruturas. Dessas promissas podemos considerar:

*Complexidade versus Simplicidade:* Existe um equilíbrio delicado entre a complexidade do modelo e sua capacidade de ser compreendido e aplicado na prática. Modelos muito complexos podem ser difíceis de interpretar e validar, enquanto modelos muito simplificados podem não capturar adequadamente a complexidade do fenômeno da RAS.

*Incertezas e Limitações:* Todos os modelos matemáticos estão sujeitos a incertezas e limitações inerentes, decorrentes de simplificações e pressupostos feitos durante o desenvolvimento do modelo. É importante reconhecer e quantificar essas incertezas para evitar interpretações errôneas dos resultados do modelo.

*Integração de Dados e Colaboração Interdisciplinar:* A modelagem matemática da RAS requer uma abordagem interdisciplinar, envolvendo conhecimentos de engenharia civil, química, ciência dos materiais e ciência da computação. A integração de dados e a colaboração entre diferentes disciplinas são essenciais para o desenvolvimento de modelos mais robustos e precisos.

Em suma, a modelagem matemática para a RAS apresenta oportunidades significativas para avançar na compreensão e previsão desse fenômeno complexo, mas requer abordagens cuidadosas, rigorosas e colaborativas para enfrentar os desafios críticos associados.

## 5.9 PESQUISA COMPLEMENTAR DE ARTIGOS PARA COMPOR A REVISÃO DA LITERATURA PERÍODO 2021/2023

Esta pesquisa contempla artigos até 2020, devido a defasagem de análise de artigos no período de 2021 até 2023. Houve a necessidade de complementar esta pesquisa, verificando se nesse intervalo de tempo houve novas publicações referente ao tema e quais contribuições novas poderiam existir.

A análise de busca foi feita de forma análoga ao descrito na metodologia deste trabalho. Foi verificado as mesmas bases de dados e utilizado a mesma string *Alkali sílica reaction AND model*. Os artigos passaram pelo processo de filtragem com o mesmo rigor e o resultado pode ser observado na tabela 20. Esta nova busca foi realizada no dia 15/05/2023.

Tabela 20 – Artigos Selecionadas do período de 2021/2023 com busca no dia 15/05/2023

Ano	Autor	Modelo	Tipo	Esc
2021	Life Yang <i>et al.</i>	Mecânico Constitutivo	Pressão Interna	Meso
	Guy-de-paciência <i>et al.</i>	Químico-Mecânico	Difusão	Mico
2022	Xi <i>et al.</i>	Modelo Analítico	Produção e pressão do gel	Micro
	Kawabata <i>et al.</i>	Químico-mecânico	Expansão	Micro
2023	Yang <i>et al.</i>	Químico-mecânico Aprendizado de máquina (RNA)	Pressão Interna	

Fonte: O autor (2023)

Durante a busca foi observado que muitos dos artigos de modelagem não eram referentes a análise preditiva da reação conforme proposto nesta pesquisa, por esse motivo foram poucos artigos selecionados. Dos artigos selecionados, observasse que os modelos não variam em relação ao conteúdo já discutidas nesta pesquisa.

Do exposto, observasse que Yang *et al.* (2023) assim como Allahyari *et al.* (2020) utilizou aprendizado de máquina RNA. O artigo de Life Yang *et al.* (2023)

apresentou um método híbrido de aprendizagem de máquina para prever a expansão RAS no concreto. Os autores montaram um banco de dados experimental de expansões por RAS da literatura com objetivo de calibrar e validar o modelo proposto. O modelo utilizou 11 variáveis como parâmetro de entrada. Os resultados demonstram que o modelo de predição estabelecido é capaz de capturar todos os aspectos experimentais disponíveis da expansão ASR, incluindo: (a) efeitos de reatividade, tamanho, teor de agregado reativo, relação água/cimento e concentração de álcali; (b) efeitos da temperatura e umidade relativa; (c) efeitos de tamanho da geometria do corpo de prova ; e (d) o comportamento dependente do tempo (YANG *et al.*, 2023).

## 6 CONCLUSÕES

A complexidade inerente à modelagem matemática da Reação Álcali-Sílica (RAS) na construção civil é um desafio multifacetado, cuja compreensão crítica é essencial para a melhoria contínua dos processos de construção e manutenção de estruturas de concreto armado. A heterogeneidade dos estudos, a complexidade do fenômeno, as limitações de dados e conhecimento, a interdisciplinaridade e a constante evolução do conhecimento são fatores que contribuem para essa dificuldade.

A diversidade de modelos matemáticos existentes reflete a multiplicidade de abordagens adotadas por diferentes pesquisadores e instituições, cada uma com suas premissas, metodologias e resultados específicos. Essa diversidade é exacerbada pela complexidade da própria RAS, influenciada por uma série de variáveis interconectadas, desde a composição química dos materiais até as condições ambientais e as características do concreto.

A escassez de dados experimentais e conhecimento detalhado sobre o comportamento da RAS dificulta a validação e calibração dos modelos matemáticos, bem como a identificação de padrões consistentes. Além disso, a natureza interdisciplinar da RAS requer uma abordagem integrada que vá além dos limites tradicionais das disciplinas acadêmicas, o que pode ser difícil de alcançar na prática.

A constante evolução do conhecimento e das técnicas de pesquisa adiciona outra camada de complexidade, à medida que novas descobertas, técnicas de pesquisa e abordagens metodológicas surgem continuamente. Isso pode dificultar a padronização e consolidação dos modelos existentes, uma vez que novas informações podem exigir revisões ou ajustes nos modelos existentes.

A dificuldade em agrupar os modelos matemáticos para a Reação Álcali-Sílica (RAS) nos dias atuais está relacionada a diversos fatores:

*Heterogeneidade dos estudos:* Os modelos matemáticos para RAS são desenvolvidos por diferentes pesquisadores e instituições, utilizando abordagens variadas e considerando diferentes aspectos do fenômeno. Isso leva à existência de uma grande diversidade de modelos, cada um com suas premissas, metodologias e resultados específicos.

*Complexidade do fenômeno:* A RAS é um processo complexo influenciado por uma série de variáveis, como composição química dos materiais, condições ambientais, características do concreto, entre outros. Portanto, a formulação de modelos matemáticos que capturem todos esses aspectos de maneira precisa e abrangente é desafiadora.

*Limitações de dados e conhecimento:* A disponibilidade de dados experimentais e o conhecimento sobre o comportamento da RAS ainda apresentam lacunas significativas. Isso dificulta a validação e calibração dos modelos matemáticos, bem como a identificação de padrões e tendências consistentes.

*Interdisciplinaridade:* A compreensão completa da RAS requer uma abordagem interdisciplinar, envolvendo conhecimentos de química, mecânica dos materiais, engenharia civil, entre outras áreas. Integrar todas essas perspectivas em modelos matemáticos coesos e integrados é um desafio adicional.

*Evolução do conhecimento:* O campo da RAS está em constante evolução, com novas descobertas, técnicas de pesquisa e abordagens metodológicas surgindo continuamente. Isso pode tornar difícil a padronização e consolidação dos modelos existentes, uma vez que novas informações podem exigir revisões ou ajustes nos modelos existentes.

Diante desses desafios, é crucial reconhecer que a integração e síntese dos modelos existentes em um quadro unificado representam um objetivo importante para avançar no entendimento e na previsão do comportamento da RAS. No entanto, isso requer um esforço colaborativo e coordenado entre pesquisadores de diversas disciplinas e instituições.

Essa pesquisa destaca a importância da abordagem metodológica da revisão da literatura em fornecer um panorama abrangente e cronológico da evolução da RAS. Isso nos permitiu identificar lacunas na modelagem matemática e destacar áreas que precisam de mais atenção e pesquisa.

A partir desta análise, fica claro que os modelos matemáticos para RAS, embora diversos e complexos, são fundamentais para o avanço do campo. No entanto, é essencial reconhecer suas limitações e continuar aprimorando-os por meio de pesquisas futuras. Esta pesquisa busca contribuir para esse esforço, incentivando mais estudos sobre o assunto e promovendo uma compreensão mais completa e integrada da Reação Álcali-Sílica na construção civil.

## **6.1 UM ROTEIRO PARA PESQUISAS FUTURAS**

Com os avanços das pesquisas, e com base nos resultados e observações percebeu-se o aumento da complexidade dos modelos ao longo dos anos. A busca por modelos cada vez mais precisos vem se tornando mundialmente importante. Assim, para pesquisas futuras em modelos matemáticos para reação álcali-sílica (RAS), sugiro um roteiro que aborde os seguintes aspectos:

### **Avaliação da Complexidade do Fenômeno:**

- Investigação detalhada da complexidade da RAS em diferentes condições ambientais e composições de concreto.
- Análise das interações entre variáveis como temperatura, umidade, composição do concreto e características dos agregados.

### **Desenvolvimento de Modelos Integrativos:**



- Desenvolvimento de modelos que integrem diferentes mecanismos da RAS, como difusão, expansão do gel, pressão interna e produção de gel.
- Exploração de abordagens multidisciplinares que combinem princípios físicos, químicos e computacionais para uma representação mais abrangente do fenômeno.

**Validação Experimental:**

- Realização de estudos experimentais para validar os resultados dos modelos matemáticos.
- Coleta de dados de campo e laboratório para calibrar e verificar a precisão dos modelos em condições reais.

**Incorporação de Incertezas e Sensibilidade:**

- Consideração das incertezas associadas aos parâmetros do modelo e aos dados experimentais.
- Análise de sensibilidade para identificar os parâmetros mais influentes no comportamento da RAS e sua variabilidade.

**Aplicabilidade em Diferentes Contextos:**

- Avaliação da aplicabilidade dos modelos em diferentes condições climáticas, geográficas e de exposição.
- Consideração dos efeitos de variáveis adicionais, como aditivos, cura do concreto e práticas de construção.

**Desenvolvimento de Ferramentas de Suporte à Decisão:**

- Desenvolvimento de ferramentas computacionais baseadas nos modelos para auxiliar engenheiros e profissionais da construção civil na análise e previsão do desempenho da RAS em estruturas de concreto.

**Avaliação de Alternativas de Mitigação:**

- Investigação de estratégias de mitigação da RAS e avaliação de sua eficácia por meio de modelos matemáticos.

- Análise de custo-benefício de diferentes abordagens de mitigação em comparação com os impactos econômicos e ambientais da deterioração causada pela RAS.

**Integração de Tecnologias Emergentes:**

- Exploração de novas tecnologias, como inteligência artificial, aprendizado de máquina, para aprimorar a precisão e eficiência dos modelos matemáticos para a RAS.

Ao seguir esse roteiro de pesquisa, os estudos futuros podem contribuir significativamente para o avanço do conhecimento e das práticas na prevenção e controle da reação álcali-sílica em estruturas de concreto.

## REFERÊNCIAS

ALLAHYARI, H., HEIDARPOUR, A., SHAYAN, A., NGUYEN, V.P. A robust time-dependent model of alkali-silica reaction at different temperatures. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 106, p. 460-478, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103460>.

AMO, D. G., PEREZ. C. B. Diagnosis of the álcali-silica reactivity potencial by means of digital image analysis of aggregate thin sections. **Cement and Concrete Research**, v.31, p.1449-1454,2001.

ANDRADE, T; SILVA, J.J.R.; SILVA, C.M. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e graúdos comercializados na Região Metropolitana do Recife. In: SMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURA DE CONCRETO, 2.,2006, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro, 2006.

ANDRIOLO, F. R. AAR – Dams affected in Brazil - Report on the current situation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 11., 2000, Québec City. Proceedings [...]. Québec City, 2000.

ARRAIS, M.S.M.C. **REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE AGREGADOS GRAÚDOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE FRENTE A DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO**. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Minas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

ASTM, C. 1260-14, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), Annu. B. ASTM Stand. 4 (n.d.).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577/18 Agregados – Reatividade álcali-agregado..

\_\_\_\_\_. NBR 15577-1/18: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 15577-3/18: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto, (n.d.).

BAEK, S. et al. The most downloaded and most cited articles in radiology journals: a comparative bibliometric analysis. **European Radiology**, v. 28, n. 11, p. 4832–4838, 2018.

BANGERT, F. KUHL, D. MESCHKE, G. Chemo-hygro-mechanical modelling and numerical simulation of concrete deterioration caused by alkali-silica reaction, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 28 (2004) 689–714. <https://doi.org/10.1002/nag.375>.

BAZANT, Z.P. RAHIMI-AGHDAM, S. Diffusion-controlled and creep-mitigated asr damage via microplane model. I: Mass concrete, J. Eng. Mech. 143 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001186](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001186).

BAZANT, Z.P. STEFFENS, A. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in

concrete, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 419–428. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00270-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00270-7).

BAZANT, Z.P. ZI, G. MEYER, C. Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes, *J. Eng. Mech.* 126 (2000) 226–232. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:3\(226\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:3(226)).

Ben Haha M, Gallucci E, Guidoum A, Scrivener KL. Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis. *Cem Concret* ;ed. 37:p. 1206–14. 2007

BEN HAHHA, M. Mechanical effects of alkali silica reaction in concrete studied by SEM-image analysis, EPFL (2006).

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

CAPRA, B. BOURNAZEL, J.-P. Modeling of induced mechanical effects of alkali-aggregate reactions, *Cem. Concr. Res.* 28 (1998) 251–260. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00261-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00261-5).

CAPRA, B., BOURNAZEL, J. P., BOURDAROT, E. (1995) “Modeling of Alkali-Aggregate Reaction Effects in Concrete Dams”. In: Proceedings of the Second International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Hidroelectric Plants and Dams, USCOLD, pp. 441-455, Chatanooga, Tennessee, EUA, Oct. 1995.

CARASEK, H. CASCUDO, O. GOMES, G.C. Contribuição à previsão de danos para estruturas de concreto atacadas pela reação álcali-agregado, *Rev. IBRACON Concreto e Construções*. 83 (2016) 30–38

CARLES-GIBERGUES, A., HORNAIN, H. A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena, *Durabilidade Do Concreto Bases Científicas Para a Formulação Concretos Duráveis Acordo Com o Ambient*. Tradução Cascudo, O., Carasek, H. 1 (2014).

CARLES-GIBERGUES A, HORNAIN H. La durabilité des bétons face aux réactions de gonflement endogène. In: Ollivier JP, Vichot A, editors. *La durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*. Paris: Presses de l'Ecole Nationale des Pons et Chaussées; p. 487–611, 2008.

CHARPIN, L. EHRLACHER, A. Microporomechanics study of anisotropy of ASR under loading, *Cem. Concr. Res.* 63 (2014) 143–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.05.009>.

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, *Comput. Mater. Sci.* 46 (2009) 1163–1177. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.06.002>.

COMI, C. FEDELE, R. PEREGO, U. A chemo-thermo-damage model for the analysis of concrete dams affected by alkali-silica reaction, *Mech. Mater.* 41 (2009) 210–230.

COUTO, T.A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2008.

DENT-GASSER, L.S. e KATAOKA, N. "The chemistry of álcali-aggregate reactions" **Cement and Concrete Research**, v.11, pp.1-9, 1981. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90003-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90003-X).

DENYER, D., TRANFIELD, D. Producing a systematic review. In D. A. Buchanan & A. Bryman (Eds.), *The SAGE handbook of organizational research methods* (pp. 671–689). London: Sage Publications Ltd. 2009.

DIAMOND, S. Alkali Silica Reactions - Some Paradoxes. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 391–401, 1997.

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

DORMIEUX, L. LEMARCHAND, E. KONDO, D. FAIRBAIRN, E. Elements of poro-micromechanics applied to concrete, *Mater. Struct. Constr.* 37 (2004) 31–42. <https://doi.org/10.1007/bf02481625>.

DRON R., BRIVOT F., CHAUSSADENT T. '**Mechanism of the alkali-silica reaction**', Congrès de la Chimie des Ciments, Göteborg, Suède, Mai, à paraître, 1997.

DRON, R., BRIVOT, F. '**Thermodynamic and kinetic approach to the alkalisilica reaction. Part 1: concepts**', *Cement and Concrete Research*, vol.22, no. 5, pp. 941-948, 1992.

DUNANT, C.F. SCRIVENER, K.L. Micro-mechanical modelling of alkali–silica-reaction-induced degradation using the AMIE framework, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 517–525. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.024>.

ESPOSITO, R. HENDRIKS, M.A.N. Literature review of modelling approaches for ASR in concrete: a new perspective, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 23 (2019) 1311–1331. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1347068>.

ESPOSITO, R. HENDRIKS, M.A.N. A multiscale micromechanical approach to model the deteriorating impact of alkali-silica reaction on concrete, *Cem. Concr. Compos.* 70 (2016) 139–152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.017>.

FERRARIS, C.F. Alkali-silica Reaction and High Performance Concrete. Disponível em :<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubslbuild95/art004.html>. Acesso em: 25 out. 2022, as 8:30h.

FERRARIS, C.F. (1995) "Alkali-Silica Reaction and High Performance Concrete". Report NISTIR 5742. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland.

FIGUEIRÔA, J. P.; ANDRADE, T. **O Ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2007.

Fournier B, Bérubé MA, Thomas MDA, Smaoui N, Folliard KJ. Evaluation and management of concrete structures affected by alkali-silica reaction - A Review. **Ottawa: Natural Resources Canada**; p. 59, 2004

FOURNIER, B., e BÉRUBÉ, M. A.: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A Review of Basic Concepts and Engineering Implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**. 27, pp. 167-191, 2000.

GIACCIO, G. ZERBINO, R. PONCE, J.M. BATIC, O.R. Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction, **Cement Concr. Res.** 38 993–1004 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.02.009>

GILLOTT, J.E., SWENSON, E.G. Mechanism of the alkali-carbonate rock reaction, *J. Eng. Geol.* 2, p.7–23, 1969

GOMES, G. C. **MODELOS PREDITIVOS DE DANO APLICADOS A ESTRUTURAS DE CONCRETO ATACADAS POR REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA: Uma Revisão Sistemática da Literatura**. 2017. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

GOMES, E. A. O. **Recuperação estrutural de blocos de fundação afetados pela reação álcali-agregado - A experiência do Recife**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. **Health information and libraries journal**, v. 26, n. 2, p. 91–108, jun. 2009. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19490148>. Acesso em: 17 ago. 2022.

GRATTAN-BELLEW, P.; CHAN, G. Comparison of the morphology of alkali-silica gel formed in limestones in concrete affected by the so-called alkali-carbonate reaction (ACR) and alkali-silica reaction (ASR). **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 47, p. 51-54, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.01.013>.

GRYMIN, W. KONIORCZYK, M. PESAVENTO, F. GAWIN, D. Numerical Model of the Alkali-silica Reaction Development with External Source of Alkalis, in: *Procedia Eng.*, 2017: pp. 509–516. **Construção e materiais de construção**, Volume 299, 13 de setembro de 2021. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.244>.

HANSEN, W.C. Studies Relating to the Mechanism by which the Alkali-Aggregate Reaction Proceeds in Concrete. **Journal of the American Concrete Institute**, v.15, no. 3, p. 213-227, 1944

HASHEMI, A., MEMBER, S., KURTIS, K. E., DONNEL, K. M., ZOUGHI, R. Empirical Multiphase Dielectric Mixing Model for. **IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT**, v. 66, no. 9, 2017.

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,. p. 1-10, 2015

HASPARYK, N. P. Reação álcali-agregado no concreto. In: ISAIA, C. G. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, Cap. 27, p. 933-1001, 2011.

HASPARYK, N.P.; MUNHOZ, F.; SANCHES, L.; SALLES, F.; HAMASSAKI, L. Efeito dos álcalis e da finura do cimento nas expansões geradas pela reação álcali-agregado. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO**. 49., Bento Gonçalves, 2007.

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. Investigação dos Mecanismos da Reação Álcali-agregado – Efeito da Cinza de Casca de Arroz e da Sílica Ativa. Dissertação ( Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

HELENE, P.; CARVALHO, M.; PACHECO, J. Engineering field tests for alkali-aggregate reaction. **Structural Concrete**, v. 18, p. 349–355, 2016.

HIRCHE, D. WOLFF, G. Diffusion und ionenaustausch bei der alkali-kieselsäurereaktion, Cem. Concr. Res. 4 (1974) 609–621. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(74\)90010-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(74)90010-6).

HOBBS, D.W. Discussion: The alkali-silica reaction—a model for predicting expansion in mortar, Mag. Concr. Res. 33 (1981) 208–220.

HOBBS, D.W. GUTTERIDGE, W.A. Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction, Mag. Concr. Res. 31, p. 235–242, 1979

HUANG, X.-M., PERRAS, F. A., MANZANO, J. S., SLOWING, I. I., MCNABB, A., & PRUSKI, M. The anomalous solidification of concrete grindings from acid treatment. Cement and Concrete Research, p. 65–69, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.010>

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

ITAM, Z.; BEDDU, S.; MOHAMMAD, D.; KAMAL, N.I.m.; RAZAK, N.a.; HAMID, Z.a.a.. Simulation of Alkali-Silica Reaction Model in a Concrete Gravity Dam at the Macroscale and Mesoscale. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], v. 17, p.717-726, 2019.

ITAM, Z. HUSAIN, H. Modeling of alkali-silica reaction in a two phased material model, J. Teknol. 76 (2015) 13–17. <https://doi.org/10.11113/jt.v76.5637>.

JONES, A.E.K. CLARK, L.A. The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment, **Eng. Struct.** 20 785–791 (1998). [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(97\)00125-9](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(97)00125-9)

JONES, T. N. A new interpretation of alkali-silica reaction and expansion mechanism in concrete. Chemistry and Industry, p. 18:40-44,(1988).

KAGIMOTO, H.; YASUDA, Y.; KAWAMURA, M. Effects of expansion behavior of ASR-affected concrete in atmospheres with various values of relative humidity on surface cracking. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF ALKALI-AGGREGATE REACTION (ICAR), 15.,2016, São Paulo. **Proceedings...**São Paulo, 2016.

KANGNI-FOLI, E., POYET, S., LE BESCOP, P., CHARPENTIER, T., BERNACHY-BARBÉ, F., DAUZÈRES, A., d' ESPINOSE DE LACAILLERIE, J.-B. *Model synthetic pastes for low pH cements. Cement and Concrete Research*, 136, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106168>

KATAYAMA, T., GRATTAN-BELLEW, P.E. Petrography of the Kingston experimental sidewalk at age 22 years — ASR as the cause of deleteriously expansive, so-called alkali-carbonate reaction. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE**,14., Austin TX, 2012.



KATAYAMA, T. The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) — its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 643–675, 2010.

KATAYAMA, T., SOMMER, H. Further investigation of the mechanisms of so-called alkali-carbonate reaction based on modern petrographic techniques, in: M.A.T.M. Broekmans, B.J. Wigum (Eds.). IN: **INTERNATIONAL CONFERENCE OF ALKALI-AGGREGATE REACTIONS IN CONCRETE**, 13., Trondheim, Norway, 2008.

KATAYAMA, T. Modern Petrography of Carbonate Aggregates in Concrete — Diagnosis of So-Called Alkali-Carbonate Reaction and Alkali-Silica Reaction, in: B. Fournier (editor) in Professor Marc-André Bérubé Symposium, on alkali-aggregate reactivity in concrete. IN: **CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY**, MONTREAL, 8. Canada, 2006.

KATAYAMA, T. A critical review of carbonate rock reactions — is their reactivity useful or harmful. **INTERNATIONAL CONFERENCE OF ALKALI-AGGREGATE REACTIONS IN CONCRETE**, 9., London, p. 508–518, 1992.

Kawabata, Y. Seignol, J.-F. Martin, R.-P. Toutlemonde, F. Macroscopic chemo-mechanical modeling of alkali-silica reaction of concrete under stresses, *Constr. Build. Mater.* 137 (2017) 234–245.

Kawabata, Y., Dunant, C., Nakamura, S., Yamada, K., & Kawakami, T. (2022). Efeitos da temperatura na expansão do concreto devido à reação álcali-silica: Uma abordagem numérica simplificada. *Materiales De Construcción*, 72 (346), e282. <https://doi.org/10.3989/mc.2022.17121>

KONIGSBERGER, M., HLOBIL, M., DELSAUTE, B., STAQUET, S., HELLMICH, C., & PICHLER, B. *Hydrate failure in ITZ governs concrete strength: A micro-to-macro validated engineering mechanics model*. *Cement and Concrete Research*, 103, 77–94. 2018. [doi:10.1016/j.cemconres.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.002)

KURODA, T. INOUE, S. YOSHINO, A. NISHIBAYASHI, S. Effects of particle size, grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method, in: *Proc. 12th Int. Conf. Alkali-Aggregate React. Concr.* Beijing, China, 2004.

KURODA, T. NISHIBAYASHI, S. INOUE, S. YOSHINO, A. Effects of the particle size of reactive fine aggregate and accelerated test conditions on asr expansion of mortar bar, *Trans. Japan Concr. Inst.* 22, (2001)

KURTIS, K. E., COLLINS, C. L., MONTEIRO, P. J. M. (2002), “The Surface Chemistry of the Alkali-Silica Reaction: a Critical Evaluation and X-Ray Microscopy”, **Concret Science and Engineering**, v. 4, pp 2-11, 2002.

LARIVE, C. (1997), *Apport Combinés de L’Alkali-Réaction et des ses Effets Mécaniques*, thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

LÉGER, P. CÔTÉ, P. TINAWI, R. Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams, *Comput. Struct.* 60 (1996) 601–611. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(95\)00440-8](https://doi.org/10.1016/0045-7949(95)00440-8).



LI, S. DENG, Z. LI, C. CHEN, D. ZHANG, Y. Modeling of flexural strength degradation induced by alkali-silica reaction, *Constr. Build. Mater.* 234 (2020) 117397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117397>.

LI, B. BAINGAM, L. KURUMISAWA, K. NAWA, T. XIAOZHOU, L. Micro-mechanical modelling for the prediction of alkali-silica reaction (ASR) expansion: Influence of curing temperature conditions, *Constr. Build. Mater.* 164 (2018) 554–569. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.007>.

LOPES, L.E. **MODELAGEM MECÂNICA E NUMÉRICA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO COM APLICAÇÃO A BARRAGENS DE CONCRETO**. 2004. 157 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004

MACLURE, K; PAUDYAL, V; STEWART, D. Reviewing the literature, how systematic is systematic. *International Journal Of Clinical Pharmacy*, [S.L.], p. 1-10, 5 abr. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11096-016-0288-3>.

MCGOWAN. J.K., VIVIAN, H.E. Studies in cement-aggregate reaction: correlation between crack development and expansion of mortars. *Australian Journal of Applied Science*, p. 228-232, 3 ed, 1952.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo, Brasil: Pini, p.751, 2008.

MILLING, A., MWASHA, A., & MARTIN, H. Exploring the Full Replacement of Cement with Expanded Polystyrene (EPS) Waste in Mortars used for Masonry Construction. *Construction and Building Materials*, 2020. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119158](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119158)

MULTON, S., CYR, M., SELLIER, A., Diederich P, Petit L. Effect of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cem Concr Res*;p.508–516, 2010  
MULTON, S. SELLIER, A. CYR, M. Chemo–mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion, *Cem. Concr. Res.* 39 (2009) 490–500. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.03.007>.

MULTON, S., CYR, M., SELLIER, A., Leklou N, Petit L. Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cem Concr Res*; p. 350–9, 2008

NEVES, S.P; MARIANO, G. Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: the pernambuco lineament, northeastern brazil. *Journal of Structural Geology*, v. 21, p. 1369-1383, 1999.

NEVILLE, A.M. *PROPRIEDADES DO CONCRETO*. TRADUÇÃO SALVADOR E. GIAMMUSSO. 2ª ED. REV. ATUAL. SÃO PAULO: PINI, 1997. NEVILLE, A.M. *Properties of concrete*. 4th ed. Longman Group; 1995.

NIELSEN, A. GOTTFREDSEN, F. THØGERSEN, F. Development of stresses in concrete structures with alkali-silica reactions, *Mater. Struct.* 26 (1993) 152–158. <https://doi.org/10.1007/BF02472932>.

NIKBIN, M, S. RAHIMI, H. ALLAHYARI., A new empirical formula for prediction of fracture energy of concrete based on the artificial neural network, *Engineering Fracture*

Mechanics 186 (2017) 466–482.

NOGUEIRA, K. **Reação álcali-agregado:** diretrizes e requisitos da ABNTNBR 15577/2008. Belo Horizonte: UFMG, 2010, 93 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 2010.

OLCZYK, M. Bibliometric approach to tracking the concept of international competitiveness, *Journal of Business Economics and Management*, 17(6), 945-959, 2016.

OLIVITO, R.S. A neural diagnostic system for measuring strain in FRP composite materials, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 703–709. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00103-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00103-8).

PAN, J. W. et al. Modeling of alkali-silica reaction in concrete: a review. **Frontiers Of Structural And Civil Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.1-18, mar. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11709-012-0141-2>.

PAULON, V.A. Reações álcali-agregado em concreto, São Paulo, Diss. (Mestrado Em Eng. Civil)-Pós-Graduação Em Construção Civil, Esc. Politécnica Da Univ. São Paulo. (1981).

PESAVENTO, F. GAWIN, D. WYRZYKOWSKI, M. SCHREFLER, B.A. SIMONI, L. Modeling alkali-silica reaction in non-isothermal, partially saturated cement based materials, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 225–228 (2012) 95–115. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2012.02.019>.

PETERSON, M. G. ULM, F.J. Chemoplasticity of the Alkali-Silica Reaction in Concrete: Modeling of Stress-Induced Anisotropy, Department of Civil & Environmental Engineering - School of Engineering, Massachusetts, EUA, June 2000.

PIGNATELLI, R. COMI, C. MONTEIRO, P.J.M. A coupled mechanical and chemical damage model for concrete affected by alkali-silica reaction, *Cem. Concr. Res.* 53 (2013) 196–210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.011>.

PIGNATELLI, R., Modeling of degradation induced by alkali-silica reaction in concrete structures, POLITECNICO DI MILANO, 2012.

POWERS, T.C., STEINOUR, H.H., An investigation of some published researches on alkali-aggregate reaction. I. The chemical reactions and mechanism of expansion. **Journal of the American Concrete Institute**, p. 497-516, ed. 26(6), 1955a

POWERS, T.C., STEINOUR, H.H., An investigation of some published researches on alkali-aggregate reaction. Part 2. A hypothesis concerning safe and unsafe reactions with reactive silica in concrete. **Journal of the American Concrete Institute**, p. 785-811, ed. 26(8), 1955b.

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, *Mater. Struct. Constr.* 40 (2007) 229–239. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9139-3>.

POYET, S. SELLIER, A. CAPRA, B. THÈ-VENIN-FORAY, G. TORRENTI, J.-M. TOURNIER-COGNON, H. BOURDAROT, E. Influence of water on alkali-silica reaction: Experimental study and numerical simulations, *J. Mater. Civ. Eng.* 18 (2006) 588–596. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:4\(588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(588)).

POYET, S. Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice: Approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable, Université de Marne-La-Vallée, 2003.

PRADO, A.G. **Avaliação petrográfica e experimental de agregados graúdos afetados por deformação tectônica, desenvolvimento de minerais de alteração e texturas de exsolução.** 2008. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. The alkali-silica reaction, Part I: use of the double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels. *ACI Materials Journal*. v. 94, n. 1, p. 10-17, 1997.

PRISZKULNIK S., Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado, ISAIA, GC (Ed.), Concreto: ensino, pesquisa e realizações, São Paulo IBRACON. 2 (2005) 1017–1071.

RAHMAN, M.A. LU, Y. A time-dependent chemo-mechanical analysis of alkali-silica reaction for the disparate geometry of concrete meso-structure, *Constr. Build. Mater.* 211 (2019) 847–857. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.025>.

RAVINDRAN, V.; SHANKAR, S. Systematic reviews and meta-analysis demystified. *Indian Journal Of Rheumatology*, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 89-94, jun. 2015. Medknow. <http://dx.doi.org/10.1016/j.injr.2015.04.003>.

Frt, V. PEROTTI, L. Constitutive model for alkali-aggregate reactions, *ACI Mater. J.* 103 (2006) 194.

SABBAG, A. F. **Verificação da Existência de Reação Álcali-Agregado no concreto da UHE de Mascarenhas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

SAOUMA, V.E.; MARTIN, R.A.; HARRI-ARDEBLI, 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.; PEROTIL, L. Constitutive model for alkali-aggregate reaction. *ACI Materials Journal*, v.103, n.3, p.194-202, 2006

SAOUMA, V. XI, Y. Literature review of alkali aggregate reactions in concrete dams. Report cu/sa-xi-2004/001. Department of Civil, Environmental, Archit. Eng. Univ. Color. (2004)

SCHLEISS, A. BOES, R. Dams and Reservoirs under Changing Challenges, CRC press, 2011. <https://books.google.com.au/books?hl=en&lr=&id=c8PLBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Dams+and+Reservoirs+under+Changing+Challenges&ots=WQ0Gs0QkC5&sig=0SqMXf6Mu52QaTxSP5CtgUflit0>. (Acessado dia 13 de abril 2022).

SHAYAN, A. Effects of alkali–aggregate reaction on concrete and structures, *Proc. Inst. Civ. Eng. Mater.* 169 p. 145–153 (2016).

SIDDAWAY, A. P.; WOOD, A. M.; HEDGES, L. V. How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. **Annual Review of Psychology**, v. 70, n. 1, p. 747–770, 2019.

SIMS, I.; POOLE, A. **Alkali-Aggregate Reaction in Concrete - A World Review**. London: CRC Press, 2017.

STANTON, T.E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, in: Proc. ASCE, 1940: pp. 1781–1811.

STORY, G. FRY, T. A structural impairment detection system using competitive arrays of artificial neural networks, Comput. Civ. Infrastruct. Eng. 29 (2014) 180–190, <https://doi.org/10.1111/mice.12040>

SUWITO, A. JIN, W. XI, Y. MEYER, C. A mathematical model for the pessimum size effect of ASR in concrete, Concr. Sci. Eng. 4 (2002) 23–34.

SVENSSON, S.E. Eigenstresses generated by diffusion in a spherical particle embedded in an elastic medium, Int. J. Mech. Sci. 33 (1991) 211–223. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(91\)90047-7](https://doi.org/10.1016/0020-7403(91)90047-7).

SWAMY, R.N (Ed.). **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**. London: Blackie, 1992.

SWENSON E.G., GILLOTT, J.E. Alkali-carbonate rock reaction, Washington Symp. Hwy. Res. Bd., no 45, pp. 21–40, 1964

TORRES, A. S., **CORROSÃO POR CLORETOS EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO: UMA METAANÁLISE**. 2011. 186F. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2011.

THOMAS, M. D., FOURNIER, B., FOLLIARD; K. J. **Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book**. Federal Highway Administration, 2013.

ULM, F.-J. CONSTANTINIDES, G. HEUKAMP, F.H. Is concrete a poromechanics materials?—A multiscale investigation of poroelastic properties, Mater. Struct. 37 (2004) 43–58. <https://doi.org/10.1007/BF02481626>.

ULM, F.-J. COUSSY, O. KEFEI, L. LARIVE, C. Thermo-chemo-mechanics of ASR expansion in concrete structures, J. Eng. Mech. 126 (2000) 233–242. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:3\(233\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:3(233)).

VALDUGA, L. Reação Álcali-agregado: **Mapeamento de agregados reativo do estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Escola de Engenharia Civil, Campinas- SP, 2002.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, v. 84. n. 2, p. 523-538, 2010.

VIERA, S.R.S.S. OLIVEIRA, M.A.F. Estudo Petrografico de alguns agregados brasileiros, com ênfase na avaliação de sua reatividade potencial frente aos álcalis do cimento, in: REIBRAC, 39, São Paulo, 1997: pp. 77–91.

VILELA, J., CASTRO, J., MARTINS, L.E.G.; GORSCHKE, T. Integration between requirements engineering and safety analysis: a systematic literature review. **Journal Of Systems And Software**, [S.L.], v. 125, p. 68-92, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jss.2016.11.031>.

VIVIAN, H. The effect of expansion on the tensile strength of mortar, Commonw. Bull. Ind. Res. Organ.p. 67–73, 1947.

WINNICKI, A. SEREGA, S. NORYS, F. Chemoplastic modelling of alkali-silica reaction (ASR), in: Comput. Model. Concr. Struct. Euro-C 2014 Int. Conf, 2014: pp. 765–774.

YANG, L., PATHIRAGE, M., SU, H., ALNAGGAR, M., DI LUZIO, G., & CUSATIS, G. (2021). Computational modeling of temperature and relative humidity effects on concrete expansion due to alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Composites**, 124, 104237. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104237>

YANG, L., L., PATHIRAGE, M., SU, H., ALNAGGAR, M., DI LUZIO, G., & CUSATIS, G. (2023). Computational modeling of expansion and deterioration due to alkali-silica reaction: Effects of size range, size distribution, and content of reactive aggregate. **International Journal of Solids and Structures** Volumes 234–235, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111220>

YEH, I.-C. Modeling slump flow of concrete using second-order regressions and artificial neural networks, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 474–480. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.001>.

YURTDAS, I.; CHEN, D.; HU, D.w.; SHAO, J.f.. Influence of alkali silica reaction (ASR) on mechanical properties of mortar. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 47, p.165-174, out.2013.ElsevierBV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.046>

XI, J., YUYA, T., TAKUYA, M., ICHIRO I.K.M, Simulation of concrete structures deformation affected by alkali-silica reaction considering environmental conditions and multiaxial stress state. **STRUCTURE AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING** 2022, VOL. 18, NOS. 10–11, 1542–1557 <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2063905>

ZHANG, C. WANG, A. TANG, M. WU, B. ZHANG, N. Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion, *Cement Concr. Res.* 29, p.1393–1396, 1999