

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JONATHAS RODRIGUES SALLES DE OLIVEIRA

**MODELAGEM DA EXPANSÃO DO CONCRETO DEVIDO À RAA COM
DECAIMENTO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE**

CURITIBA
2013

JONATHAS RODRIGUES SALLES DE OLIVEIRA

**MODELAGEM DA EXPANSÃO DO CONCRETO DEVIDO À RAA COM
DECAIMENTO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Área de Concentração em Mecânica Computacional, Departamentos de Construção Civil e de Matemática, Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. DSc. Luiz Alkimin de Lacerda

Co-orientador: Prof. DEng. Rogério Carrazedo

CURITIBA
2013

Oliveira, Jonathas Rodrigues Salles de
Modelagem da expansão do concreto devido à RAA com
decaimento do módulo de elasticidade / Jonathas Rodrigues Salles de
Oliveira. – Curitiba, 2013.
74 f. : il.; graf., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em
Engenharia
Orientador: Luiz Alkimin de Lacerda
Coorientador: Rogério Carrazedo

1. Concreto - Agregados (Materiais de construção). I. Lacerda, Luiz
Alkimin de. II. Carrazedo, Rogério. III. Título.

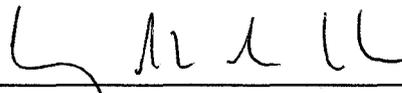
CDD 673.72

TERMO DE APROVAÇÃO

JONATHAS RODRIGUES SALLES DE OLIVEIRA

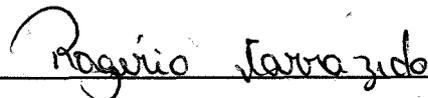
MODELAGEM DA EXPANSÃO DO CONCRETO DEVIDO À RAA COM
DECAIMENTO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, área de concentração em Mecânica Computacional, Setor de Tecnologia, Departamento de Construção Civil e Setor de Ciências Exatas, Departamento de Matemática da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



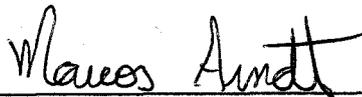
Prof. DSc. Luiz Alkimin de Lacerda

Orientador – PPGMNE, UFPR



Prof. DEng. Rogério Carrazedo

Coorientador – COECI, UTFPR – PB



Prof. DSc. Marcos Arndt

PPGMNE, UFPR



Prof. DSc. Neil Franco de Carvalho

Engenharia Mecânica, UP

Curitiba, 22 de Abril de 2013.

*“Nunca me deixes esquecer
Que tudo o que tenho
Tudo o que sou
O que vier a ser
Vem de Ti Senhor”*

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu Criador, Consolador e Salvador.

Aos professores Luiz Alkimin de Lacerda e Rogério Carrazedo, pela paciência e dedicação ao compartilharam seus conhecimentos e experiência de vida comigo.

À secretária do PPGMNE Maristela Bandil, pelas inúmeras vezes que me ajudou.

Aos professores do PPGMNE, por todo o conhecimento transmitido.

Aos professores Marcos Arndt e Neil Franco de Carvalho por terem aceitado o convite para participarem da banca examinadora.

Ao Professor Alfonso Pappalardo Junior e ao Engenheiro Luiz Lima (ESSS), por responderem e ajudarem um desconhecido que mandou um e-mail.

Aos meus queridos pais João e Audre, pelo apoio e amor incondicionais em todos os momentos de minha vida.

Aos meus irmãos Juliana e Gabriel e até mesmo ao meu cunhado Fellipe, por todo o apoio.

Aos meus amigos, pela motivação nos momentos de dificuldade, em especial aos Cauvins e ao Renato.

À Universidade Federal do Paraná.

À CAPES REUNI, pelo apoio financeiro.

Ao LACTEC e à CEMIG, pelo apoio financeiro.

RESUMO

A reação álcali-agregado é uma reação química que ocorre entre os íons alcalinos liberados durante a hidratação do cimento e determinados minerais reativos pertencentes ao agregado. Esta reação provoca a expansão heterogênea do concreto, reduz importantes propriedades do concreto, como as resistências à compressão e à tração e módulo de elasticidade, culminando com a redução da vida útil da estrutura.

A modelagem matemática da reação álcali-agregado em uma estrutura sujeita à expansão pode prever, com grau de precisão apreciável, a movimentação estrutural decorrente da reação, possibilitando programar manutenções, reduzindo o número de paralisações temporárias para correções estruturais e ainda aumentando o grau de segurança das estruturas.

Nesta metodologia é apresentada uma modelagem numérica da expansão devido à reação álcali-agregado, utilizando um modelo paramétrico, levando-se em consideração o decaimento do módulo de elasticidade do concreto, aplicado ao programa comercial de elementos finitos ANSYS[®], através da rotina programável pelo usuário USERSW.

Os resultados obtidos foram validados através de modelos simples com respostas conhecidas.

Palavras-chave: Reação Álcali-Agregado; Modelagem Matemática; Módulo de Elasticidade.

ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction is a chemical reaction that occurs between the alkali ions released during cement hydration and certain minerals pertaining to the aggregate. This reaction provokes a heterogeneous expansion of the concrete, reduces important properties of the concrete, as compressive and traction strength and Young modulus, leading to the reduction of the structure useful life.

Mathematical modeling of the alkali-aggregate reaction in a structure subject to expansion can predict, with appreciable degree of accuracy, the structural movement caused the reaction, enabling maintenance program, reducing the number of temporary stoppages for structural corrections and even increasing the level of safety of the structures.

This methodology is presented a numerical modeling of expansion of the alkali-aggregate reaction, using a parametric model, taking into account the decay of the Young modulus of concrete, applied to commercial finite element analysis program ANSYS[®], by user programmable feature USERSW.

The results were validated using simple models with known answers.

Keywords: Alkali-Aggregate Reaction; Mathematical Modeling; Young Modulus.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: EXEMPLO DE FISSURAÇÃO CAUSADA PELA RAA - USINA HIDRELÉTRICA DE PETI	16
FIGURA 2: EXEMPLO DE FISSURAÇÃO CAUSADA PELA RAA - USINA HIDRELÉTRICA DE PETI	17
FIGURA 3: EXPANSÃO DO CORPO DE PROVA SUBMETIDO A ENSAIO ACELERADO.....	21
FIGURA 4: RELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE DE ÁLCALIS NO CIMENTO E QUANTIDADE DE CIMENTO NO CONCRETO E O POTENCIAL RESULTANTE PARA RAA	27
FIGURA 5: EVOLUÇÃO DA EXPANSÃO, NO CASO UNIAXIAL, NO TEMPO.....	30
FIGURA 6: NORMALIZAÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A EXPANSÃO DA RAA	34
FIGURA 7: EXPANSÃO EM CORPO DE PROVA SUBMETIDO A ENSAIO ACELERADO.....	36
FIGURA 8: METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DAS EXPANSÕES DEVIDO À RAA	41
FIGURA 9: METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DAS EXPANSÕES DEVIDO À RAA	42
FIGURA 10: CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	44
FIGURA 11: COEFICIENTE DE DIFUSÃO NÃO-LINEAR DO CONCRETO.....	46
FIGURA 12: FATORES DE INFLUÊNCIA (F_M , F_P , F_C e F_T) E DE CALIBRAÇÃO (k_m , k_p , k_c , k_t)	49
FIGURA 13: SOLID92	52
FIGURA 14: MODELO TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA	54

FIGURA 15: MODELO TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA DIVIDIDO EM DUAS REGIÕES	60
FIGURA 16: MODELO TRIDIMENSIONAL DA BARRAGEM FICTÍCIA	63
FIGURA 17: BARRAGEM – DESLOCAMENTO TOTAL	65

\

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPOSIÇÃO DOS MINERAIS RELACIONADOS COM A RAA	21
TABELA 2: REDUÇÃO OBSERVADA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	26
TABELA 3: CORPO DE PROVA - PARÂMETROS ADOTADOS	55
TABELA 4: CORPO DE PROVA – 2 REGIÕES – PARÂMETROS ADOTADOS	61

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS.....	56
GRÁFICO 2: VARIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO ELÁSTICA LONGITUDINAL.....	57
GRÁFICO 3: DEFORMAÇÃO ELÁSTICA LONGITUDINAL x MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	58
GRÁFICO 4: VARIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO ELÁSTICA LONGITUDINAL EM FUNÇÃO DE B_1	59
GRÁFICO 5: VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM FUNÇÃO DE B_1	59
GRÁFICO 6: COMPARAÇÃO ENTRE REGIÕES	61
GRÁFICO 7: DEFORMAÇÃO ELÁSTICA LONGITUDINAL ESPECÍFICA DO CORPO DE PROVA DIVIDIDO EM DUAS REGIÕES.....	62
GRÁFICO 8: DEFORMAÇÃO TOTAL	63
GRÁFICO 9: BARRAGEM – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS RAA.....	64
GRÁFICO 10: BARRAGEM – DESLOCAMENTO TRANSVERSAL MÁXIMO	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APDL	<i>ANSYS® Parametric Design Language</i>
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
C-K-S-H	Silicato de Potássio e Cálcio hidratados
C-N-S-H	Silicato de Sódio e Cálcio hidratados
CTMR	Confinamento, Temperatura, Umidade e Reatividade
MEF	Método dos Elementos Finitos
RAA	Reação Álcali-Agregado
RAC	Reação Álcali-Carbonato
RAS	Reação Álcali-Sílica
UPF	<i>User Programmable Features</i>
VER	Volume Elementar Representativo

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Constante do material para o Modelo de Concreto Danificado
A_1 e A_2	Constantes do Material para o Modelo Paramétrico
B_1	Constante que representa o percentual máximo de degradação do módulo de elasticidade provocado pela RAA
c	Calor específico
C	Matriz de rigidez Elástica
C^e	Inversa da matriz de rigidez Elástica
C_1, C_2, C_3	Constantes do Material para deformação lenta na USERCR
C_4, C_5	Constantes do Material para deformação lenta na USERCR
E	Módulo de elasticidade
E_0	Módulo de elasticidade correspondente a T_0
E_{final}	Módulo de elasticidade correspondente a T_{final}
f_c	Resistência à compressão uniaxial inicial
f_t	Resistência à tração direta
F_c	Fator normalizado de confinamento (tensões)
F_M	Fator normalizado de umidade
F_P	Fator normalizado de porosidade
F_R	Fator normalizado de reatividade
F_T	Fator normalizado de temperatura
g_3	Parâmetro que representa a deformação devido à RAA (ϵ_{RAA}) observada num instante de tempo t
H_1	Altura da região 1
H_2	Altura da região 2
k	Condutividade térmica
\aleph	Fluxo de calor específico
\aleph_c	Fluxo de calor convectivo
\aleph_r	Fluxo de calor radiativo
q	Taxa de calor gerado
r	Constante do Material para deformação lenta na USERCR
t	Tempo

t^h	Tempo qualquer durante a expansão devido à RAA
t^p	Parâmetro relacionado com o tempo de preenchimento dos poros
T	Temperatura
T_a	Temperatura ambiente
T_{final}	Temperatura fictícia usada para simular decaimento do módulo de elasticidade
α	Coeficiente de transferência de calor na superfície
β	Parâmetro de calibração do modelo paramétrico
δ^T	Delta de Kronecker
ϵ	Deformação total
ϵ_{cr}	Deformação lenta na USERCR
$\epsilon_{ELÁSTICA}$	Deformação elástica
ϵ_{E1}	Deformação elástica na região 1
ϵ_{E2}	Deformação elástica na região 2
ϵ^h	Deformação correspondente ao t^h
ϵ_{vol}^{max}	Valor assintótico da deformação volumétrica livre por RAA
ϵ_{RAA}	Deformação devido à RAA
$\dot{\epsilon}_{RAA}$	Taxa Deformação devido à RAA
ϵ	Deformação
ν	Módulo de Poisson
ν	Constante de Stefan-Boltzman
ρ	Densidade do material
σ	Tensor de tensões
Γ	Constante que determina a tensão para a qual a taxa de expansão devido à RAA se anula
ξ	Emissividade da superfície

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO	18
1.2	VISÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO	18
2	REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO	20
2.1	REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA	22
2.2	REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO	24
2.3	REAÇÃO ÁLCALI-CARBONATO	24
2.4	EFEITOS DA RAA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	25
2.5	FATORES QUE INFLUENCIAM A RAA	26
2.5.1	<i>Conteúdo e Quantidade de Álcalis no Concreto.....</i>	<i>27</i>
2.5.2	<i>Reatividade do Agregado.....</i>	<i>28</i>
2.5.3	<i>Umidade.....</i>	<i>28</i>
2.5.4	<i>Porosidade</i>	<i>29</i>
2.5.5	<i>Temperatura.....</i>	<i>29</i>
2.5.6	<i>Tensões Confinantes</i>	<i>30</i>
3	MODELOS MATEMÁTICOS.....	31
3.1	MODELOS TEÓRICOS.....	31
3.2	MODELOS MESOSCÓPICOS	32
3.3	MODELOS MACROSCÓPICOS	33
3.3.1	<i>Modelos Paramétricos.....</i>	<i>33</i>
3.3.2	<i>Modelos Químico-Mecânicos</i>	<i>37</i>
3.3.3	<i>Modelos Numéricos Utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF)</i>	<i>38</i>
3.4	MODELO ADOTADO NESTA DISSERTAÇÃO	40
4	METODOLOGIA ADOTADA PARA A MODELAGEM NUMÉRICA.....	41
4.1	FATORES DE INFLUÊNCIA	43
4.1.1	<i>Temperatura.....</i>	<i>43</i>
4.1.2	<i>Percolação da Água no Concreto.....</i>	<i>44</i>
4.1.3	<i>Difusão da Água no Concreto</i>	<i>45</i>

4.1.4	<i>Reatividade dos Constituintes</i>	46
4.1.5	<i>Tensões</i>	46
4.2	REDUÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	48
4.3	NORMALIZAÇÃO EM FATORES DE INFLUÊNCIA	49
4.4	EQUAÇÃO ADOTADA	50
4.5	IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA	50
4.6	ESCOLHA DO ELEMENTO FINITO	52
4.7	DIFICULDADES ENCONTRADAS	52
4.8	APLICAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO	53
5	DESCRIÇÃO DO MODELO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
5.1	CORPO DE PROVA	54
5.1.1	<i>Calibração do Modelo</i>	55
5.1.2	<i>Decaimento do Módulo de Elasticidade</i>	56
5.1.3	<i>Variação de B_1</i>	59
5.1.4	<i>Divisão em Duas Regiões</i>	60
5.2	BARRAGEM FICTÍCIA	63
5.2.1	<i>Análise do Modelo</i>	64
5.2.2	<i>Deslocamento</i>	64
6	CONCLUSÃO	67
6.1	FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	68
7	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE A – USERSW E FUNÇÕES DE NORMALIZAÇÃO	75
A.1	ROTINA USERSW	75
A.2	USER_UMID	77
A.3	USER_POROS	77
A.4	USER_TEMP	78
A.5	USER_TENSÃO	78
	APÊNDICE B – APLICAÇÃO EM APDL	80
B.1	ANÁLISES DE TENSÕES E RAA	80

1 INTRODUÇÃO

Grandes estruturas de concreto estão sujeitas a diversos fenômenos deletérios, dentre os quais é possível citar a formação de etringita secundária, ciclos de gelo/degelo, corrosão de armaduras, lixiviação dos materiais finos do concreto e a reação álcali-agregado. Estes fenômenos podem ocorrer simultaneamente e às vezes até iniciar outro (WIGUM, 1995). Seus efeitos vão desde fissuração, deformações excessivas, exsudação de gel até redução das propriedades mecânicas e da vida útil da estrutura. Desacoplar estes fenômenos se torna necessário para seu estudo.

Devido ao fato de a água ser um dos fatores determinantes da existência da RAA, as obras hidráulicas são as mais susceptíveis de apresentarem este tipo de problema. As figuras 1 e 2 ilustram um caso de impacto da RAA em uma estrutura de usina hidrelétrica.



FIGURA 1: EXEMPLO DE FISSURAÇÃO CAUSADA PELA RAA - USINA HIDRELÉTRICA DE PETI
FONTE: Imagem cedida pela CEMIG (2013)



FIGURA 2: EXEMPLO DE FISSURAÇÃO CAUSADA PELA RAA - USINA HIDRELÉTRICA DE PETI
FONTE: Imagem cedida pela CEMIG (2013)

Esta dissertação procura estudar a reação álcali-agregado (RAA), que é uma reação química deletéria que ocorre entre os álcalis do cimento e determinados minerais reativos provenientes do agregado, comentando seus mecanismos expansivos e os fatores que os influenciam. Também discute uma metodologia de análise que visa representar e prever as deformações causadas por esta reação deletéria ao longo do tempo.

Esta metodologia tem por base os trabalhos apresentados por LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996), PAPPALARDO JR. (1998) e CARRAZEDO (2004), que consiste em determinar os campos que influenciam a reação álcali-agregado, normalizá-los em fatores de influência, e combiná-los por meio de uma equação constitutiva.

A metodologia apresentada neste trabalho é uma ampliação da metodologia apresentada por CARRAZEDO (2004), pois incorpora o decaimento do módulo de elasticidade decorrente do avanço da RAA, sugerido por PIETRUSCZAK (1996).

A modelagem computacional proposta tem o intuito de simular o desenvolvimento e evolução da RAA em estruturas de concreto e, com isso, prover dados suficientes e relativamente confiáveis para o estudo de medidas necessárias para reduzir os danos causados.

Este trabalho faz parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento financiado pela CEMIG, no âmbito do programa ANEEL, que tem por objeto principal investigar

o comportamento geral da Usina Hidrelétrica de Peti localizada em São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais.

1.1 OBJETIVO

- Introduzir o decaimento do módulo de elasticidade, sugerido por PIETRUSCZAK (1996), na metodologia empregada para a representação da expansão do concreto devido à reação álcali-agregado apresentada por CARRAZEDO (2004).
- Discutir as limitações da metodologia de análise proposta e sugerir, quando possível, modificações com o intuito de melhorá-la.

1.2 VISÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 trata da reação álcali-agregado, como esta se desenvolve e quais são seus tipos de reação, além dos mecanismos sugeridos para explicar seu desenvolvimento e seu efeito deletério. Também são apresentados os principais fatores que interferem no comportamento da reação álcali-agregado: conteúdo de álcalis no concreto, a reatividade do agregado, a umidade, a porosidade, a temperatura e as tensões confinantes. A importância deste capítulo está na necessidade de entender os mecanismos que tornam a reação deletéria.

O capítulo 3 faz uma revisão dos modelos computacionais empregados na representação da expansão de uma estrutura de concreto causada pela reação álcali-agregado. São brevemente apresentados modelos teóricos, mesoscópicos e macroscópicos.

O capítulo 4 explica a metodologia empregada por esta dissertação, iniciando pela obtenção dos fatores de influência, depois apresentando os métodos para sua normalização, o emprego de uma equação constitutiva, além da equação utilizada para o decaimento do módulo de elasticidade. Uma breve análise das dificuldades encontradas para simular o decaimento do módulo de elasticidade também é apresentada neste capítulo.

O capítulo 5 descreve os modelos utilizados para comprovar a eficácia da metodologia apresentada no capítulo 4. Neste mesmo capítulo, a eficácia da metodologia de análise é discutida por meio dos resultados apresentados.

O capítulo 6 traz as conclusões resultantes da discussão realizada no capítulo anterior. São obtidas conclusões sobre a eficácia desta metodologia em simular o decaimento do módulo de elasticidade. Além disso, são realizadas propostas para futuros desenvolvimentos aplicáveis a este trabalho.

2 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO

A reação álcali-agregado é definida como a reação química entre os álcalis do cimento e determinados minerais advindos do agregado. Entre seus principais efeitos sobre o concreto têm-se a formação de fissuras, redução da durabilidade, decréscimo da resistência mecânica, além de reduções no módulo de elasticidade. Esta reação já vem sendo estudada há mais de 70 anos e seus efeitos já foram documentados em mais de 40 países (GIACCIO *et al.*, 2008).

De acordo com a composição mineralógica reativa do agregado, a RAA divide-se em:

- Reação Álcali-Sílica – RAS;
- Reação Álcali-Silicato;
- Reação Álcali-Carbonato – RAC.

De acordo com DIAMOND (1997) e JONES e CLARK (1998), as três reações trazem prejuízos ao concreto causando expansão e fissuração. Como a superfície não expande na mesma proporção que o interior do concreto tem-se o aparecimento de tensões de tração que induzem o aparecimento de trincas. Essa diferença ocorre, por exemplo, pela lixiviação dos álcalis necessários à reação.

A reação pode ser simplificada em três etapas, conforme a figura 3 e enumerado a seguir:

1. Há um período inicial, onde o concreto massa torna-se saturado pelos produtos da reação. Não são observadas expansões;
2. Um segundo período, em que os poros do concreto já estão saturados e há o desenvolvimento de pressão interna e expansão no concreto;
3. Uma última fase, que consiste na extinção dos minerais reativos, encerrando o processo.

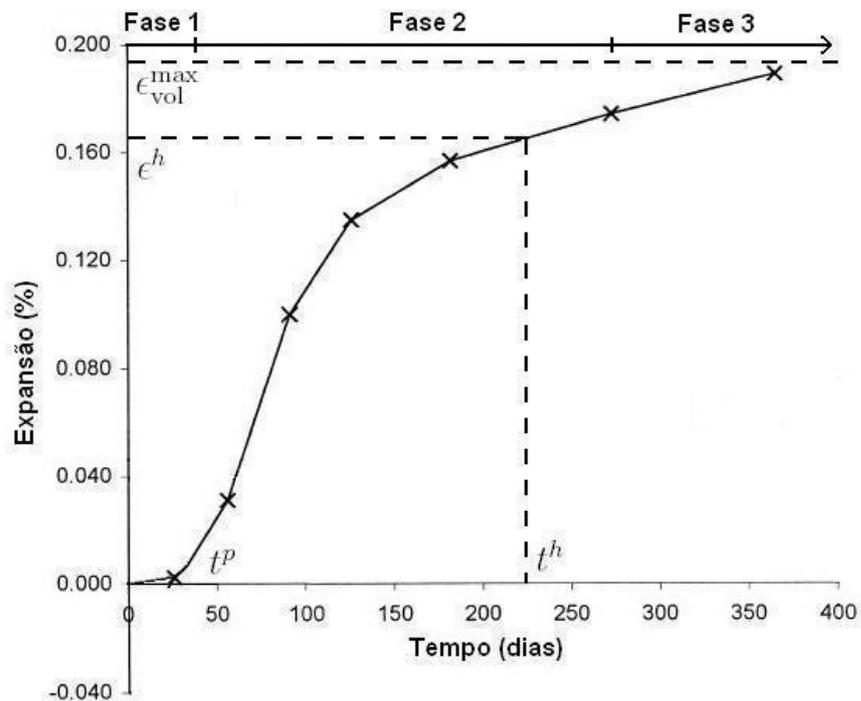


FIGURA 3: EXPANSÃO DO CORPO DE PROVA SUBMETIDO A ENSAIO ACELERADO
 FONTE: Modificado de BODDY, HOOTON e THOMAS (2000)

Cada um dos tipos de reação tem seu próprio mecanismo de expansão, mas todos envolvem, de uma forma ou de outra, os álcalis liberados na hidratação do cimento e os componentes químicos reativos do agregado. Na tabela 1, são apresentados os minerais reativos mais comuns e qual o tipo de reação que cada um provoca.

TABELA 1: COMPOSIÇÃO DOS MINERAIS RELACIONADOS COM A RAA

MINERAL REATIVO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA REATIVA	NATUREZA DA REAÇÃO
Quartzo Deformado	SiO_2	Álcali-Silicato
Opala	$SiO_2 \cdot H_2O$	Álcali-Sílica
Calcedônia	SiO_2	Álcali-Sílica
Tridimita / Cristobalita	SiO_2	Álcali-Sílica
Vidros	Silicosos com Al_2O_3 e Fe_2O_3	Álcali-Sílica
Calcita e Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	Álcali-Carbonato

FONTE: MEHTA e MONTEIRO (1994)

A RAA é um fenômeno complexo que envolve aspectos físicos, mecânicos e químicos do comportamento de estruturas de concreto (LOPES, 2004).

A metodologia proposta neste trabalho tem como objetivo simular apenas os efeitos físicos e mecânicos da RAA, desconsiderando, portanto, os efeitos químicos. Entretanto, para ajudar na compreensão das minúcias da reação álcali-agregado, as seções 2.1 a 2.3 apresentam uma breve revisão bibliográfica do comportamento químico dos três tipos de RAA: reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato.

2.1 REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Hidróxidos alcalinos são liberados durante a hidratação do cimento, o que torna o fluido dos poros do concreto fortemente básico, com um pH médio de 13. Íons hidroxila (OH^-), dissociados neste fluido, modificam a estrutura da sílica (dióxido de silício, SiO_2) constituinte do agregado o que possibilita a associação de íons metálicos alcalinos (Na e K, sódio e potássio, respectivamente), formando o gel. O íon metálico alcalino do lítio (Li), embora não tão facilmente encontrado após a hidratação do cimento, também pode ser associado. Porém sua associação é benéfica, pois a estrutura do gel resultante dificulta a absorção de água.

A concentração de dióxido de cálcio e de álcalis irá determinar se o gel será expansivo ou não expansivo. Segundo KURTIS *et al.* (1998), a concentração de hidróxido de cálcio for superior a de álcalis, haverá a formação de um gel de cal - álcali - sílica, não expansivo. Porém, se há predominância de íons alcalinos na solução, um gel de álcali - sílica será formado, com propriedades expansivas. Já para BLESZYNSKI e THOMAS (1998), o inverso ocorre, ou seja, com pouco cálcio, o gel é relativamente fluido e dispersa na pasta de cimento, sem causar danos. Com quantidades normais de cálcio, o gel é mais viscoso, além de expandir em contato com a água.

O gel expansivo pode levar a criação de microfissuras no concreto uma vez que este, através de osmose, absorve uma grande quantidade de água, causando uma pressão hidráulica que, em dado momento, pode superar a resistência de ruptura à tração do concreto.

Com a absorção de água o gel poderá fluir para o interior do agregado e para outros pontos no concreto, absorvendo mais água e criando fissuras ao longo do concreto, chegando à superfície. Este processo é resumido por CHATTERJI, THAULOW e JENSEN, (1989):



Outros mecanismos já foram propostos. CHATTERJI *et al.* (1986) propuseram que a expansão ocorre quando a penetração de íons hidroxila, de sódio e potássio nos cristais de sílica for maior que a saída de íons de sílica do agregado para o fluido dos poros do concreto.

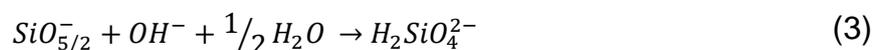
Já URHAN (1987) diz que a absorção de íons hidroxila provoca a dissolução de átomos de sílica na superfície do agregado. O cálcio é absorvido mais rapidamente, formando cristais de C-S-H. Se a taxa de cristalização foi maior que a dissolução de sílica, os cristais de C-S-H vão se formar na superfície da sílica e a dissolução pára. Senão a dissolução continua, permitindo a penetração de íons alcalinos, levando à formação do gel de álcali-sílica.

GARCIA-DIAZ *et al.* (2006) propõem que a RAA ocorre em duas etapas:

- Etapa 1 - Formação de $SiO_{5/2}^-$ durante a absorção de íons hidroxila pela sílica do agregado:



- Etapa 2: Formação de íons de silicato:



De acordo com os autores, a etapa 1 é a responsável pela expansão do agregado levando à RAA. Já os íons de silicato resultantes da etapa 2 em contato com o fluidos dos poros do concreto podem levar a formação de C-S-H, C-K-S-H e C-N-S-H, inibidores da RAA.

De acordo com TCHIKAWA e MIURA (2007) íons hidroxila (OH^-), ao reagir com os íons metálicos Na e K nos poros do concreto, modificam a estrutura do agregado envolvendo o mesmo com uma camada de gel, levando à expansão do

concreto. O consumo de OH^- auxilia na dissolução de Ca^{2+} na solução, que penetra no gel, modificando a sua estrutura e permitindo a incorporação de íons metálicos e íons hidroxila, o que pode levar à ruptura do concreto.

Para GLASSER e KATAOKA (1981), o ataque dos álcalis em cristais bem definidos de sílica, na superfície do agregado, é lento. Já cristais dispersos permitem a penetração de hidróxidos e álcalis em seu interior, promovendo uma reação mais rápida.

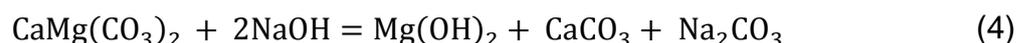
2.2 REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO

Semelhante à reação álcali-sílica, a reação álcali-silicato ocorre entre os íons alcalinos liberados na hidratação do concreto e os minerais cuja estrutura é dominada pela ligação entre o silício e o oxigênio. O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado na hidratação do concreto pode reagir com o agregado e provocar a liberação de álcalis na forma KOH e NaOH , silicato de potássio e sódio. A partir de determinada concentração de álcalis, os silicatos de cálcio tenderão a se dissolver em silicatos de potássio e sódio, formando um gel que terá cálcio, potássio, sódio e sílica. Este gel tem propriedades expansivas na presença de água, além de ser parcialmente solúvel, o que dá modalidade ao gel dentro do agregado e do cimento.

2.3 REAÇÃO ÁLCALI-CARBONATO

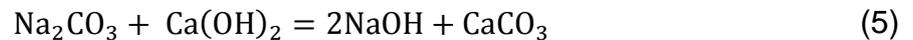
Entre os muitos mecanismos já utilizados para explicar a reação álcali-carbonato duas etapas são recorrentes: uma reação de desdolitização e a regeneração de íons alcalinos.

Desdolitização é a reação que ocorre entre íons alcalinos e o calcário alcalino. LIANG e MINGSHU (1995) a representam conforme expressão abaixo:



Na equação (4), ao invés de sódio, é possível encontrar potássio ou lítio. A desdolitização resulta no aparecimento de cristais de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e calcita (CaCO_3). Percebe-se que, pela equação (4), deveria haver uma redução no pH do fluido dos poros do concreto devido à redução de íons alcalinos em solução. Já o

hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento reagirá com um dos produtos decorrentes da desdolomitização, o Na_2CO_3 da seguinte forma:



Assim a reação vai liberar os íons alcalinos e formar mais calcita e o pH se manterá. O álcali funciona apenas como catalisador da reação, já que não participa dos produtos formados.

A partir desse ponto, os pesquisadores diferem em suas teorias de expansão. De acordo com LIANG e MINGSHU (1999), a expansão é causada pela formação e crescimento de produtos cristalinos em um espaço confinado, interface de cristais dolomíticos e a matriz, mesmo sabendo que a reação de desdolomitização tem como produto de sua reação partículas de menor volume.

Já SWENSON e GILLOTT (1964) propuseram que a expansão é causada pela absorção de íons hidroxila pelos argilo-minerais recém expostos, resultantes da reação de desdolomitização.

GRATTAN-BELLEW *et al.* (2010), ao analisarem prismas de rochas com agregados que sofrem a reação álcali-carbonato, observaram altas taxas de quartzo nos resíduos da RAA e que esta quantidade é proporcional à expansão dos prismas indicando que a principal reação ocorrida ali é a álcali-sílica. Somado a outros estudos os autores chegaram à conclusão que a reação álcali-sílica é igual à álcali-carbonato.

2.4 EFEITOS DA RAA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

De acordo com MARZOUK e LANGDON (2003) concretos normais e de alta resistência, na evolução da RAA, tiveram redução na resistência à compressão e à tração e no módulo de elasticidade, sendo este último o mais afetado, uma vez que ele é o mais dependente das alterações da microestrutura do concreto.

As reduções observadas são da ordem de 80% no módulo de elasticidade para corpos de prova de concreto feitos com agregados altamente reativos, 28% na resistência à compressão e 37% na resistência à tração.

Para um agregado moderadamente reativo as reduções foram menores. Reduções de 20% no módulo de elasticidade e de 31% na resistência à tração. A

resistência à compressão permaneceu praticamente inalterada. Para concretos de alta resistência, não foi observado decréscimo nas propriedades mecânicas.

Segundo HASPARYK (2005) testemunhos de concreto extraídos da galeria de drenagem da Usina Hidrelétrica de Furnas situada no Rio Grande, município de Alpinópolis (MG) apresentaram queda no módulo de elasticidade na ordem de 46%. Já para resistência à compressão, não se observou grande alteração. Estudos realizados em vigas por HOBBS (1988) mostram queda de módulo na ordem de 65%. Já de acordo com LARIVE (1997) a queda no módulo de elasticidade é da ordem de 40%.

Nas investigações realizadas em testemunhos deteriorados extraídos por JOHN ST (1992), em pavimentos de uma base aérea, foi constatada uma redução de 30% no valor da resistência à tração.

A tabela 2 apresenta um resumo das reduções nas propriedades do concreto apresentadas nessa seção para os valores de resistência à tração (f_t), resistência à compressão (f_c) e módulo de elasticidade (E).

TABELA 2: REDUÇÃO OBSERVADA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

FONTE	f_t	f_c	E
HASPARYK (2005)	-	-	46%
HOBBS (1998)	-	-	65%
JOHN ST (1992)	30%	-	-
LARIVE (1997)	-	-	40%
MARZOUK e LANGDON (2003) (agregado altamente reativo)	37%	28%	20%
MARZOUK e LANGDON (2003) (agregado moderadamente reativo)	31%	31%	20%

FONTE: O autor (2013)

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A RAA

Estabelecer a relação dos principais fatores que estimulam o surgimento e desenvolvimento da RAA é importante para se inibir ou tratar o aparecimento desta reação deletéria. De acordo com LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) e PAPPALARDO JR. (1998), as principais causas e contribuições são provindas do conteúdo de

álcalis no concreto, da quantidade, tamanho e reatividade do agregado, da umidade, da porosidade, da temperatura e das tensões confinantes.

2.5.1 Conteúdo e Quantidade de Álcalis no Concreto

A principal fonte de álcalis no concreto é o cimento. COLLINS e BAREHAM (1987) afirmam que cimentos com teor de álcalis superior a 0,6% de Na_2O equivalente ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$) associados a agregados reativos, criam o gel expansivo das reações álcali-sílica e álcali-silicato.

De acordo com BÉRUBÉ *et al.* (2002) podem haver outras fontes de álcalis, como aditivos, adições minerais, agregados contaminados e água do mar. Há inclusive agregados que liberam álcalis na solução dos poros do concreto, aumentando a concentração de álcalis o suficiente para provocar a RAA mesmo em cimentos de baixa alcalinidade (CONSTANTINER e DIAMOND, 2003). Dessa forma, é preciso determinar o conteúdo total de álcalis ao qual o concreto está exposto. Para tal, quando um agregado reativo é utilizado para a fabricação de um concreto, os parâmetros apresentados pela figura 4 devem ser observados.

É importante destacar que o teor de álcalis somente afetará as reações álcali-sílica e álcali-silicato, uma vez que os álcalis formam um gel expansivo como produto de suas reações com o agregado. Já a reação álcali-carbonato precisa apenas de uma quantidade mínima de álcalis para reagir, pois estes funcionam somente como catalisadores da reação de desdolomitização e são regenerados, não tomando parte no produto final da reação.

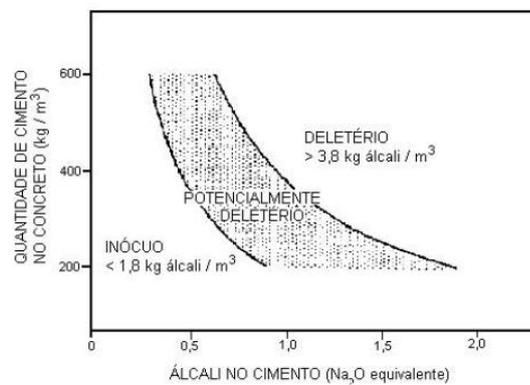


FIGURA 4: RELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE DE ÁLCALIS NO CIMENTO E QUANTIDADE DE CIMENTO NO CONCRETO E O POTENCIAL RESULTANTE PARA RAA
 FONTE: OBERHOLSTER (1983) em WIGUM (1995)

2.5.2 Reatividade do Agregado

O grau de reatividade do agregado define a velocidade e o tipo de reação que irá ocorrer. Para a reação álcali-sílica, uma disponibilidade maior de água de cristalização, ou seja, o grupo silanol (SiOH) vai propiciar um grau de reatividade maior.

Observa-se que as dimensões do agregado influenciam na reatividade devido às reações ocorrerem na superfície do agregado, ou seja, a RAA é altamente influenciada pela superfície reativa do agregado.

Segundo os autores ZHANG *et al.* (1999), quando o elemento reativo no agregado é a sílica e as dimensões do agregado estão compreendidas entre 0,15 mm e 10 mm, quanto menor o tamanho, maior a expansão. Já agregados graúdos, quando reativos, provocam menor expansão nos períodos iniciais em relação aos seus pares miúdos, porém a expansão se propaga por um período bem maior.

2.5.3 Umidade

Os íons hidroxila são necessários para solubilizar os íons alcalinos. Então, para que ocorra a reação deletéria, é necessário ter diluída, nos poros do concreto, água proveniente de alguma fonte. Esta água, além de possibilitar a reação, é necessária para que o processo de expansão da reação álcali-sílica ou da reação álcali-silicato ocorra. Como foi visto, as reações entre o álcali e a sílica ou silicato criam um gel com propriedades higroscópicas, que atraem e absorvem as moléculas de água para poder expandir.

Ainda que o mecanismo de expansão da reação álcali-carbonato não esteja devidamente claro, alguns pesquisadores acreditam que a expansão é causada pela absorção de água pelos argilo-minerais resultantes da reação de desdolomitização. De qualquer forma a água é necessária para solubilizar os íons alcalinos, conforme foi dito.

BAZANT e STEFFENS (2000) mostram que uma umidade relativa no concreto de 85% no mínimo deve existir para que ocorra a reação. Já LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) utilizam 75% de umidade relativa como restrição à expansão.

2.5.4 Porosidade

A forma como a porosidade influencia na expansão do concreto varia de acordo com o tipo de reação. Para a reação álcali-sílica e para a reação álcali-silicato, existem duas formas em que a porosidade pode interferir.

A primeira forma é impedindo a circulação de água e do gel em seu interior, limitando sua mobilidade. Assim, uma baixa porosidade pode impedir a expansão do gel e até sua formação (pois este necessita de íons hidroxila). A segunda forma de interferir seria fazer um concreto com alta porosidade, pois assim o gel, por mais que expanda, teria espaço, não exercendo a pressão osmótica responsável pelas fraturas e expansão do concreto.

Já para a reação álcali-carbonato os efeitos são os mesmos, mas ainda não há um consenso entre os pesquisadores estudados sobre como a porosidade interfere no desenvolvimento da expansão do concreto. Relembrando, SWENSON e GILLOTT (1964) e GILLOTT (1986) (em LIANG e MINGSHU (1999)) propuseram que a expansão é causada pela absorção de íons hidroxila pelos argilo-minerais resultantes da reação de desdolomitização. A baixa porosidade também impediria a expansão já que impede a circulação de água.

Segundo LIANG e MINGSHU (1999), a porosidade só restringiria o espaço para a expansão, criando tensões de tração que levam à fissuração já que, segundo eles, a formação de cristais não é influenciada pela água.

Para uma alta porosidade, ambas as teorias são afetadas. A geração de cristais seria livre em poros maiores e os argilo-minerais que absorvem água não chegariam a preencher os poros. Ou seja, não haveria expansão.

2.5.5 Temperatura

De acordo com COLLINS e BAREHAM (1987) e NEVILLE (1997), com o aumento da temperatura, há um acréscimo na solubilidade da sílica e uma redução na solubilidade do Ca(OH)_2 . Isto implica no aumento da velocidade de expansão ao tornar a sílica mais propensa a reagir e ao reduzir a capacidade do hidróxido de cálcio de se combinar com o gel, diminuindo suas capacidades expansivas.

A temperatura, portanto, age como um importante catalisador das reações expansivas. Segundo SILVEIRA (1997) este comportamento pode ser observado em

barragens, nas estruturas próximas à casa de força, onde funcionam os geradores de energia. Ali os efeitos da RAA são intensificados graças à temperatura próxima dos cinquenta graus centígrados.

2.5.6 Tensões Confinantes

As tensões confinantes tendem a limitar a livre expansão do concreto, podendo até suprimi-la. Uma carga de compressão reduz a expansão na direção de aplicação. Esta afirmação é ilustrada na figura 5, em que o carregamento é aplicado apenas na direção 2.

Além disso, segundo CAPRA E BOURNAZEL (1998) quando aplicada uma carga de compressão em uma das direções, a direção ortogonal ao carregamento terá, além da expansão que sofreria normalmente, uma parte referente à expansão restringida na outra direção.

SILVEIRA (1997), que concorda com a teoria que diz que a expansão é causada pela absorção da água pelo gel, apresenta como provável mecanismo de neutralização da expansão pelas tensões confinantes, a restrição que as tensões causam na penetração das partículas de água na estrutura cristalina do gel.

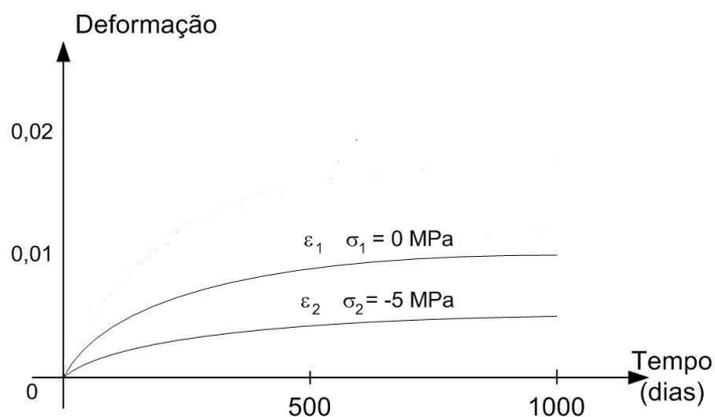


FIGURA 5: EVOLUÇÃO DA EXPANSÃO, NO CASO UNIAXIAL, NO TEMPO
 FONTE: Modificado de CAPRA e BOURNAZEL (1998)

3 MODELOS MATEMÁTICOS

Existe um bom número de modelos que tentam representar a expansão causada pela RAA. Isto ocorre devido à heterogeneidade da reação e sua distribuição aleatória na estrutura, além da falta de conhecimento preciso sobre as reações químicas. Alguns modelos são apresentados, seguindo a classificação dada por PAN *et al.* (2012), tendo algumas considerações discutidas.

3.1 MODELOS TEÓRICOS

Os modelos teóricos são geralmente baseados num volume elementar representativo (VER). O VER consiste num sistema cimento-agregado formado por um agregado esférico circundado por uma camada de material cimentício de espessura uniforme.

O modelo de HOBBS (1981) considera a velocidade da reação proporcional à quantidade de agregado reativo e pode prever o tempo para fissuração e expansão de amostras, mas somente é indicado para análise de argamassas e não de concreto.

O modelo de FURUSAWA, OHGA e UOMOTO (1994) combina a teoria da difusão com um modelo de dilatação que considera que a camada de gel advinda da RAA é formada na interface do agregado e da pasta de cimento. Além disso, o modelo considera que existe uma zona porosa ao redor do agregado e que a expansão do concreto só ocorre quando o volume destes poros é totalmente preenchido com o produto da reação da RAA.

Com o objetivo de representar de forma quantitativa a expansão, BAZANT e STEFFENS (2000) trazem um modelo que considera uma partícula esférica, totalmente reativa, onde a velocidade da reação, assim como seu estágio final, é determinada pela difusão da água de uma camada de gel que se forma ao redor do agregado.

XI *et al.* (1998) propuseram um modelo matemático levando em consideração o acoplamento químico mecânico do processo de expansão da RAA. O modelo foi

aplicado para caracterizar a expansão e a pressão interna gerada pela RAA com agregados reativos de diferentes tamanhos.

3.2 MODELOS MESOSCÓPICOS

A abordagem microscópica, realizada pelos modelos teóricos, traz dificuldades para representar uma estrutura de grande porte. Assim, poucos modelos foram desenvolvidos na escala do agregado. Para se estabelecer uma interface com estruturas de grande porte, alguns modelos foram propostos em escala intermediária.

COMBY-PEYROT *et al.* (2009) apresentaram um modelo que leva em consideração a heterogeneidade do concreto. O modelo utiliza elementos finitos para gerar uma estrutura de concreto tridimensional composta de duas fases onde o comportamento do agregado é considerado elástico linear e da pasta de cimento como elástico não-linear. O mecanismo de expansão da RAA foi simplificado com base em um fenômeno de dilatação isotrópica do agregado reativo. As partículas do agregado são distribuídas randomicamente e sua expansão advinda da RAA segue a variação de volume do esqueleto de concreto já previamente calculado. Este modelo consegue representar com certa precisão a distribuição de trincas e a degradação do concreto.

DUNANT e SCRIVENER (2010) propuseram um modelo onde o dano no concreto é resultado do crescimento de bolsas de gel nos agregados. Um modelo em elementos finitos foi elaborado onde os agregados foram considerados esféricos e bolsas de gel foram geradas aleatoriamente. O comportamento das bolsas de gel foi considerado elástico linear, já o do agregado e da pasta como não-linear. Induzida por tensões impostas, a expansão das bolsas de gel danifica o agregado e a pasta de cimento. Esta abordagem apresentou uma distribuição das trincas advindas da RAA compatível com resultados experimentais.

3.3 MODELOS MACROSCÓPICOS

Vários modelos macroscópicos foram desenvolvidos recentemente no estudo de diversas estruturas afetadas pela RAA. Esta abordagem concentra-se no campo de deslocamentos e tensões e na fissuração observada em estruturas reais afetadas pela RAA. Estes modelos objetivam reproduzir o comportamento observado nestas estruturas, tornando possível prever os efeitos de longo prazo e auxiliando nos processos de reparação.

Grande parte destes modelos foi formulada utilizando-se do método dos elementos finitos (MEF). O comportamento mecânico das estruturas de concreto pode ser simulado como sendo elástico linear ou não linear.

3.3.1 Modelos Paramétricos

Um dos primeiros modelos paramétricos é o apresentado por CHARLWOOD, SOLYMAR e CURTIS (1992). Nele, a expansão advinda da RAA é tratada como uma tensão inicial induzida por uma variação de temperatura. O modelo pode ser definido como simples e eficaz, mas não leva em consideração o mecanismo químico da RAA.

Um modelo paramétrico mais refinado foi apresentado por LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996). O modelo consiste em fatores normalizados de expansão que representam os parâmetros que influenciam a reação álcali-agregado associados pela técnica "CTMR" (C = confinamento, T = temperatura, M = umidade, R = reatividade), que simula a distribuição disforme da expansão. Cada um dos campos da CTMR é gerado, separadamente, e depois normalizados, através das leis de normalização apresentadas na figura 6.

Na figura 6, RH_{\min} e RH_{\max} são as umidades relativas mínimas e máximas consideradas (75% e 100%), T_L e T_{\max} são as temperaturas mínimas e máximas consideradas (18°C e 36°C) e σ_L e σ_{\max} são as tensões mínimas e máximas consideradas (0,3 MPa e 8,0 MPa).

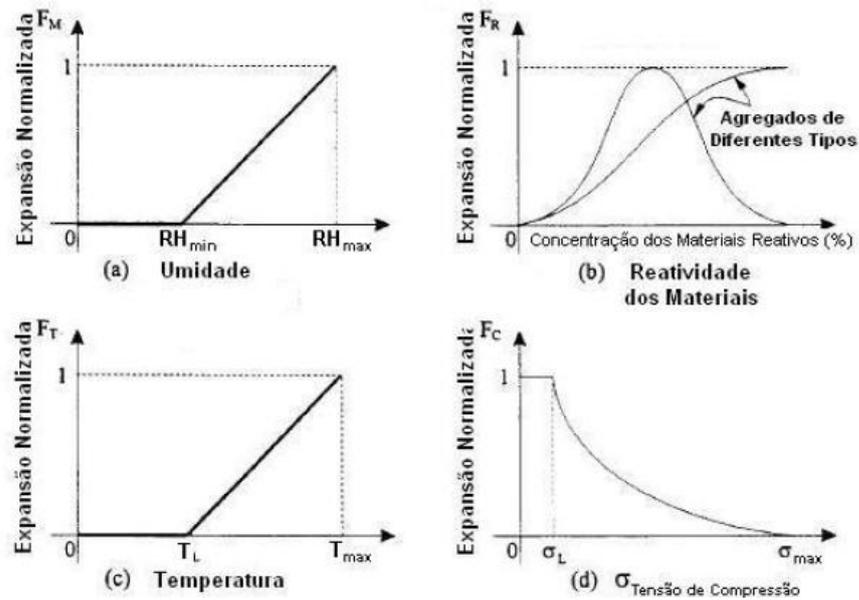


FIGURA 6: NORMALIZAÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A EXPANSÃO DA RAA
 FONTE: LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996)

A associação destes campos gera a distribuição espacial da expansão que é depois calibrada com as medições verificadas em campo. A referida associação é feita pela equação:

$$\epsilon_{RAA} = \beta(t) [F_C(\sigma, t) F_T(t) F_M(t) F_R(t)] \quad , \quad (6)$$

em que β é um parâmetro de calibração, F_C é o fator de confinamento, σ é o tensor de tensões, t é o tempo, F_T é o fator de temperatura, F_M é o fator de umidade e F_R é o fator de reatividade. Os fatores são determinados pelas leis de normalização da figura 6. Além disso, os fatores podem ser considerados transientes. Também é possível considerar alterações nas propriedades do concreto devido ao desenvolvimento da reação o que afetaria o fator de confinamento.

Ainda relacionado ao modelo paramétrico, PIETRUSZCZAK (1996) utiliza os campos de reatividade do material e de estado de tensões para elaborar uma equação constitutiva para modelar a taxa de expansão do concreto devido à RAA:

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = \frac{\epsilon_{vol}^{max} A_1}{A_0} e^{-\frac{A_2 \delta T \sigma}{f_c}} \quad , \quad (7)$$

em que ϵ_{vol}^{max} é o valor assintótico de deformação livre por RAA, A_1 e A_2 são constantes do material, relacionados à reatividade dos constituintes do concreto, f_c é a resistência à compressão uniaxial inicial e $\delta^T \sigma$ são as tensões hidrostáticas.

Baseando-se no modelo paramétrico CTMR de LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) e na equação constitutiva de PIETRUSZCZAK (1996), PAPPALARDO JR. (1998) apresenta um modelo paramétrico com modificações na normalização dos campos de influência e uma nova equação constitutiva:

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = \frac{\epsilon_{vol}^{max} A_1 F_T}{(A_1 F_T + t - t^p F_p)^2} \sqrt{F_c F_M} , \quad (8)$$

em que t^p é um parâmetro relacionado ao tempo de preenchimento dos poros do concreto pelo produto da reação álcali-agregado, F_p é o fator normalizado da porosidade e A_1 passa a se chamar índice de reatividade.

Ao observar a equação, pode-se perceber que, no momento que $A_1 F_T + t = t^p F_p$, ocorrerá uma singularidade. Para que esta seja evitada, CARRAZEDO (2004) propôs a inclusão de uma função *Heaviside*, sobre t e $t^p F_p$, que ao mesmo tempo faz com que a taxa de expansão seja apenas calculada após o preenchimento completo dos poros. Tal modificação é apresentada na equação abaixo:

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = H(t - t^p F_p) \frac{\epsilon_{vol}^{max} A_1 F_T}{(A_1 F_T + t - t^p F_p)^2} \sqrt{F_c F_M} , \quad (9)$$

em que H é a função Heaviside, ϵ_{vol}^{max} é o valor assintótico de deformação volumétrica livre por RAA, A_1 é o índice de reatividade, F_p , F_c , F_m e F_t são os fatores normalizados de influência devido à porosidade, tensões, umidade e temperatura respectivamente e t^p é a idade em que ocorreu o preenchimento dos poros do concreto com o gel formado pela reação.

Com o intuito de apresentar uma alternativa mais simples para representar a reação álcali-agregado, uma nova equação constitutiva foi desenvolvida por CARRAZEDO (2004). Observando a figura 7 (que é a rerepresentação da figura 3, apresentada no capítulo 2) é possível verificar que uma função exponencial, baseada na equação (7) de PIETRUSZCZAK (1996), na forma da equação (10), consegue representar suas características básicas:

$$f(t) = H(t - t^p)[a_0 - a_1 e^{-a_2(t-t^p)}], \quad (10)$$

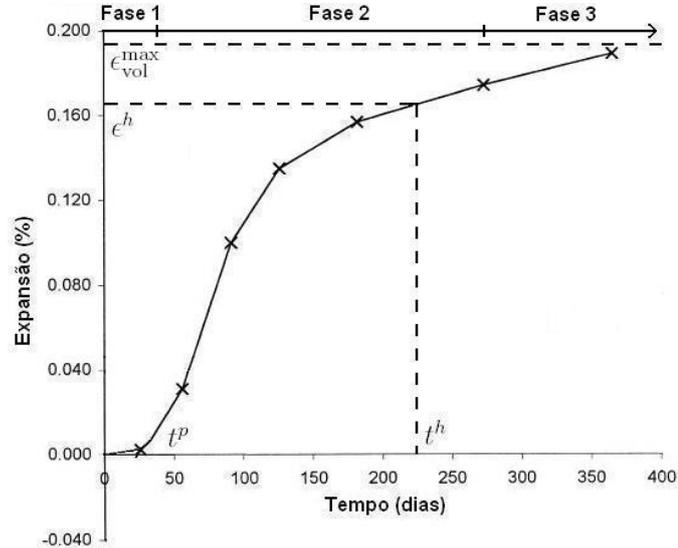


FIGURA 7: EXPANSÃO EM CORPO DE PROVA SUBMETIDO A ENSAIO ACELERADO
 FONTE: Modificado de BODDY, HOOTON e THOMAS (2000)

Considerando $f(t)$ como sendo a expansão volumétrica devido à RAA (ϵ_{RAA}), t^h um tempo qualquer e ϵ^h a expansão correspondente, as seguintes condições podem ser observadas na figura 7:

$$\epsilon_{RAA} = 0 \rightarrow t = 0 \dots t^p \quad (11)$$

$$\epsilon_{RAA} = \epsilon^h \rightarrow t = t^h \quad (12)$$

$$\epsilon_{RAA} = \epsilon_{vol}^{max} \rightarrow t = \infty \quad (13)$$

Por estas condições e após algumas manipulações algébricas, os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 são dados por:

$$a_0 = a_1 = \epsilon_{vol}^{max} \quad a_2 = \frac{\ln\left(\frac{\epsilon_{vol}^{max} - \epsilon^h}{\epsilon_{vol}^{max}}\right)}{t^h - t^p} \quad (14)$$

Substituindo os coeficientes da equação (14) na equação (10), a equação se torna:

$$\epsilon_{RAA} = H(t - t^p) \left[\epsilon_{vol}^{max} - \epsilon_{vol}^{max} e^{-\frac{\ln\left(\frac{\epsilon_{vol}^{max} - \epsilon^h}{\epsilon_{vol}^{max}}\right)}{t^h - t^p}(t - t^p)} \right], \quad (15)$$

Antes de completar a equação com os fatores de influência, é possível perceber que a_2 tem o papel inverso de A_1 , o índice de reatividade da equação (9), visto que ambos alteram a velocidade com que a expansão atinge seu pico. CARRAZEDO (2004) verificou a necessidade de introduzir os fatores de influência da temperatura, umidade, porosidade e estado de tensões na equação (15) para que esta possa representar os efeitos destes campos. Observando a ação de cada parâmetro, a equação fica da seguinte forma:

$$\epsilon_{RAA} = H(t - t^p F_p) \epsilon_{vol}^{max} \left[1 - e^{-\frac{-(t - t^p F_p)}{A_2 F_T}} \right] \sqrt{F_C F_M}, \quad (16)$$

em que $A_2 = 1/a_1$. Para obter a taxa de expansão volumétrica devido à RAA, diferencia-se a equação (16) em relação ao tempo. Assim:

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = H(t - t^p F_p) \epsilon_{vol}^{max} \left[\frac{e^{-\frac{-(t - t^p F_p)}{A_2 F_T}}}{A_2 F_T} \right] \sqrt{F_C F_M}, \quad (17)$$

Porém decorre do uso da função Heaviside que não ocorrerão expansões devido à RAA antes de t^p . Em consequência disso, dependendo do passo de tempo adotado, um erro poderá estar sendo incluso na análise, que pode ser minimizado com o refinamento da discretização temporal. A alternativa empregada por CARRAZEDO (2004) foi a adoção de uma lei de conversão “tipo escada” para F_p (figura 12) e adotar um passo de tempo tal que t^p seja múltiplo desse valor, fazendo com que t^p esteja sempre no início de um passo de tempo.

3.3.2 Modelos Químico-Mecânicos

HUANG e PIETRUSZCZAK (1999) propuseram um modelo que utiliza os efeitos termomecânicos da reação álcali-agregado ao associar às relações

constitutivas para materiais elásticos, a deformação volumétrica devido à expansão do gel de sílica, e a degradação das propriedades do material devido à RAA.

ULM *et al.* (2000) desenvolveram outro modelo que considera a cinética da reação e os efeitos da expansão da RAA. O modelo assume que os produtos da RAA preenchem os poros e microfissuras da matriz de cimento induzindo uma pressão sobre o esqueleto de concreto.

FAIRBARN *et al.* (2005) apresentaram um modelo que permite a simulação da isotropia da RAA induzida pelo estado de tensões. Este modelo foi utilizado para prever o desenvolvimento da RAA em uma barragem de concreto e os deslocamentos calculados tiveram boa concordância com os observados em campo.

O modelo de SAOUMA e PEROTTI (2006) considera a influência do estado de tensões sobre a expansão da RAA. O modelo assume que tensões de compressão elevadas ou tensões de tração inibem a expansão da RAA. O modelo considera a expansão como anisotrópica e a deterioração das propriedades mecânicas do material. Este modelo foi aplicado na análise de uma barragem em arco-gravidade.

POYET *et al.* (2007) propuseram uma nova lei para a cinética da reação de expansão da RAA considerando a influência da água e da temperatura. O modelo reológico foi utilizado para o reforço de vigas de concreto.

3.3.3 Modelos Numéricos Utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica para se resolver equações diferenciais levando em conta sua formulação variacional, tendo como fundamentação a discretização do seu domínio. O método permite modelagens complexas, não somente do ponto de vista geométrico, mas também do ponto de vista do comportamento não-linear dos materiais. Desta forma, permite a solução de complexas equações.

Assim, o método pode ser utilizado para determinar desde resultados apenas qualitativos até resultados bastante precisos (mas que ainda devem ser interpretados cuidadosamente), dependendo apenas da quantidade de fatores que influenciam a reação álcali-agregado considerados e da precisão da equação utilizada.

O modelo de ADEGHE, HINDY e HO (1995) simula a expansão causada pela RAA através da analogia do campo de expansões térmicas. A técnica sugere a aplicação de cargas térmicas no intuito de representar as expansões medidas em campo. Porém, este modelo produz resultados bastante limitados, que devem ser interpretados apenas de forma qualitativa. Isto ocorre devido às deformações provocadas pela RAA sofrerem a influência de diversos fatores, inclusive a temperatura.

O modelo proposto por BERNARDES, ANDRÉ e CASTRO (1997) se utiliza da técnica de retro-análise que consiste em determinar parâmetros relativos às características da estrutura, como geometria e propriedades dos materiais, alterados pela reação, através do conhecimento das ações e efeitos, como a deformação, a que a estrutura está submetida.

Através de um processo de minimização, é possível reduzir a diferença entre valores obtidos matematicamente e valores observados na estrutura. No artigo de BERNARDES, ANDRÉ e RODRIGUES (2001), a técnica de retro-análise é utilizada para calibrar o modelo de analogia à expansão térmica em uma estrutura considerada de comportamento elástico-linear.

Modelos paramétricos também podem se utilizar das técnicas de MEF. A associação de diversos campos permite a esta técnica atingir resultados bastante precisos, dependendo apenas de medições realizadas na estrutura real. Além disso, pode ser realizado um processo de otimização sobre os resultados do modelo numérico para que a combinação dos campos que influenciam a RAA possa representar devidamente as expansões observadas em campo.

PAPPALARDO JR. (1998) aplica seu modelo na barragem de Billings-Pedras, Brasil, e LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) aplicam seu modelo em um vertedouro de um complexo hidrelétrico no Quebec, Canadá, ambos utilizando o método dos elementos finitos para efetuar a simulação numérica.

CAPRA e SELIER (2003) publicaram um artigo com um modelo levemente modificado fazendo uma aplicação em uma viga submetida à RAA, utilizando o método dos elementos finitos. Devido à precisão do modelo, foi possível incluir os efeitos deletérios nas propriedades do concreto, além de ter sido possível determinar o dano causado pela RAA.

No intuito de avaliar o envelhecimento de estruturas de concreto massa, LEHTOLA *et al.* (1997) elaboraram em seu artigo um modelo que considera as parcelas de fluência e variação de temperatura ao longo do tempo.

CAVALCANTI, SILVEIRA e DEGASPARE (2001) utilizam um modelo parecido, porém adicionam o fenômeno de relaxação de tensões, aplicando o modelo elaborado na Usina Hidrelétrica de Paulo Afonso IV. Uma outra consideração importante foi a anisotropia da taxa de expansão do gel, em que as taxas de expansão nas direções horizontais foram reduzidas em relação à taxa de expansão vertical.

3.4 MODELO ADOTADO NESTA DISSERTAÇÃO

A proposta desta dissertação é dar continuidade ao projeto de pesquisa iniciado por CARRAZEDO (2004). Desta forma o modelo escolhido para simular a RAA será baseado no modelo paramétrico proposto por CARRAZEDO (2004), com a inclusão do decaimento do módulo de elasticidade do concreto sugerido por PIETRUSCZAK (1996), aplicado ao programa comercial de elementos finitos ANSYS®.

4 METODOLOGIA ADOTADA PARA A MODELAGEM NUMÉRICA

Baseada em CARRAZEDO (2004), a metodologia adotada para obter os efeitos da RAA em estruturas de concreto consiste em obter a distribuição espacial dos fatores que influenciam a reação álcali-agregado, normalizar estes fatores e depois utilizar uma equação constitutiva para combiná-los e obter a taxa de deformação volumétrica devido à RAA. Além disso, o modelo proposto introduz o decaimento do módulo de elasticidade ao longo do progresso da RAA. Um esquema para melhor visualizar a metodologia é apresentado na figuras 8, que apresenta a metodologia proposta por CARRAZEDO (2004). Dentro do retângulo vermelho da figura 8 está compreendida a metodologia deste trabalho, detalhada na figura 9.

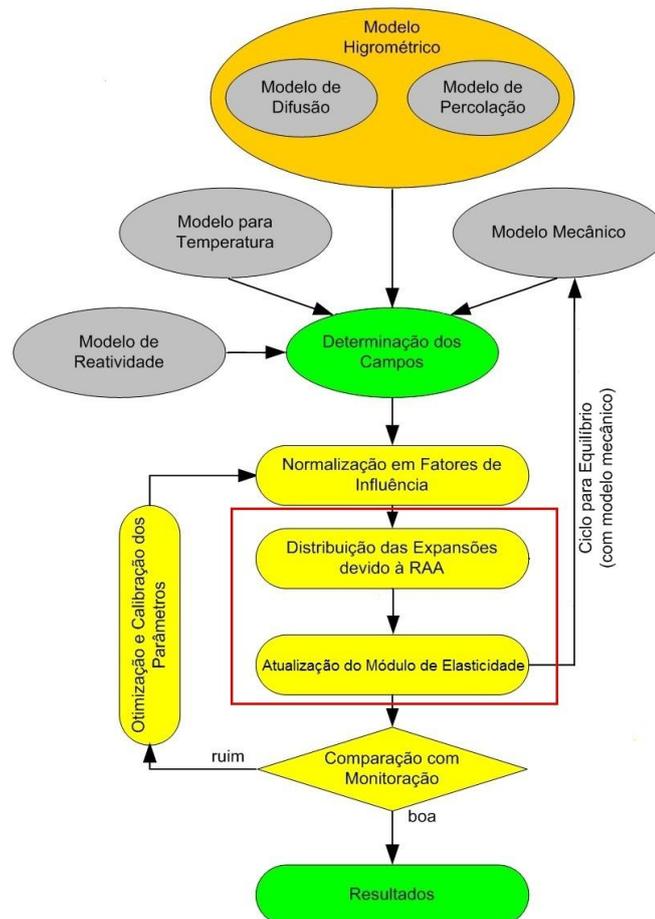


FIGURA 8: METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DAS EXPANSÕES DEVIDO À RAA
 FONTE: Modificado de CARRAZEDO (2004)

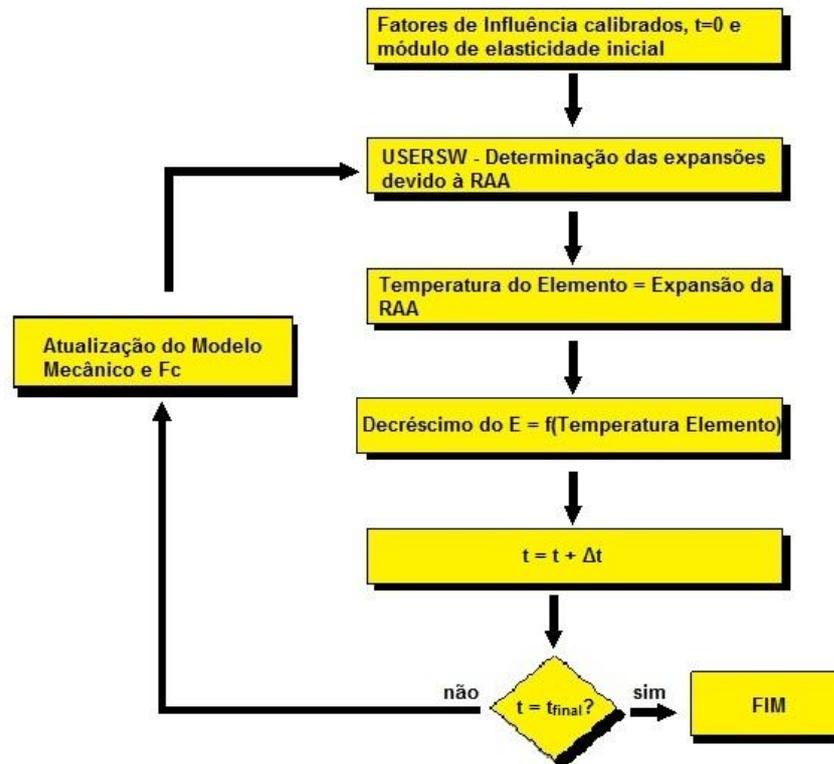


FIGURA 9: METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DAS EXPANSÕES DEVIDO À RAA
 FONTE: O autor (2013)

Uma vez definidos os campos de umidade, por meio de uma análise higrométrica (de percolação e difusão), os campos de temperatura e de reatividade, além do campo de tensões, de acordo com os diversos esforços sob os quais a estrutura está submetida. Estes campos são normalizados e utilizados no cálculo das expansões impostas pela RAA, por meio de uma equação. Este trabalho utiliza os fatores de calibração já normalizados e calibrados por CARRAZEDO (2004) (como visto na tabela 3).

A rotina **USERSW** do ANSYS® recebe os valores de influência normalizados e os utiliza para calcular e retornar as expansões devido à RAA.

Estas expansões são utilizadas para atribuir uma temperatura fictícia aos elementos, sendo que esta temperatura determina o novo módulo de elasticidade da região. Como esta mudança do módulo e as expansões impostas pela RAA modificam o modelo mecânico, este é recalculado até o último passo de tempo. É

importante destacar que o parâmetro F_c também é atualizado a cada passo de tempo.

Deve-se observar que neste trabalho não serão consideradas as inter-relações entre os campos de umidade, temperatura e tensões.

4.1 FATORES DE INFLUÊNCIA

A temperatura e a umidade são obtidas em análises separadas, pois são consideradas desacopladas da reação álcali-agregado. Ou seja, causam influência na formação do gel, porém não são influenciadas pelo gel resultante.

A reatividade dos constituintes, devido à sua distribuição desconhecida e não-homogênea, será considerada constante ao longo de toda a estrutura.

Já as tensões são alteradas pelas deformações causadas pelo gel. Assim, além da consideração dos esforços principais da estrutura, será considerado um ajuste nas tensões devido à influência do gel. As tensões também são modificadas devido à mudança no módulo de elasticidade.

Embora não faça parte do escopo deste trabalho a obtenção dos campos de influência da RAA, estes são melhor detalhados nas seções 4.1.1 a 4.1.5 visando a compreensão das minúcias da RAA.

4.1.1 Temperatura

A temperatura modifica a velocidade em que o gel é formado. Desta forma, a temperatura influencia na velocidade em que a estrutura expande, porém não influencia na expansão final do material.

Para modelar a temperatura, uma breve revisão da formulação é feita a seguir. Sendo q a taxa de calor gerado, considerado independente da temperatura, k a condutividade térmica, ρ a densidade do material e c o calor específico, a equação (18) representa a condução de calor para sistemas não-estacionários em um elemento qualquer, que determina a distribuição da temperatura, assim como a sua variação ao longo do tempo.

$$\frac{k}{\rho c} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + \frac{q}{T} , \quad (18)$$

São prescritas as condições de contorno e iniciais, conforme mostrado na figura 10.

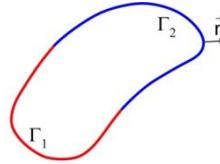


FIGURA 10: CONDIÇÕES DE CONTORNO
 FONTE: CARRAZEDO (2004)

Considerando x um ponto no contorno, as condições de contorno e iniciais podem ser escritas na forma:

$$T = f(x) \forall x \in \Gamma_1 \quad (19)$$

quando a temperatura em uma parte do contorno (Γ_1) é prescrita e

$$Q = -k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \aleph + \aleph_c + \aleph_r \quad \forall x \in \Gamma_2, \quad (20)$$

quando o fluxo de calor na direção da normal (\vec{n}) é prescrito em uma parte do contorno (Γ_2). Reconhece-se \aleph como fluxo de calor específico, \aleph_c como fluxo de calor convectivo e \aleph_r como fluxo de calor radiativo pelas equações:

$$\aleph_c = \alpha(T - T_a) \quad (21)$$

$$\aleph_r = \xi \nu (T^4 - T_a^4), \quad (22)$$

em que α é o coeficiente de transferência de calor na superfície, ξ é a emissividade da superfície, ν é a constante de Stefan-Boltzman e T_a é a temperatura ambiente.

4.1.2 Percolação da Água no Concreto

A umidade é preponderante na formação do gel da RAA. Os íons hidroxila são necessários para provocar a expansão do gel, além de prover a sua mobilidade na estrutura. A umidade é utilizada, na metodologia, para determinar dois campos, o de umidade propriamente e o de porosidade.

Como a equação diferencial que rege o problema de percolação em meios porosos não deformáveis é análoga à equação de transmissão de calor por condução, o campo de umidade pode ser obtido através de um problema térmico equivalente.

Se a análise for considerada estacionária e não havendo fluxo no elemento, a equação diferencial pode ser simplificada e toma a forma da equação de Laplace:

$$\nabla^2 T = 0 , \quad (23)$$

em que T , nesse caso, é a umidade.

Como não há fluxo, a única condição de contorno existente é a de umidade prescrita em uma parte do contorno. Esta umidade é na verdade aplicada como potencial hidráulico, em que a força exercida pela água é utilizada para definir o nível de saturação da estrutura.

A análise de percolação define uma superfície de saturação, onde abaixo desta superfície a estrutura encontra-se totalmente saturada e acima há uma semi-saturação do meio. A partir desta superfície, uma análise de difusão da água é realizada para determinar o nível de saturação da parte semi-saturada.

4.1.3 Difusão da Água no Concreto

Após definir a superfície de saturação, que é uma fronteira entre a porção saturada e a porção semi-saturada da estrutura, através da análise de percolação, uma análise de difusão é realizada para determinar a umidade relativa na parte semi-saturada.

Esta análise é realizada a partir da analogia de um problema térmico, simplificada, porém considerando o coeficiente de difusão como um coeficiente não-linear. Utiliza-se a superfície de saturação como uma condição de contorno e, nas outras partes do contorno, utiliza-se a umidade prescrita.

O coeficiente de difusão, proposto por BAZANT e NAJJAR (1971) é obtido através da umidade, como pode ser visto na figura 11 em que para umidades baixas o coeficiente é estimado em $0,0191 \text{ cm}^2$ por dia e em regiões em que a umidade relativa é alta, o coeficiente é estimado em $0,3820 \text{ cm}^2$ por dia.

A transição brusca, vista na figura 11, é devido ao mecanismo de transporte, em que em um meio saturado ocorre por percolação, muito mais rápido, enquanto em um meio não saturado ocorre por capilaridade.

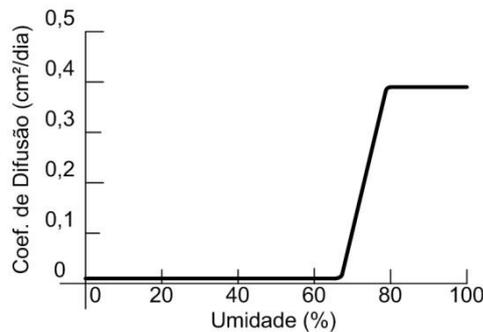


FIGURA 11: COEFICIENTE DE DIFUSÃO NÃO-LINEAR DO CONCRETO
 FONTE: BAZANT e NAJJAR (1971) em PAPPALARDO JR. (1998)

4.1.4 Reatividade dos Constituintes

Em uma estrutura de grande porte são utilizados agregados de diversas fontes, sendo que alguns destes locais podem conter agregados reativos. Estes agregados são utilizados no concreto misturados a outros agregados não-reativos, provocando uma distribuição não-homogênea, levando a existência de pontos na estrutura onde há uma concentração maior de agregados reativos do que em outros pontos.

Como esta distribuição é desconhecida, o campo relacionado com a reatividade dos constituintes é considerado constante ao longo de toda a estrutura, ou seja, o concreto é considerado uniformemente reativo, isotrópico. Desta forma, a reatividade dos constituintes do concreto foi representada na formulação por apenas duas constantes do material.

A primeira constante do material tem como função definir a máxima deformação volumétrica que o concreto pode ter (ϵ_{vol}^{max}) e a segunda constante tem como função definir a velocidade com que as deformações vão ocorrer (A_2).

4.1.5 Tensões

A partir dos esforços principais, é feita uma análise inicial das tensões, sem considerar as deformações causadas pela RAA. Sobre esta análise, são acrescentadas

as deformações devido à RAA (que geram pressões internas e tensões confinantes quando restringidas), fazendo com que o modelo mecânico deva ser recalculado.

Como o concreto foi considerado um material elástico, o modelo constitutivo para o concreto sujeito à reação álcali-agregado se torna:

$$\epsilon = \epsilon_{ELÁSTICA} + \epsilon_{RAA} \quad (24)$$

$$\epsilon = C^e \sigma + \epsilon_{RAA}, \quad (25)$$

em que ϵ são as deformações totais do sistema, C^e é a inversa da matriz de rigidez elástica, σ são as tensões no corpo, $\epsilon_{ELÁSTICA}$ são as deformações elásticas e ϵ_{RAA} são as deformações devido à RAA. Em um corpo tridimensional, as matrizes são definidas como:

$$\epsilon^T = [\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \epsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}] \quad (26)$$

$$\sigma^T = [\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}] \quad (27)$$

$$C = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

em que E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson. Sendo u, v e w as componentes do vetor de deslocamentos, o vetor de deformações pode ser obtido pela formulação indicada abaixo.

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (29)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (30)$$

Cabe observar que ainda podem ser considerados outros efeitos comuns no concreto como deformação lenta e relaxação. Além disso, a matriz C deverá ser recalculada, já que a RAA provoca queda no módulo de elasticidade.

4.2 REDUÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Segundo BEER e JOHNSTON (1996), o módulo de elasticidade (E), ou módulo de Young, é um coeficiente que, para pequenas deformações, relaciona a deformação elástica longitudinal de um material ($\epsilon_{ELÁSTICA}$) com a tensão a que ele está submetido (σ), conforme a equação:

$$\sigma = E \cdot \epsilon_{ELÁSTICA} \quad (31)$$

Quanto mais alto o valor do módulo de elasticidade, menor será a deformação do material. Além disso, deve-se lembrar que a $\epsilon_{ELÁSTICA}$ é um parâmetro adimensional.

Conforme a RAA avança se observa uma deterioração nas propriedades do concreto, entre elas o decaimento no módulo de elasticidade.

A simulação no decaimento do módulo de elasticidade segue a equação abaixo apresentada por PIETRUSCZAK (1996):

$$E = E_0 \left[1 - (1 - B_1) \frac{g_3}{\epsilon_{vol}^{max}} \right] \quad (32)$$

em que E é o módulo de elasticidade reduzido num instante de tempo t , E_0 é o módulo de elasticidade inicial do concreto (sem a degradação pela RAA), B_1 é uma constante que representa o percentual máximo de degradação do módulo de elasticidade provocado pela RAA, limitado entre 0 e 1, e g_3 representa a deformação devido à RAA (ϵ_{RAA}) observada num instante de tempo t e varia de 0 a ϵ_{vol}^{max} . De modo a introduzir a variação temporal a equação (32) pode ser reescrita como:

$$E(t) = E_0 \left[1 - (1 - B_1) \frac{\epsilon_{RAA}(t)}{\epsilon_{vol}^{max}} \right] \quad (33)$$

4.3 NORMALIZAÇÃO EM FATORES DE INFLUÊNCIA

Após a determinação dos campos de influência, estes são normalizados em fatores de influência por meio de leis lineares, apresentadas na figura 12, que são regidas pelos valores k_p , k_c , k_m e k_t . Cada lei de conversão foi determinada para representar o efeito correspondente pelo respectivo campo no processo expansivo, além das variáveis citadas serem alteradas durante o processo de otimização, para que a parcela de cada fator na taxa de expansão (e na expansão) possa ser ajustada.

Os limites utilizados para as leis de normalização (ou conversão) são os mesmos utilizados por CARRAZEDO (2004). Apesar disso, os limites podem ser levemente alterados, se necessário, mantendo a relação com a influência real dos campos.

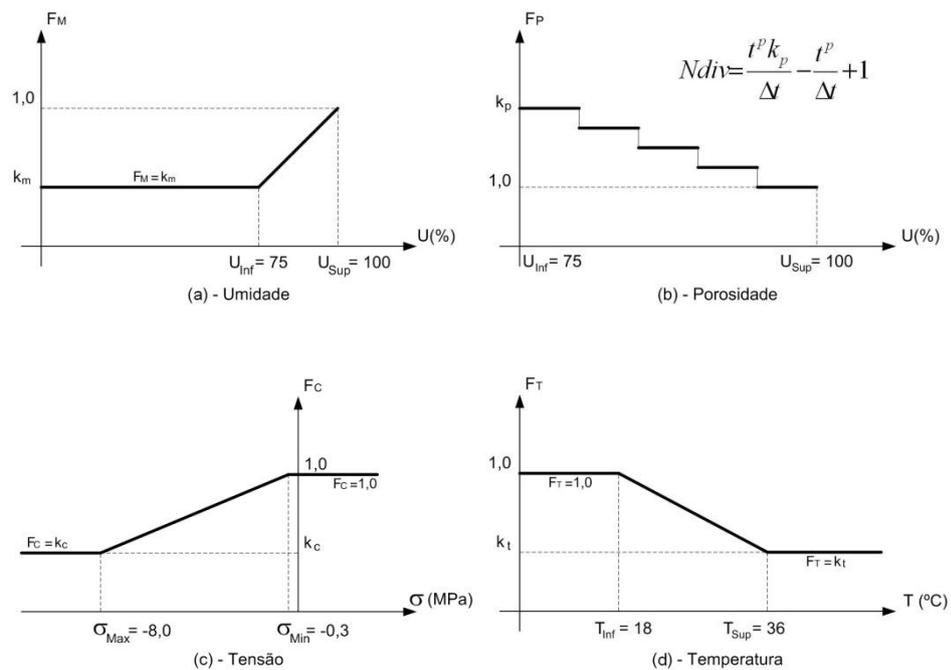


FIGURA 12: FATORES DE INFLUÊNCIA (F_M , F_P , F_C e F_T) E DE CALIBRAÇÃO (k_m , k_p , k_c , k_t)

FONTES: (a), (c) e (d) PAPPALARDO JR. (1998), (b) CARRAZEDO (2004)

Nota: N_{div} é o número de divisões da lei de conversão de porosidade, t^p é o tempo de preenchimento dos poros e Δt é o tempo de passo adotado.

4.4 EQUAÇÃO ADOTADA

A equação (34), já apresentada neste trabalho, utilizada para simular a taxa de expansão volumétrica devido à RAA é a mesma utilizada por CARRAZEDO (2004):

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = H(t - t^p F_P) \epsilon_{vol}^{max} \left[\frac{e^{-\frac{(t-t^p F_P)}{A_2 F_T}}}{A_2 F_T} \right] \sqrt{F_C F_M} \quad (34)$$

4.5 IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Esta metodologia foi implementada num computador com processador AMD Turion™ II X2 M500 (2.2 GHz, 1MB L2 Cache), 3GB de memória RAM e HD com 320 GB no programa comercial de elementos finitos ANSYS® que possibilita a inclusão de rotinas programáveis pelo usuário, chamadas “*User Programmable Features*” (UPF), através da linguagem “*ANSYS® Parametric Design Language*” (APDL). Dentre as diversas rotinas que o programa dispõe e permite a alteração e manipulação, a escolhida para o uso foi a **USERSW**, rotina que permite ao usuário introduzir uma lei de expansão aos elementos e, por isso apropriada para representar a RAA. Nesta rotina, foram programadas as chamadas às funções de conversão dos campos necessários para o processo (leis de normalização) assim como a função que calcula a taxa de expansão devido à RAA, na linguagem de programação FORTRAN®.

Durante o processo de cálculo, quando requisitada a expansão devido à RAA, o ANSYS® chama a rotina **USERSW**, emitindo os dados necessários à rotina, como, por exemplo, as expansões nas direções principais, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

A cada passo de tempo o módulo de elasticidade de toda a estrutura é atualizado.

A simulação no decaimento do módulo de elasticidade segue a equação (33).

A variação do módulo de elasticidade é obtida de forma indireta. Na simulação, o material utilizado para o concreto tem seu módulo de elasticidade (E) variando conforme a temperatura (T) de forma linear (Equação (35)).

$$E(T) = \left(\frac{E_{final} - E_0}{T_{final}} \right) \cdot T + E_0, \quad (35)$$

em que E_{final} é igual ao módulo de elasticidade degradado pela RAA (igual a $E_0 \cdot B_1$), E_0 é o módulo de elasticidade inicial do concreto (sem a degradação pela RAA), T_{final} é uma temperatura fictícia igual a ϵ_{vol}^{max} atribuída para simular o decaimento do módulo de elasticidade esperado, T recebe os valores de $\epsilon_{RAA}(t)$. Desenvolvendo a equação (35) facilmente se observa que ela é análoga à equação (33):

$$E(t) = \left(\frac{E_0 \cdot B_1 - E_0}{\epsilon_{vol}^{max}} \right) \cdot \epsilon_{RAA}(t) + E_0 \quad (36)$$

$$E(t) = E_0 \left[1 - (1 - B_1) \frac{\epsilon_{RAA}(t)}{\epsilon_{vol}^{max}} \right] \quad (37)$$

Todos os valores da equação (33) são constantes exceto o $\epsilon_{RAA}(t)$, o que indica que a curva da variação do módulo de elasticidade *versus* tempo deverá ter um comportamento oposto ao da curva de expansão devido à RAA *versus* tempo, como apresentado nos gráficos 1 e 5 nas seções 5.1.1 e 5.1.3, respectivamente.

A partir dos valores de temperatura, umidade e tensões de cada elemento, são chamadas as funções que normalizam estes campos nos fatores de influência (de temperatura, umidade, porosidade e tensões) para em seguida determinar, através da equação constitutiva, a taxa de expansão devido à RAA.

Nesta dissertação a rotina **USERSW** tratará a expansão da RAA como isotrópica considerando esta igual à média aritmética das expansões das direções principais. Para se introduzir a ortotropia da RAA é necessário substituir a rotina **USERSW** pela rotina **USERCR** como mostrado por CARRAZEDO, SANCHES e LACERDA (2012).

A rotina **USERSW**, assim como as funções de normalização dos campos, podem ser vistas no apêndice A. A implementação da rotina, na linguagem *APDL*, pode ser vista no apêndice B.

4.6 ESCOLHA DO ELEMENTO FINITO

O elemento escolhido para a modelagem foi o elemento sólido tetraédrico quadrático de dez nós, **SOLID92** (visto na figura 13), pois dá suporte à rotina **USERSW**.

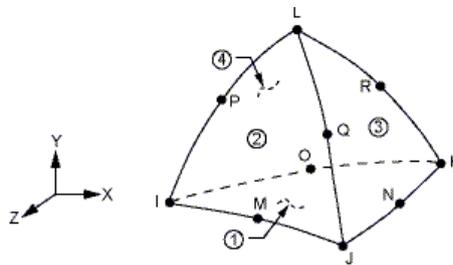


FIGURA 13: SOLID92
FONTE: ANSYS®

4.7 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Não foram poucas as tentativas para a implementação da atualização do módulo de elasticidade. Inicialmente, optou-se pela associação da rotina **UELMTX** rotina que permite acessar a matriz de um elemento, podendo alterar a matriz de rigidez elástica da estrutura ao final de cada passo de tempo, com a **USERSW**. Esta solução mostrou-se ineficaz uma vez que a cada passo de tempo os valores de deformação advinda da RAA eram perdidos.

Após esta tentativa optou-se pela tentativa de implementar a equação de CARRAZEDO (2004) na rotina **USERCR**, que permite ao usuário introduzir uma lei de deformação aos elementos, modificando o módulo de elasticidade via rotina **UELMTX**. Esta tentativa também se mostrou ineficaz já que a cada passo de tempo os valores de deformação advinda da RAA também eram perdidos.

Outra tentativa foi utilizar a equação exponencial de deformação lenta via *APDL*:

$$\epsilon_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} (C_5 \sigma^{C_3} e^{-C_4/T}) e^{-rt} \quad (38)$$

Neste caso a atualização do módulo de elasticidade se daria via APDL. Esta solução também se mostrou ineficaz, pois os valores de deformação advindos do **USERCR** também eram perdidos ao final de cada passo de tempo.

Por fim, optou-se pela solução apresentada neste trabalho, que utiliza a **USERSW** com as modificações no módulo de elasticidade ocorrendo de forma indireta e via APDL, conforme explicado na seção 4.5 e visto no apêndice deste trabalho. Esta solução, apesar de eficaz, apresenta um código muito extenso.

4.8 APLICAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO

Visando auxiliar na aplicação prática do modelo proposto, esta seção apresenta algumas considerações sobre a obtenção prática dos parâmetros das equações 33 e 34. Assumindo que os fatores de influência (F_p , F_c , F_m e F_t) de concentração já foram amplamente discutidos nas seções 3.3.1 e 4.3, esta seção irá se concentrar nos demais parâmetros das equações.

O parâmetro E_0 pode ser obtido através da análise de corpos de prova de concreto das estruturas extraídos antes da estrutura apresentar sinais de deterioração por RAA.

O parâmetro B_1 pode ser obtido através de ensaios de expansão acelerada em corpos de prova moldados com um concreto de características semelhantes ao da estrutura analisada ou de dados da literatura, como os mostrados na seção 2.4.

O parâmetro t^p pode ser adotado como o tempo em que a estrutura apresentou os primeiros sinais de deterioração por RAA e o parâmetro ϵ_{vol}^{max} também pode ser obtido através de ensaio de expansão acelerada como visto da figura 2.

5 DESCRIÇÃO DO MODELO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para comprovar o devido funcionamento da metodologia apresentada no capítulo 4, foi realizado um estudo em dois modelos. O primeiro modelo diz respeito a um corpo de prova, submetido a uma força de compressão. Uma vez que o primeiro modelo foi validado, utilizou-se a metodologia no estudo de um segundo modelo representando uma pequena barragem fictícia.

5.1 CORPO DE PROVA

Para a simulação do corpo de prova foi utilizado um modelo tridimensional de elementos finitos, de 625 elementos tetraédricos de 10 nós. Este modelo é o mesmo utilizado por CARRAZEDO (2004) e pode ser visto na figura 14.

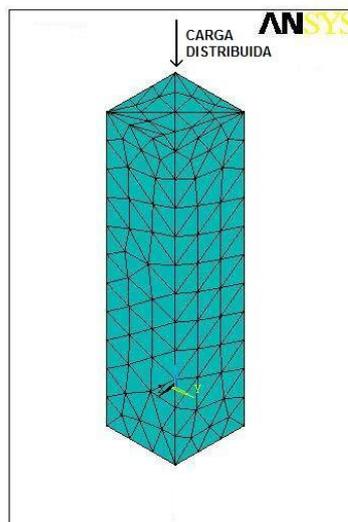


FIGURA 14: MODELO TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA
FONTE: CARRAZEDO (2004)

No modelo não foram considerados os fenômenos não-lineares do concreto (fluência, relaxação e fissuração). Já quanto às alterações nas propriedades físicas, o modelo leva em consideração o decaimento no módulo de elasticidade. O coeficiente de Poisson foi considerado igual a 0,2, a condutividade térmica isotrópica igual a 2,367 kcal/mh°C e calor específico de 0,23 kcal/kg°C. Além disso, o corpo de

prova foi submetido a uma força de compressão igual a 22800N. As dimensões do corpo de prova são iguais a 7,5 x 7,5 x 30 centímetros.

5.1.1 Calibração do Modelo

Os parâmetros utilizados na equação (34), resultantes de processos de otimização e calibração com dados experimentais, são, com exceção do t^p , os mesmos adotados por CARRAZEDO (2004) e estão apresentados na tabela 3.

TABELA 3: CORPO DE PROVA - PARÂMETROS ADOTADOS

VARIÁVEL	VALOR ADOTADO	SIGNIFICADO
A_2	250 dias	Define o tempo necessário para que o processo expansivo se estabilize
ϵ_{vol}^{max}	0,001737	Máxima deformação volumétrica esperada em um ensaio livre de tensões
t^p	0	Tempo de preenchimento dos poros pelo gel expansivo produzido pela RAA
F_p (umidade 100%)	1,00	Modifica o início do mecanismo expansivo da RAA, a partir de t^p
F_t (temperature 38°)	0,20	Modifica a velocidade das expansões por RAA
F_m (umidade 100%)	1,00	Regula a importância da umidade no processo expansivo
F_c (livre de restrições)	1,00	Regula a importância das tensões confinantes no processo expansivo

FONTE: CARRAZEDO (2004)

É importante ressaltar que CARRAZEDO (2004) adotou o parâmetro t^p igual a 52 dias, mas, nesta dissertação este parâmetro foi adotado como igual a 0 (zero), pois ao adotar qualquer valor diferente deste o modelo apresente uma série de erros e trava.

O gráfico 1 apresenta uma comparação entre as expansões volumétricas devido à RAA, considerando o módulo de elasticidade constante, entre o modelo proposto e o de CARRAZEDO (2004).

É importante ressaltar que este trabalho define como expansão volumétrica a deformação específica isotrópica exclusiva por RAA, resultante da média aritmética das expansões das direções principais.

A diferença entre as curvas dos dois modelos do gráfico 1 deve-se ao fato de que o modelo de CARRAZEDO (2004) só calcula a taxa de expansão da RAA após o preenchimento completo dos poros o que ocorre em $t^p = 52$ dias. Já o modelo proposto, devido a limitações, calcula a taxa de expansão da RAA desde o tempo zero. Entretanto, ao final do último passo de tempo a expansão volumétrica devido à RAA nos dois modelos converge para valores muito próximos (para o modelo proposto é igual a $1.72e^{-3}$ e para CARRAZEDO (2004) é igual a $1.74e^{-3}$) o que demonstra a equivalência entre os modelos ao final do processo.

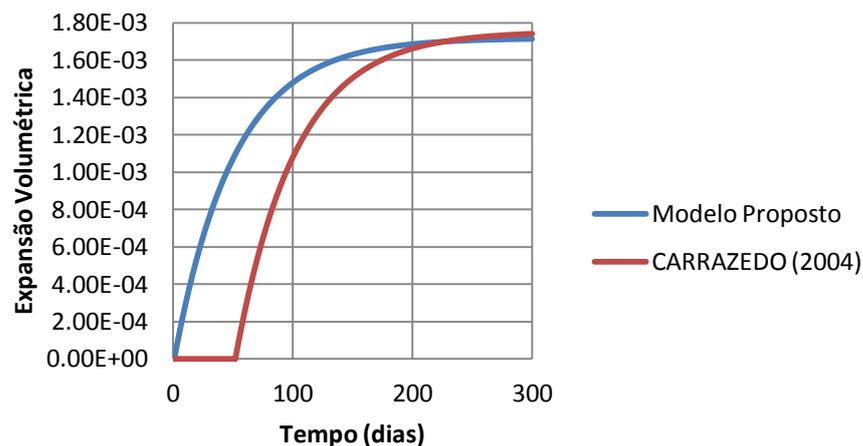


GRÁFICO 1: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS
FONTE: O autor (2013)

5.1.2 Decaimento do Módulo de Elasticidade

Como apontado por MARZOUK e LANGDON (2003) o avanço da RAA provoca alterações nas propriedades físicas do concreto. O modelo proposto neste trabalho tem como objetivo introduzir o decaimento do módulo de elasticidade no modelo CARRAZEDO (2004) e para isso utiliza a equação (33) com E_0 igual a 29 GPa e B_1 igual a 0,7 (como sugerido por PIETRUSCZAK (1996)).

Para comprovar a eficácia da alteração do módulo de elasticidade ao longo do tempo foi necessário utilizar três simulações de corpo de prova. As duas primeiras

utilizaram o modelo de CARRAZEDO (2004) com valores para o módulo de elasticidade fixos em 29 GPa e 20,3 GPa. Já a terceira, utilizando o modelo proposto, variou o módulo de elasticidade entre estes dois valores. Os valores para a deformação elástica longitudinal, nas três simulações podem ser observados no gráfico 2.

O gráfico 2 mostra que a deformação elástica longitudinal do modelo proposto varia entre as deformações longitudinais do modelo de CARRAZEDO (2004) acompanhando a deformação por RAA, conforme o gráfico 1, o que comprova a eficácia da variação do módulo de elasticidade.

Para fins de checagem os valores obtidos para as deformações com módulo de elasticidade fixo foram também calculados analiticamente segundo a equação (31).

A tensão (σ) para os dois extremos é igual a $22800\text{N} / (0,075 \cdot 0,075 \text{ m}^2)$, ou seja, 4,05 MPa. Sendo assim para o corpo de prova com módulo de elasticidade igual a 2,90 GPa a $\epsilon_{ELÁSTICA}$ será de 0,00014. Já para o corpo de prova com módulo de elasticidade igual a 2,03 GPa a $\epsilon_{ELÁSTICA}$ será de 0,0002. Os dois valores encontrados são idênticos aos obtidos pela metodologia apresentada o que comprova eficácia da mesma em calcular as deformações elásticas do corpo de prova.

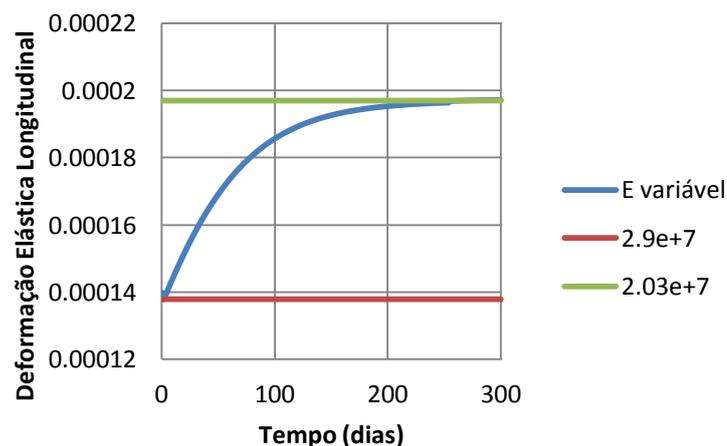


GRÁFICO 2: VARIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO ELÁSTICA LONGITUDINAL
FONTE: O autor (2013)

O gráfico 3 mostra a relação entre a deformação elástica longitudinal e a variação do módulo de elasticidade do modelo proposto. Conforme esperado, na medida em que o módulo de elasticidade diminui, a deformação do corpo de prova aumenta.

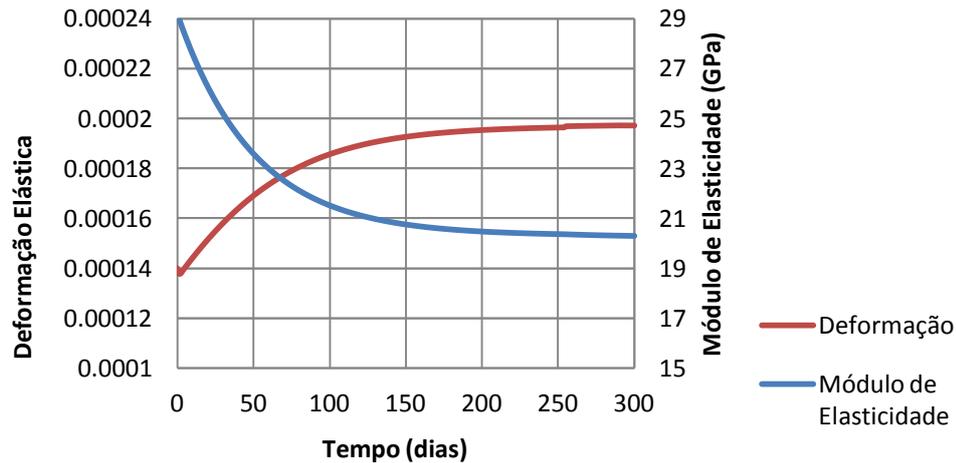


GRÁFICO 3: DEFORMAÇÃO ELÁSTICA LONGITUDINAL x MÓDULO DE ELASTICIDADE
 FONTE: O autor (2013)

Os valores de deformação elástica longitudinal e módulo de elasticidade do gráfico 3 podem ser relacionados reescrevendo a equação (31) com o módulo de elasticidade variável no tempo ($E(t)$) e, sendo a tensão σ constante igual a 4,05 MPa, a deformação elástica também será variável no tempo ($\epsilon_{ELÁSTICA}(t)$):

$$\sigma = E(t) \cdot \epsilon_{ELÁSTICA}(t) \quad (39)$$

$$\epsilon_{ELÁSTICA}(t) = \sigma/E(t) \quad (40)$$

Dessa forma, a relação ponto a ponto entre o módulo de elasticidade e a deformação elástica longitudinal pode ser escrita como:

$$\frac{E(t)}{\epsilon_{ELÁSTICA}(t)} = \frac{E(t)}{\sigma/E(t)} = \frac{[E(t)]^2}{\sigma} \quad (41)$$

5.1.3 Variação de B_1

A equação (33) utilizada neste trabalho para o decaimento do módulo de elasticidade apresenta um parâmetro B_1 que determina o percentual máximo de degradação do módulo de elasticidade provocado pela RAA varia de 0 (sem degradação) a 1 (100% de degradação). O gráfico 4 mostra como a variação deste parâmetro influencia no comportamento das deformações elásticas longitudinais. Quanto maior o valor de B_1 , maior será a deformação do corpo de prova.

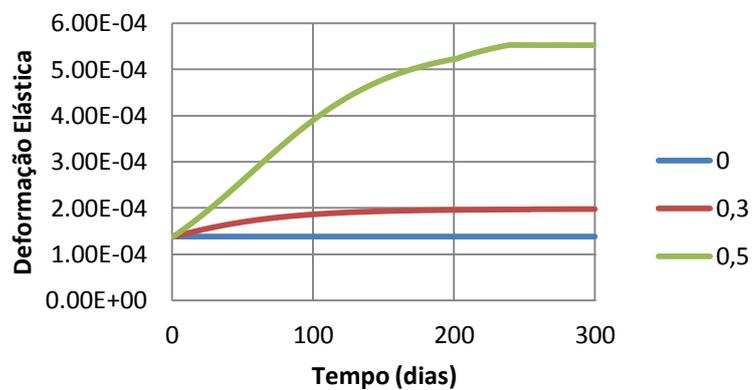


GRÁFICO 4: VARIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO ELÁSTICA LONGITUDINAL EM FUNÇÃO DE B_1
 FONTE: O autor (2013)

O aumento do coeficiente B_1 provoca um aumento nas deformações elásticas do material. Isto porque quanto maior o valor de B_1 , maior será a queda dos valores do módulo de elasticidade ao longo do tempo conforme observado no gráfico 5.

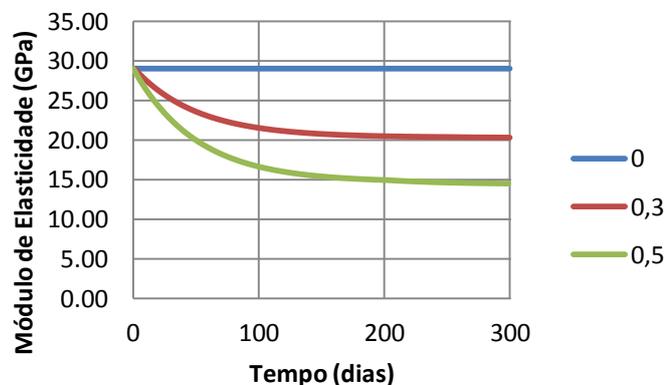


GRÁFICO 5: VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM FUNÇÃO DE B_1
 FONTE: O autor (2013)

5.1.4 Divisão em Duas Regiões

O modelo para simulação da RAA apresentado neste trabalho tem como limitação atribuir a todos os elementos da estrutura a mesma deformação advinda da RAA.

Para diminuir o erro desta aproximação faz-se necessário dividir a estrutura em regiões. A figura 15 apresenta o mesmo corpo de prova da figura 14 dividido em duas regiões. O modelo tridimensional de elementos finitos utilizado para representar é composto de 336 elementos tetraédricos de 10 nós. Além disso, o corpo de prova foi submetido a uma força de compressão igual a 22800N.

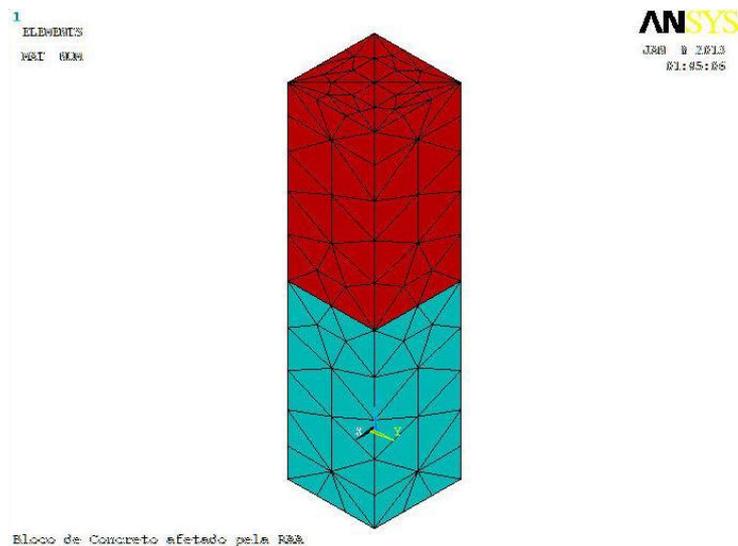


FIGURA 15: MODELO TRIDIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA DIVIDIDO EM DUAS REGIÕES
 FONTE: O autor (2013)

Os parâmetros adotados para cada uma das regiões (Região Vermelha (1) e Região Azul (2)) podem ser observados na tabela 4. Novamente, o coeficiente B_1 foi adotado igual a 0,7.

Este modelo foi analisado para os 30 primeiros passos de tempo. O gráfico 6 mostra que as duas regiões apresentam um comportamento diferente e coerente com os dados fornecidos que balizam a evolução das deformações advindas da RAA, o que comprova que o modelo paramétrico pode ser aplicado com diferentes taxas de expansão em uma estrutura mais complexa.

TABELA 4: CORPO DE PROVA – 2 REGIÕES – PARÂMETROS ADOTADOS

VARIÁVEL	VALOR ADOTADO (1)	VALOR ADOTADO (2)
A_2	25 dias	25 dias
ϵ_{vol}^{max}	0,001737	0,0008685
t^p	0	0
F_p, F_c, F_m	1,00	1,00
F_t	0,20	0,20

FONTE: O autor (2013)

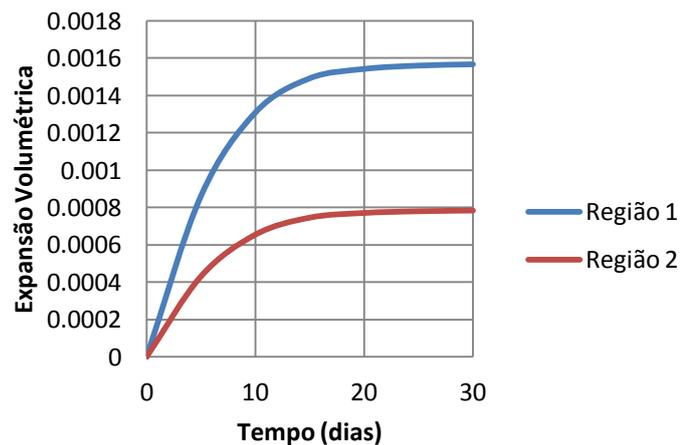


GRÁFICO 6: COMPARAÇÃO ENTRE REGIÕES

FONTE: O autor (2013)

O gráfico 7 compara os valores para as deformações elásticas longitudinais nas duas regiões e mostra que a região mais afetada pela RAA (Região 1) foi a que obteve os maiores valores de deformação elástica longitudinal, ou seja, foi a que teve maior decaimento de seu módulo de elasticidade o que comprova a eficácia da divisão do modelo em regiões.

O gráfico 7 ainda apresenta o valor para a deformação elástica longitudinal do corpo de prova ($\epsilon_{ELÁSTICA}$) definida de acordo com a equação 42:

$$\epsilon_{ELÁSTICA} = \frac{\epsilon_{E1} \cdot H_1 + \epsilon_{E2} \cdot H_2}{H_1 + H_2} \quad (42)$$

em que ϵ_{E1} e ϵ_{E2} são as deformações elásticas longitudinais das regiões 1 e 2 respectivamente e H_1 e H_2 as alturas das regiões 1 e 2 respectivamente. Para o modelo utilizado neste trabalho, em que H_1 e H_2 foram adotados como 15 cm, a equação 42 pode ser reescrita como:

$$\epsilon_{ELÁSTICA} = \frac{\epsilon_{E1} \cdot 15 + \epsilon_{E2} \cdot 15}{30} = 0,5 \cdot (\epsilon_{E1} + \epsilon_{E2}) \quad (43)$$

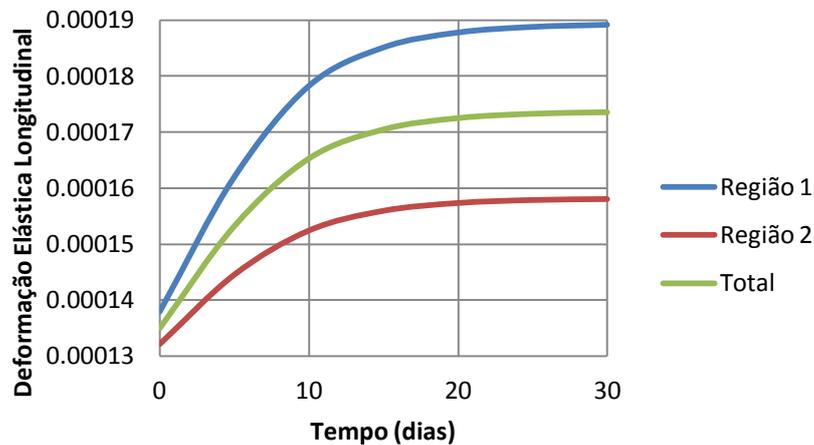


GRÁFICO 7: DEFORMAÇÃO ELÁSTICA LONGITUDINAL ESPECÍFICA DO CORPO DE PROVA DIVIDIDO EM DUAS REGIÕES
 FONTE: O autor (2013)

O gráfico 8 mostra a deformação total longitudinal do corpo de prova, definida, conforme a equação (24), como a soma entre a deformação elástica longitudinal total e a expansão longitudinal advinda da RAA.

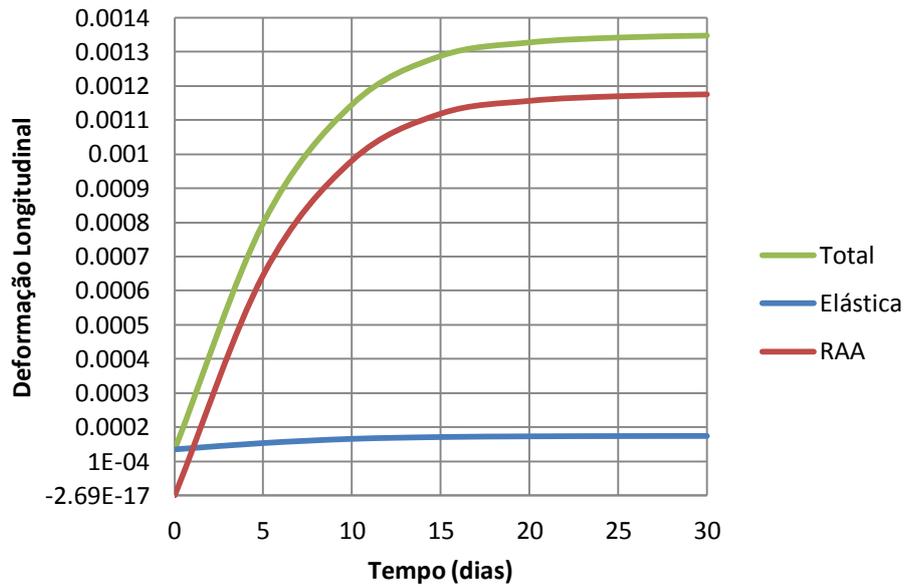


GRÁFICO 8: DEFORMAÇÃO TOTAL
FONTE: O autor (2013)

5.2 BARRAGEM FICTÍCIA

O modelo tridimensional de elementos finitos utilizado para representar uma barragem fictícia é composto de 309 elementos tetraédricos de 10 nós e pode ser visto na figura 16.

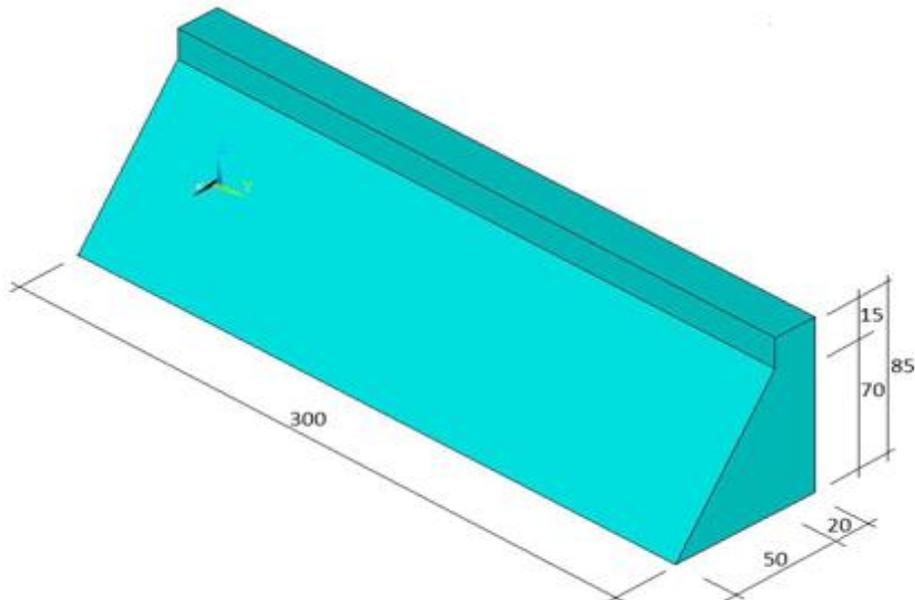


FIGURA 16: MODELO TRIDIMENSIONAL DA BARRAGEM FICTÍCIA
FONTE: CARRAZEDO, SANCHES e LACERDA (2012)

O modelo levou em consideração a carga d'água represada e o peso próprio da barragem. Já as propriedades adotadas para o concreto da barragem foram as mesmas do corpo de prova.

Na base da barragem ($z=0$) os deslocamentos em x e z foram impedidos e nas laterais da barragem ($y=0$ e $y=300$) os deslocamentos em x e y também foram impedidos.

5.2.1 Análise do Modelo

Para a análise do Modelo da Barragem foram adotados os mesmos parâmetros da tabela 3. O gráfico 9 mostra equivalência entre o modelo proposto e do modelo apresentado por CARRAZEDO, SANCHES e LACERDA (2012) ($t^p = 0$ adotado para ambos os modelos) .

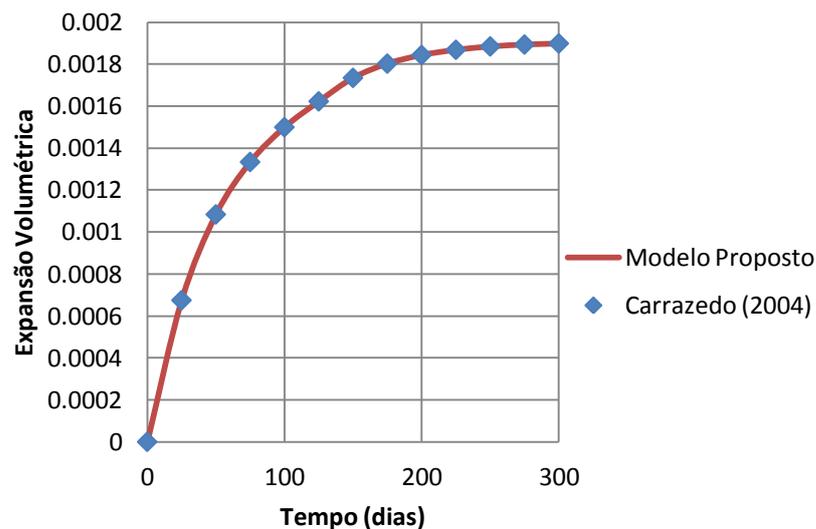
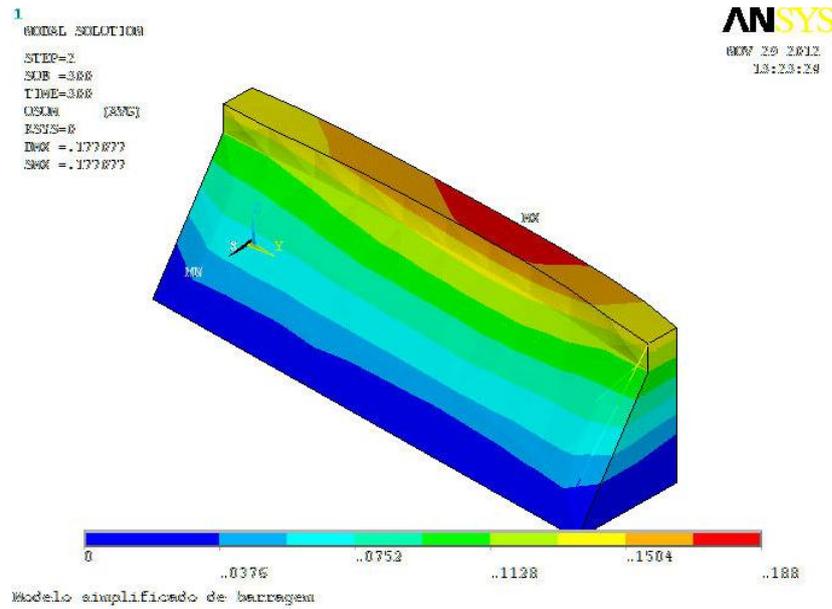


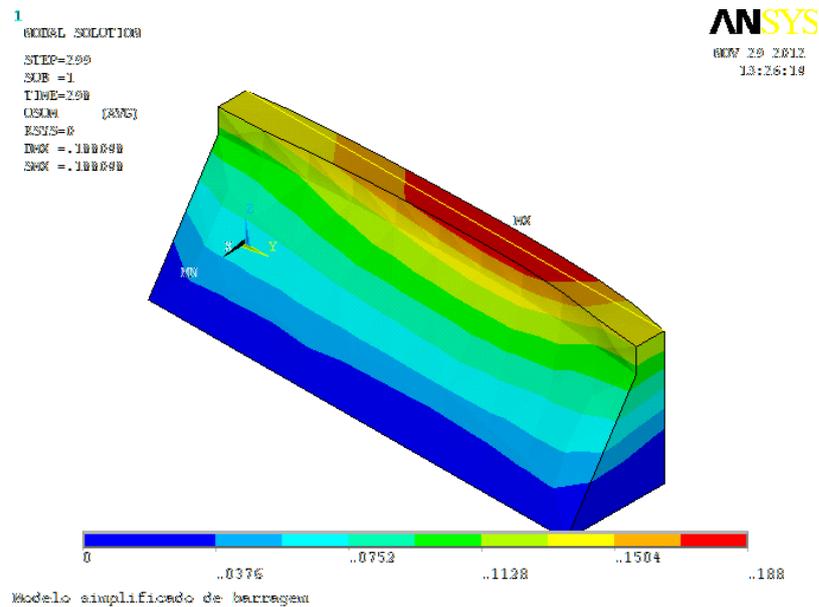
GRÁFICO 9: BARRAGEM – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS RAA
 FONTE: O autor (2013)

5.2.2 Deslocamento

A figura 17 apresenta um comparativo entre os valores obtidos para o deslocamento total da estrutura para o modelo de CARRAZEDO (2004) com módulo de elasticidade constante igual a 29 GPa e para o modelo apresentado neste trabalho com $B_1 = 0,7$ e módulo de elasticidade variando de 29 GPa a 20,3 GPa.



a. Módulo Fixo



b. Módulo Variável

FIGURA 17: BARRAGEM – DESLOCAMENTO TOTAL
FONTE: O autor (2013)

O gráfico 10 ajuda a visualizar melhor a diferença entre os deslocamentos máximos dos dois modelos. Conforme esperado, o modelo proposto, com módulo de

elasticidade variável, apresenta maiores deslocamentos que o modelo proposto por CARRAZEDO (2004) em que o módulo é constante. Ele apresenta o deslocamento transversal máximo observado na barragem que ocorre no ponto com coordenadas (0,150,85).

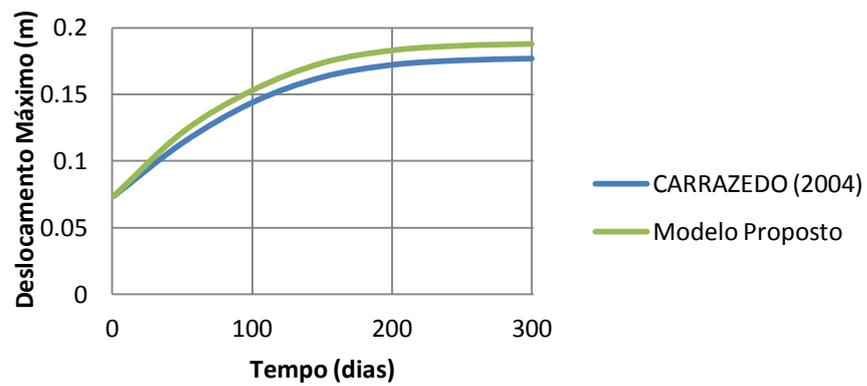


GRÁFICO 10: BARRAGEM – DESLOCAMENTO TRANSVERSAL MÁXIMO
FONTE: O autor (2013)

6 CONCLUSÃO

Para implementar a metodologia apresentada por CARRAZEDO (2004), foi utilizado o programa comercial de elementos finitos ANSYS[®], por possibilitar a inclusão de rotinas programáveis pelo usuário. Estas rotinas chamadas de “*User Programmable Features*” (UPF), incluídas através da linguagem “*ANSYS[®] Parametric Design Language*” (APDL) possibilitaram a representação dos efeitos deletérios da RAA levando-se em conta o decaimento do módulo de elasticidade. Diante da implementação desta metodologia, as seguintes conclusões puderam ser obtidas:

1. Decaimento do Módulo de Elasticidade

O modelo proposto consegue reproduzir com coerência a queda do módulo de elasticidade do concreto em função das deformações advindas da RAA, proposta por PIETRUSCZAK (1996). As deformações elásticas são um importante indicador desta queda já que onde o decaimento do módulo de elasticidade foi maior as deformações elásticas foram maiores.

2. Divisão em Regiões

Uma das limitações do modelo proposto nesta dissertação é que ele não é capaz de atribuir o módulo de elasticidade degradado aos elementos finitos individualmente. Para contornar esta dificuldade, existe a possibilidade de se dividir a estrutura analisada em regiões.

Este trabalho dividiu um corpo de prova em duas regiões e o resultado mostrou-se coerente na medida em que apresentou resultados diferentes para as duas regiões. Entretanto, é importante ressaltar que o número de regiões possíveis para uma estrutura não é limitado a apenas duas ficando este valor a critério do pesquisador. O número de regiões em que uma estrutura deve ser dividida é proporcional à complexidade da mesma.

3. Aplicação na Barragem Fictícia

O modelo proposto foi aplicado a uma barragem fictícia e apresentou um comportamento coerente o que mostra que esse modelo pode ser aplicado a barragens reais.

4. *Software ANSYS*®

A experiência adquirida com os inúmeros testes da implementação do decaimento do módulo de elasticidade mostra que o *software ANSYS*® não é a solução mais amigável para este problema. Recomenda-se optar por desenvolver o próprio código para simulação da RAA.

6.1 FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Com relação a futuras contribuições à metodologia, consideram-se, em ordem de importância, as seguintes ações:

- Modificar o programa de modo a poder se incluir valores de t^p diferente de zero;
- Introduzir a variação do módulo de elasticidade elemento por elemento e não em regiões como proposto neste trabalho.
- Introduzir a ortotropia das expansões provocadas pelo gel da RAA como proposto por CARRAZEDO, SANCHES e LACERDA (2012);
- Aplicar o modelo proposto a barragens reais.

7 REFERÊNCIAS

ADEGHE, L.; HINDY, A.; HO, M. S. **Saunders generating station concrete growth mitigation project - instrumentation and finite element analysis**. In: USCOLD. International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams. Chattanooga, v. 2, p. 323-342, 1995.

ANSYS®. *ANSYS® Documentation, Release 13.0*. Documentação eletrônica disponível no aplicativo ANSYS®.

BAZANT, Z. P.; NAJJAR, L. J. **Drying of concrete and non-linear diffusion problems**. Cement and Concrete Research, v. 1, n. 5, p. 461-473, 1971.

BAZANT, Z. P.; STEFFENS, A. **Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete**. Cement and Concrete Research, v. 30, n. 3, p. 419-428, Março 2000.

BEER, F.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos Materiais**. 3ª ed. São Paulo: Makron Books, 1996.

BERNARDES, H. D. M.; ANDRÉ, J. C.; CASTRO, A. T. D. **Retro-análise na observação dos efeitos da reatividade Álcali-agregado**. In: Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Goiânia, Brasil: [s.n.], 1997.

BERNARDES, H. D. M.; ANDRÉ, J. C.; RODRIGUES, R. D. O. **Observação de deformações em barragens de concreto sob reações Álcali-agregado**. In: Instituto Brasileiro do Concreto. 43º Congresso Brasileiro do Concreto. Foz do Iguaçu, Brasil, 2001.

BÉRUBÉ, M. A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M. **Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity**. Cement and Concrete Research, v. 32, n. 8, p. 1215-1227, Agosto 2002.

BLESZYNSKI, R. F.; THOMAS, M. D. **Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions**. Advanced Cement Based Materials, v. 7, n. 2, p. 66-78, Março 1998.

BODDY, A. M.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **The effect of product form of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction**. Cement and Concrete Research, v. 30, n. 7, p. 1139-1150, Julho 2000.

CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P. **Modeling of induced mechanical effects of alkali aggregate reactions**. Cement and Concrete Research, v. 28, n. 2, p. 251-260, Fevereiro 1998.

CAPRA, B.; SELIER, A. **Orthotropic modeling of alkali-aggregate reaction in concrete structures: numerical simulations.** *Mechanics of Materials*, v. 35, n. 8, p. 817-830, Agosto 2003.

CARRAZEDO, R. **Modelagem Numérica da Expansão do Concreto devido à Reação Álcali-Agregado.** Dissertação (Mestre em Ciências) - Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2004.

CARRAZEDO, R.; SANCHES, R. A. K.; LACERDA, L. A. D. **Numerical modeling of orthotropic concrete expansion due to alkali-aggregate reaction with a parametric model.** In: 10th World Congress on Computational Mechanics, São Paulo, Brasil, Julho 2012.

CAVALCANTI, A. J. C. T.; SILVEIRA, J. F. A.; DEGASPARE, J. C. **Análise dos efeitos da reação álcali-agregado (RAA) através de modelos matemáticos.** In: COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Fortaleza, Brasil, v. 2, 2001.

CHARLWOOD R. G.; SOLYMAR S. V.; CURTIS D. D. **A review of alkali aggregate reactions in hydroelectric plants and dams.** *Proceedings of the International Conference of Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams*, Fredericton, Canada. 1992.

CHATTERJI, S.; JENSEN, A. D.; THAULOW, N.; CHRISTENSEN, P. **Studies of alkali-silica reaction. Part 3: Mechanisms by which NaCl and Ca(OH)₂ affect the reaction.** *Cement and Concrete Research*, v. 16, n. 2, p. 246-254, Março 1986.

CHATTERJI, S.; THAULOW, N.; JENSEN, A. D. **Studies of alkali-silica reaction. Part 5: Verification of a newly proposed reaction mechanism.** *Cement and Concrete Research*, v. 19, n. 2, p. 177-183, Março 1989.

COLLINS, R. J.; BAREHAM, P. D. **Alkali-silica reaction: Suppression of expansion using porous aggregate.** *Cement and Concrete Research*, v. 17, n. 1, p. 89-96, Janeiro 1987.

COMBY-PEYROT I.; BERNARD F.; BOUCHARD P O.; BAY F.; GARCIA-DIAZ E; **Development and validation of a 3D computational tool to describe concrete behaviour at mesoscale.** Application to the alkali-silica reaction. *Computational Materials Science*, v. 46, n.4, p. 1163–1177, 2009.

CONSTANTINER, D.; DIAMOND, S. **Alkali release from feldspars into pore solutions.** *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 4, p. 549-554, Abril 2003.

DIAMOND, S. **Alkali silica reactions - some paradoxes.** *Cement and Concrete Composites*, v. 19, n. 5-6, p. 391-401, 1997.

DUNANT C. F.; SCRIVENER K. L. **Micro-mechanical modelling of alkali-silica-reaction-induced degradation using the AMIE framework.** Cement and Concrete Research, v.40, n. 4.p. 517-525, 2010.

FAIRBAIRN E. M. R.; RIBEIRO F. L. B.; LOPES L. E.; TOLEDO-FILHO R. D.; SILVOSO M. M. **Modelling the structural behaviour of a dam affected by alkali-silica reaction.** Communications in Numerical Methods in Engineering, v.22, n.1, p.1-12, 2005.

FURUSAWA Y.; OHGA H.; UOMOTO T. **An analytical study concerning prediction of concrete expansion due to alkali-silica reaction.** In: Third International Conference on Durability of Concrete, p. 757-80. France, 1994.

GARCIA-DIAZ, E.; RICHE, J.; BULTEEL, D.; VERNET, C. **Mechanism of damage for the alkali-silica reaction.** Cement and Concrete Research, v. 36, p. 395-400, 2006.

GIACCIO, G.; ZERBINO, R.; PONCE, J.; VERNET, C. **Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction.** Cement and Concrete Research, v. 38, p. 993-1004, Fevereiro 2008.

GILLOTT, J. E. **Alkali-reactivity problems with emphasis on Canadian aggregates.** Engineering Geology, v. 23, p. 29-43, 1986.

GLASSER, L. S. D.; KATAOKA, N. **The chemistry of alkali-aggregate reaction.** Cement and Concrete Research, v. 11, n. 1, p. 1-9, Janeiro 1981.

GRATTAN-BELLEW, P. E.; MITCHELL, L. D.; MARGESON, JAMES; MIN, DENG. **Is alkali-carbonate reaction just a variant of alkali-silica reaction ACR=ASR?** Cement and Concrete Research, v. 40, p. 556-562, 2010.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela Reação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exsudado.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2005.

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

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

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

JOHN ST, D. A. **Alkali-aggregate reaction: New Zealand experience.** In: SWAMY, R. N. The Alkali-Silica Reaction in Concrete., Glasgow / London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, p. 265, 1992.

JONES, A. E. K.; CLARK, L. A. **The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment.** Engineering Structures, v. 20, n. 9, p. 785-791, Setembro 1998.

KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. M.; BROWN, J. T.; MEYER-ILSE, W. **Imaging of ASR gel by soft x-ray microscopy.** Cement and Concrete Research, v. 28, n. 3, p. 411-421, Março 1998.

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

LÉGER, P.; CÔTÉ, P.; TINAWI, R. **Finite element analysis of concrete swelling due to alkali aggregate reactions in dams.** Computers & Structures, v. 60, n. 4, p. 601-611, Junho 1996.

LEHTOLA, R.; VAZ, L. E.; VARGAS JR., E. A; GUEDES, Q. M. **Modelos Numéricos para a simulação de RAA em estruturas de concreto massa.** In: Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, Goiânia, Brasil: [s.n.], 1997.

LIANG, T.; MINGSHU, T. **Correlation between reaction and expansion of alkali-carbonate reaction.** Cement and Concrete Research, v. 25, n. 3, p. 470-476, Abril 1995.

LIANG, T.; MINGSHU, T. **Expansion mechanism of alkali-dolomite and alkali-magnesite reaction.** Cement and Concrete Composites, v. 21, n. 5-6, p. 361-373, Dezembro 1999.

LOPES, L. E. **Modelagem Mecânica e Numérica da Reação Álcali-Agregado com aplicação a barragens de concreto.** Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

MARZOUK, H.; LANGDON, S. **The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete.** Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 4-5, p. 549-556, Junho 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, Brasil: PINI, 1994.

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

OBERHOLSTER, R. E. **Alkali reactivity of silicious rock aggregates: Diagnosis of the reaction testing of cement and aggregate and prescription of preventive measures.** In: 6th International Conference. Alkalies in Concrete - Research and Practice. Copenhagen, Dinamarca: [s.n.], p. 419-433, 1983.

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

PAPPALARDO JR., A. **Uma metodologia para a modelagem matemática de barragens de concreto afetadas pela reação álcali-agregado**. Tese (Doutor em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1998.

PIETRUSCZAK, S. **On the mechanical behavior of concrete subjected to alkali-aggregate reaction**. *Computers & Structures*, v. 58, n. 6, p. 1093-1097, Março 1996.

POYET, S; SELLIER, A.; CAPRA, B.; FORAY, G.; TORRENTI, J. M.; COGNON, H.; BOURDAROT, E. **Chemical modelling of Alkali Silica reaction: Influence of the reactive aggregate size distribution**. *Materials and Structures*, p. 229-239, 2007.

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

SILVEIRA, J. F. A. **A expansão do concreto em barragens afetadas pela RAA e a importância das tensões confinantes**. In: Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Goiânia, Brasil: [s.n.], 1997.

SWENSON, E. G.; GILLOTT, J. E. **Alkali-carbonate rock reaction**. *Highway Research Board*, v. 45, p. 21-40, 1964.

TCHIKAWA, T.; MIURA, M. **Modified model of alkali-silica reaction**. *Cement and Concrete Research*, v. 37, p. 1292-1297, 2007.

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

URHAN, S. **Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and hypothesis concerning the mechanism**. *Cement and Concrete Research*, v. 17, n. 1, p. 141-152, Janeiro 1987.

XI Y.; SUWITO A.; WEN X.; MEYER C.; JIN W. **Testing and modeling alkali-silica reaction and the associated expansion of concrete**. *Mechanics of Quasi-Brittle Materials and Structures*, Proceedings of International Workshop in honor of Prof Z P Bazant 60th birthday, Hermes Science Publications, Paris, 1998.

WIGUM, B. J. **Alkali-Aggregate Reactions in Concrete - Properties, Classification and Testing of Norwegian Cataclastic Rocks**. Tese (Doutor em Engenharia) - University of Trondheim, Noruega, Dezembro 1995.

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

APÊNDICE A – USERSW E FUNÇÕES DE NORMALIZAÇÃO

A.1 ROTINA USERSW

```

*deck,usersw          parallel          user          pck
dc
subroutine usersw (option,elem,intpt,mat,proptb,ncomp,epswel,
    x epel,e,nuxy,fluen,dfluen,tem,dtem,tofst,timvll,timvnc,usvr)
c
c
c  input arguments:
c  option  (int,sc,in)      swelling option
c  elem    (int,sc,in)      element number (label)
c  intpt   (int,sc,in)      element integration point number
c  mat     (int,sc,in)      material reference number
c  proptb  (dp,ar(*),in)    nonlinear material table (tb commands)
c  ncomp   (int,sc,in)      number of strain components (=1, 4, or 6)
c                               1 - truss or beam elements
c                               4 - 2-d solids and pipe elements
c                               6 - 3-d solids and most shells
c  epswel  (dp,sc,inout)    total accumulated swelling strain
c                               before this substep
c  epel    (dp,ar(ncomp),inout) elastic strain
c  e       (dp,sc,in)      elastic modulus
c  nuxy    (dp,sc,in)      poisson'S RATIO
c  fluen   (dp,sc,in)      total fluence (bf or bfe commands)
c  dfluen  (dp,sc,in)      increment in fluence for this substep
c  tem     (dp,sc,in)      temperature (bf or bfe commands)
c  dtem    (dp,sc,in)      increment in temperature for this substep
c  tofst   (dp,sc,in)      offset of temperature scale from absolute
zero
c                               (tofst command)
c  timvll  (dp,sc,in)      time at the end of this substep
c  timvnc  (dp,sc,in)      the increment of time this substep
c  usvr    (dp,ar(*),inout) user-defined state variables(optional)
c
c  output arguments:
c  epswel  (dp,sc,inout)    total accumulated swelling strain
c                               after this substep
c  epel    (dp,ar(ncomp),inout) elastic strain adjusted
c                               for swelling increment
c  usvr    (dp,ar(*),inout) updated user-defined state variables
c
#include "impcom.inc"

external erhandler

#include "stepcm.inc"
integer option,elem,intpt,mat,ncomp
double precision proptb(*),epswel,epel(ncomp),e,nuxy,
    x fluen,dfluen,tem,dtem,tofst,timvll,timvnc,usvr(*),
x  delswl(3),eptot(3)

c
c  Minhas variáveis
double precision tens(3),tx_expand,Gu,Gp,Gt,Gc(3),e0

```

```

c      Constantes de Lamé

      double precision lambda, mu

if (intpt .eq. 1) then
      if (elem .eq. 1) then
          call erhandler('EUUU',5000,2,'EUU',0.0d0,' ')
      endif
endif

c      *** the next executable statement is true for all laws
      eptot(1) = epel(1) + epswel
if (ncomp .gt. 1) then
      eptot(2) = epel(2) + epswel
      eptot(3) = epel(3) + epswel
endif

c      As constantes de Lamé são definidas por:
      lambda = nuxy * e / ((1. + nuxy) * (1. - 2. * nuxy))
      mu = e / (2. * (1. + nuxy))

c      Calcula a tensão no elemento (Tensão = Módulo de Elasticidade *
Deformação Total)
c      Considerando o concreto como um sólido elástico linear isotrópico,
de acordo com
c      Michael Lai, no seu livro Introduction to Continuum Mechanics,
terceira edição, pg 226
      tens(1) = lambda * (eptot(1) + eptot(2) + eptot(3)) + 2 * mu
x * eptot(1)
      tens(2) = lambda * (eptot(1) + eptot(2) + eptot(3)) + 2 * mu
x * eptot(2)
      tens(3) = lambda * (eptot(1) + eptot(2) + eptot(3)) + 2 * mu
x * eptot(3)

c      proptb(63) -> Fator de calibração da temperatura
c      proptb(64) -> Fator de calibração da porosidade
c      proptb(65) -> Fator de calibração da umidade
c      proptb(66) -> Fator de calibração da tensão
c      proptb(67) -> expansão máxima volumétrica (assintótico)
c      proptb(68) -> constante do material (em unidade de tempo)
c      proptb(69) -> parametro relacionado com o tempo de preenchimento
dos poros
c
c      Chama rotinas para os valores converter para os fatores de expansão
call Fator_Temperatura(tem,proptb(63),Gt)
call Fator_Porosidade(flue,proptb(64),Gp)
call Fator_Umidade(flue,proptb(65),Gu)
call Fator_Tensao(tens,proptb(66),Gc)

c
c      Lei de formação da RAA
c      Dependente da temperatura, da umidade, porosidade, tensões e tempo
c      Primeiro determino a taxa de expansão para o tempo atual
if ((timvll - proptb(69) * Gp) .lt. 0) then
      tx_expand = 0
else

```

```

        tx_expand = proptb(67) * exp( - (timvll - proptb(69)
x * Gp) / (proptb(68) * Gt)) * dsqrt(Gu) / (proptb(68) * Gt)
    endif

c      Depois determino a expansão multiplicando a tx de expansão pelo
incremento de tempo
delswl(1) = tx_expand * timvnc * dsqrt(Gc(1))
    delswl(2) = tx_expand * timvnc * dsqrt(Gc(2))
    delswl(3) = tx_expand * timvnc * dsqrt(Gc(3))

c      *** the next executable statement is true for all laws
    epswel = epswel + (delswl(1) + delswl(2) + delswl(3))/3

    epel(1) = eptot(1) - epswel
if (ncomp .gt. 1) then
    epel(2) = eptot(2) - epswel
    epel(3) = eptot(3) - epswel
endif

return

end

```

A.2 USER_UMID

```

subroutine Fator_Umidade(Umid,ku,Fu)

c      Rotina de conversão do campo de umidade para o fator de influência
c      Entrada:      Umid  Umidade no elemento
c                   ku      Fator de calibração da umidade
c      Saída        Fu      Fator de influência da umidade

    double precision ku, Fu, Umid

c      Lei de transformação da umidade
if (Umid .LT. .75) then
    Fu = ku
else if (Umid .LT. 1.) then
    Fu = (Umid - .75) * (1. - ku) / .25 + ku
else
    Fu = 1.
end if

return

end

```

A.3 USER_POROS

```

subroutine Fator_Porosidade(Umid,kp,Fp)

c      Rotina de conversão do campo de porosidade para o fator de influência
c      Entrada:      Umid  Umidade no elemento
c                   kp      Fator de calibração da porosidade
c      Saída        Fp      Fator de influência da porosidade

```

```

double precision kp, Fp, Umid

c   Lei de transformação da porosidade
if (Umid .LT. .75) then
    Fp = kp
else if (Umid .LT. 1.) then
    Fp = (1. - Umid) * (kp - 1.) / .25 + 1.
else
    Fp = 1.
end if

return
end

```

A.4 USER_TEMP

```

subroutine Fator_Temperatura(Temp, kt, Ft)

c   Rotina de conversão do campo de temperatura para o fator de
c   influência
c   Entrada:   Temp  Temperatura no elemento
c              kt    Fator de calibração da temperatura
c   Saída     Ft     Fator de influência da temperatura

double precision kt, Ft, Temp

c   Lei de transformação da temperatura
if (Temp .LT. 18.) then
    Ft = 1.
else if (Temp .LT. 36.) then
    Ft = (36. - Temp) * (1. - kt) / 18. + kt
else
    Ft = kt
end if

return
end

```

A.5 USER_TENSÃO

```

subroutine Fator_Tensao(tens, kc, Fc)

c   Rotina de conversão do campo de tensões para o fator de influência
c   Entrada:   tens  Tensões (em KN/m2)
c              kc    Fator de calibração da tensões
c   Saída     Fc     Fator de influência da tensões

double precision tens(3), kc, Fc(3)

if (tens(1) < -8000.) then
    Fc(1) = kc
else if (tens(1) < -300.) then
    Fc(1) = (tens(1) + 8000.) * (1 - kc) / 7700. + kc
else
    Fc(1) = 1
end if

```

```
if (tens(2) < -8000.) then
  Fc(2) = kc
else if (tens(2) < -300.) then
  Fc(2) = (tens(2) + 8000.) * (1 - kc) / 7700. + kc
else
  Fc(2) = 1
end if

if (tens(3) < -8000.) then
  Fc(3) = kc
else if (tens(3) < -300.) then
  Fc(3) = (tens(3) + 8000.) * (1 - kc) / 7700. + kc
else
  Fc(3) = 1
end if

return
end
```

APÊNDICE B – APLICAÇÃO EM APDL

B.1 ANÁLISES DE TENSÕES E RAA

! USERSW - Versão 05

! Corpo de Prova

! Título

/TITLE,Bloco de Concreto afetado pela RAA

! Pré-processador

/PREP7

! Comandos para definir o modelo

BLOCK,0,0.075,0,0.075,0,0.3,

LSTR, 7, 5

LSTR, 6, 8

LSTR, 3, 2

LSTR, 4, 1

FLST,3,2,4,ORDE,2

FITEM,3,13

FITEM,3,-14

ASBL, 2,P51X

FLST,3,2,4,ORDE,2

FITEM,3,15

FITEM,3,-16

ASBL, 1,P51X

ET,1,SOLID92

ET,2,LINK8

R,1,0.25, ,

! Módulo de elasticidade variando com temperatura

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0.

```
MPTEMP,2,4.3
MPDATA,EX,1,,2.9e7
MPDATA,EX,1,,2.03e7
MPDATA,PRXY,1,,0.
MPDATA,PRXY,1,,0.

MP,KXX,1,,2.367 ! Condutividade Térmica Isotrópica
MP,C,1,,0.23 ! Calor Específico

MP,EX,2,1 ! Módulo de Young para a barra

VATT, 1, 1, 1, 0

VMESH,1

TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
TSHAP,LINE

FLST,2,2,1
FITEM,2,8
FITEM,2,109
E,P51X

!Visão Isométrica
VPLOT
/VIEW,1,1,1,1
/VUP,1,Z
/REPLOT

! Restrições de Apoio
DA,2,UZ,
DA,11,UZ,
DA,12,UZ,
DA,13,UZ,
```

D,8, , , , , ,ALL, , , , ,

! Esforços aplicados

FLST,2,4,5,ORDE,2

FITEM,2,7

FITEM,2,-10

SFA,P51X,1,PRES,4000.

! Definindo parâmetros iniciais

Emax = 0.001737 ! Expansão Máxima Volumétrica (valor assintótico)

A1 = 50.1978 ! Constante do Material (em unidade de tempo) (250.989 * 0.2)

to = 0. ! Parâmetro Relacionado com o tempo de preenchimento dos poros

Fp = 1. ! Fator de calibração da porosidade

Fu = 1. ! Fator de calibração da umidade

Fc = 1. ! Fator de calibração da tensão

Ft = 1. ! Fator de calibração da temperatura

! Mais uma parte importante -> deve ser patamar de escoamento

TB,BISO,1,1,2,

TBTEMP,0

TBDATA,,200000,0,,,,

! Tabela de Swelling (a User é utilizada para chamar a USERSW)

TB,SWELL

TBDATA,72,10

TBDATA,67,Emax,A1,to

TBDATA,63,Ft,Fp,Fu,Fc

TB,USER,1,1,72,

TBDATA,72,10

! Sai do Pré-processador e entra no tab Solução

FINISH

/SOLU

! Temperatura e Umidades Iniciais nos elementos (vai para Usersw)

BFV,ALL,TEMP,0.001

BFV,ALL,FLUE,1.

! Tempo (quase zero, para marcar início)

TIME,1E-8

! Guarda todos os resultados de saída

OUTRES,ALL,ALL,

! Critérios de Convergência

CNVTOL,F,,,,1.E-6

CNVTOL,M,-1

! Tipo de análise

ANTYPE,STATIC

! Arquivo de restart da análise

RESCONTROL,,all,last,1

! Resolve o STEP 1

SOLVE

! Arquivo de restart da análise

!RESCONTROL,file_summary

! Número de Substeps, máximo e mínimo nº de substeps

! NSUBST,10,100,10 ! Delta t de 1 dia

! Tempo Final de Cálculo (unidade depende da Usersw)

! TIME,10

! Entra no pós-processamento para pegar o valor de deformação volumétrica

FINISH

/POST1

! Assegura que está no último step

! SET,LAST

! Tabelas de deformação

! deformação volumétrica dos elementos

ETABLE,swtb,EPSW,

! deformação elástica em Z dos elementos

ETABLE,epelast,EPEL,Z

! Selecionar o elemento da região de interesse

! deformação volumétrica do elemento

*GET,eps,elem,150,ETAB,swtb

! deformação elástica de um elemento

*GET,defelast,ELEM,150,ETAB,epelast

epc = eps*10000.

aux = 1+eps*100.

! Força a gravação dos parâmetros

PARSAV,ALL

! Abre arquivo para registro dos dados

*CFOPEN,Substep,Txt,,APPEND

*VWRITE,eps,defelast,epc,aux

%.8f,%.8f,%.8f,%.8f

*CFCLOS

! Volta para continuar a solução

! COPIAR O RESTO DO CÓDIGO E ALTERAR LINHA INDICADO PARA TODO PASSO DE TEMPO

FINISH

/SOLU

! Re-lê os parâmetros

PARRES

! Temperatura e Umidade Finais nos elementos (Dados obrigatórios para Usersw)

! Ademais, não podem permanecer iguais aos iniciais!!!

BFV,ALL,TEMP,epc,,,

BFV,ALL,FLUE,aux

! Arquivo de restart da análise

! RESCONTROL,,all,last,1

! Reinicia a análise no último step

! PARA O PASSO DE TEMPO 2 ESCREVER ANTYPE,,REST,2,1 E ASSIM POR DIANTE

ANTYPE,,REST,1,1

! Re-lê os parâmetros

PARRES

! Temperatura e Umidade Finais nos elementos (Dados obrigatórios para Usersw)

! Ademais, não podem permanecer iguais aos iniciais!!!

BFV,ALL,TEMP,epc,,

BFV,ALL,FLUE,aux

! Resolve o STEP

SOLVE

! Arquivo de restart da análise

! RESCONTROL,file_summary

! Número de Substeps, máximo e mínimo nº de substeps

!NSUBST,10,100,10 ! Delta t de 1 dia

! Tempo Final de Cálculo (unidade depende da Usersw)

!TIME,20

! Entra no pós-processamento para pegar o valor de deformação volumétrica

FINISH

/POST1

! Assegura que está no último step

! SET,LAST

! Tabelas de deformação

! deformação volumétrica dos elementos

ETABLE,swtb,EPsw,

! deformação elástica em Z dos elementos

ETABLE,epelast,EPEL,Z

! Selecionar o elemento da região de interesse

! deformação volumétrica do elemento

```
*GET,epsw,ELEM,150,ETAB,swtb
```

! deformação elástica de um elemento

```
*GET,defelast,ELEM,150,ETAB,epelast
```

```
epc = epsw*10000.
```

```
aux = 1+epsw
```

! Força a gravação dos parâmetros

```
PARSAV,ALL
```

! Abre arquivo para registro dos dados

```
*CFOPEN,Substep,Txt,,APPEND
```

```
*VWRITE,epsw,defelast,epc,aux
```

```
%.8f,%.8f,%.8f,%.8f
```

```
*CFCLOS
```