

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**MODELAGEM DA EXPANSÃO POR REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO DO  
CONCRETO**

**ANNA PAULA GUIDA FERREIRA**

**JUIZ DE FORA**

**2008**

**ANNA PAULA GUIDA FERREIRA**

**MODELAGEM DA EXPANSÃO POR REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO DO  
CONCRETO**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas e Materiais

Orientador: Michèle Cristina Resende Farage

Co-orientador: Flávio de Souza Barbosa

Juiz de Fora  
Faculdade de Engenharia da UFJF

2008

**MODELAGEM DA EXPANSÃO POR REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO DO  
CONCRETO**

**ANNA PAULA GUIDA FERREIRA**

Trabalho Final de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com o Artigo 9º do Capítulo IV das Normas de Trabalho Final de Curso estabelecidas pelo Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Por:

---

Michèle Cristina Resende Farage

---

Flávio de Souza Barbosa

---

Luis Paulo da Silva Barra

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Paulo e Regina, meus heróis. Este trabalho é resultado do amor e do apoio deles;

À minha irmã Beth, o amor da minha vida;

À Professora Michèle Resende Cristina Farage, primeiramente pela paciência, pela dedicação e enorme empenho como minha orientadora neste trabalho, trabalhando comigo dia, noite e fins de semana em busca de um resultado de qualidade. Em segundo lugar, pelos ensinamentos transmitidos como minha primeira orientadora de Iniciação Científica, pela produtividade incentivada e por despertar meu interesse por temas tão novos e desafiadores;

Ao Professor Flávio de Souza Barbosa, pela valiosa co-orientação, com suas explicações sempre claras e seu espírito alegre;

Ao Professor Luis Paulo da Silva Barra, pelas disciplinas ministradas com maestria única, pelo apoio dedicado no período de Iniciação Científica com suas explicações e dicas imprescindíveis, e por ter aceitado o convite em fazer parte da banca avaliadora deste trabalho;

À amiga Franciane Conceição Peters, pelas incontáveis ajudas, por estar sempre pronta a socorrer os colegas transmitindo seus conhecimentos e trocando idéias. E pelas vezes em que se preocupou nos meus momentos de “aperto” diante dos fins de prazos para estudar para uma prova ou entregar um trabalho, enquanto eu me permitia manter a calma;

Ao Professor Elson Toledo Magalhães pelos questionamentos e o incentivo ao raciocínio;

A todos os professores da Faculdade de Engenharia de Juiz de Fora que tive a oportunidade de conhecer e que contribuíram para minha formação;

Aos amigos: Glenda, pelos incentivos nos estudos e pela amizade fiel desde o início; Samuel, pela amizade completa e por me fazer tão bem; Leandro, pelo companheirismo e momentos de compromisso só com a diversão; Rafaella, por seu jeito espontâneo e sincero; Marcelo, pela educação sem igual e pelas ótimas conversas; Luiza, por ser amiga presente mesmo com seu jeitinho quieto; Bruno, por ser descontraído, descomplicado e parceiro; Daniel, por

valorizar tanto a nossa amizade; Waldir, por ter aceito a nossa turma como sendo a dele e por fazer parte de nós; Daniele, por ser a pessoa mais prestativa e dócil que pode existir;

À toda minha família, que apóia e torce por mim em todos os momentos importantes;

À vovó Hilda e ao vovô Moacyr, pelo amor cuidadoso. À vovó Antônia e ao vovô Oswaldo, pela proteção;

Aos amigos, Isabel e Leandro Manso, por existirem na minha vida;

Ao NUMEC pela oportunidade da iniciação em pesquisa e pela estrutura disponibilizada para realização integral dos afazeres acadêmicos.

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho à minha querida irmã Anna Elizabeth, por sua companhia acalentadora, por sua paciência nos meus momentos de impaciência, por sua racionalidade que equilibrou meu emocional, por sua garra, persistência e foco incentivadores. Com todo o meu amor.*

## RESUMO

O presente trabalho consiste no estudo e aprimoramento de um modelo computacional baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) para simular o comportamento de estruturas de concreto submetidas à Reação Álcali-Agregado (RAA).

Sabe-se que a RAA é dependente, dentre outros fatores, das condições de tensão as quais se encontra submetida a estrutura atingida. O modelo proposto incorpora os efeitos das tensões confinantes a um programa base que, inicialmente, foi implementado de maneira a simular a RAA para estruturas que sofrem livre expansão em pelo menos uma direção.

Pretende-se com este trabalho, além de proporcionar uma visão geral sobre os conceitos e funcionamento da RAA, apresentar alguns modelos encontrados na literatura e contribuir com a sugestão de uma adaptação entre os mesmos para a obtenção de resultados mais fiéis ao comportamento real das estruturas de concreto submetidas aos efeitos expansivos da RAA.

Desta forma, são aqui apresentados os resultados da aplicação do modelo com acoplamento entre a tensão e a RAA em estruturas atingidas, podendo-se adiantar que os resultados apresentam boa concordância qualitativa com as expectativas fundamentadas na teoria e em casos reais.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	VIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	6
3.1. MECANISMOS DA RAA.....	6
3.2. FATORES INFLUENTES.....	8
3.3. CONSEQÜÊNCIAS DA RAA.....	11
3.4. CONTROLE DA EXPANSÃO.....	16
3.4.1. Controle Preventivo.....	17
3.4.2. Controle Reativo.....	18
4. MODELAGEM DE EXPANSÃO POR RAA.....	21
4.1. LEI DE LARIVE PARA A DEFORMAÇÃO LIVRE.....	21
4.1.1. Justificativa para Adoção do Modelo com Desacoplamento entre Tensões Externas e a RAA.....	22
4.1.2. Comportamento Pós-Descarga.....	25
4.2. MODELO COM ACOPLAMENTO PROPOSTO POR CURTIS.....	25
4.3. MODELO DESACOPLADO PROPOSTO POR FARAGE.....	27
4.3.1. Aspectos do Modelo de Fissuração Adotado por Farage.....	28
4.4. MODELO DE FISSURAÇÃO.....	30
4.4.1. Relação Constitutiva para o Material Fissurado.....	31
4.4.2. Fissuração Distribuída Dúctil.....	32
4.4.3. Mecanismo de Fechamento/Reabertura de Fissuras.....	33
5. MODELO DA EXPANSÃO POR RAA COM ACOPLAMENTO TENSÃO X REAÇÃO.....	35
5.1. SÍNTESE DAS EXPRESSÕES UTILIZADAS NO MODELO.....	36
6. DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA.....	39
6.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROGRAMA.....	39
6.2. PRINCIPAIS ROTINAS.....	40
6.3. ROTINA RANKDESC.....	42
6.4. PROCEDIMENTOS RELATIVOS À MODELAGEM.....	43
6.4.1. Cálculo da Poro-Pressão Causada pela RAA.....	43
6.4.2. Deformação $Eps_{RAA}$ .....	44
6.4.3. Deformação $Eps_V$ .....	44
6.5. CRITÉRIO DE DETECÇÃO DE FISSURAS.....	45
7. APLICAÇÃO DO MODELO COM ACOPLAMENTO A ESTRUTURAS.....	47
7.1. ANEL DE DESCARGA.....	47
7.1.1. Resultados para o Anel de Descarga.....	50
7.2. BLOCO DE BARRAGEM.....	52
7.2.1. Resultados para o Bloco de Barragem.....	55
8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60



## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 3.1.</b> ATAQUE DOS ÍONS OH <sup>-</sup> AO GRUPO SILANOL (TURRIZIANI, 1986; HASPARYK, 2005).....	7
<b>FIGURA 3.2.</b> RUPTURA DAS LIGAÇÕES DO GRUPO SILOXANO PELOS ÍONS HIDROXILAS (TURRIZIANI, 1986; HASPARYK, 2005).....	7
<b>FIGURA 3.3.</b> FASES DA EXPANSÃO DO GEL – A) EXPANSÃO LIVRE; B) EXPANSÃO CONFINADA (MADUREIRA,2007) .....	8
<b>FIGURA 3.4.</b> EVOLUÇÃO DA EXPANSÃO, NO CASO UNIAXIAL, NO TEMPO (CAPRA E BOURNAZEL, 1998; CARRAZEDO, 2004).....	10
<b>FIGURA 3.5.</b> DORMENTE DE CONCRETO PROTENDIDO (MADUREIRA, 2007).....	10
<b>FIGURA 3.6.</b> ESQUEMA DA ALTERAÇÃO DA GEOMETRIA ORIGINAL DO ANEL DE DESCARGA DA ESTAÇÃO GERADORA MACTAQUAC, CANADÁ (CURTIS, 1995) .....	12
<b>FIGURA 3.7</b> PONTE EM BEIJIN AFETADA PELA RAA (LOPES, 2004).....	12
<b>FIGURA 3.8.</b> REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO NA UHE FURNAS (HASPARYK, 2005) .....	13
<b>FIGURA 3.9.</b> BARRAGENS ATINGIDAS PELA RAA NO BRASIL (ANDRADE, 1997) .....	13
<b>FIGURA 3.10.</b> BLOCO DE FUNDAÇÃO DO EDIFÍCIO APOLÔNIO SALES (SILVA, 2007) .....	16
<b>FIGURA 3.11.</b> PESCOÇOS DE PILARES DO EDIFÍCIO DA PIEDADE (SILVA, 2007).....	16
<b>FIGURA 3.12.</b> GEOMETRIA DEFORMADA PELA RAA E A GEOMETRIA ORIGINAL RECUPERADA COM ABERTURA DE JUNTAS DOS ANÉIS DE DUAS UNIDADES DA ESTAÇÃO GERADORA R. H. SAUNDERS (HO, 1995).....	19
<b>FIGURA 4.1.</b> CURVA PARA EXPANSÃO LIVRE PROPOSTA POR LARIVE (1997).....	22
<b>FIGURA 4.2.</b> RELAÇÕES <i>DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL X TEMPO</i> OBTIDAS POR LARIVE (1997) .....	24
<b>FIGURA 4.3.</b> RELAÇÕES <i>DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL X TEMPO</i> OBTIDAS POR LARIVE (1997)... ..	24
<b>FIGURA 4.4.</b> COMPORTAMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA REATIVOS APÓS DESCARGA (LARIVE, 1997).....	25
<b>FIGURA 4.5.</b> CURVA DE EXPANSÃO POR RAA COM ACOPLAMENTO DA TENSÃO (ADEGHE, 1995).....	26
<b>FIGURA 4.6.</b> MODELO UNIDIMENSIONAL COM FISSURAÇÃO DO CONCRETO DEVIDO À RAA (FARAGE, 2000) .....	27
<b>FIGURA 4.7.</b> LEI DE FISSURAÇÃO COESIVA UNIDIMENSIONAL .....	29
<b>FIGURA 4.8.</b> RELAÇÃO TENSÃO X DEFORMAÇÃO DERIVADA DA RELAÇÃO TENSÃO X DESLOCAMENTO.....	32
<b>FIGURA 4.9.</b> RELAÇÃO CONSTITUTIVA COM FISSURAÇÃO DÚCTIL (FARAGE, 2000).....	33
<b>FIGURA 4.10.</b> MECANISMO DE FECHAMENTO/REABERTURA DE FISSURAS .....	33
<b>FIGURA 6.1.</b> FLUXO DO PROGRAMA.....	40
<b>FIGURA 6.2.</b> REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ROTINA <i>RANKDESC</i> .....	43
<b>FIGURA 7.1.</b> SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA CASA DE FORÇA .....	48
<b>FIGURA 7.2.</b> GEOMETRIA DO ANEL DE DESCARGA .....	48
<b>FIGURA 7.3.</b> CONDIÇÕES DE CONTORNO DO PROBLEMA .....	49
<b>FIGURA 7.4.</b> MALHA DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADA .....	49
<b>FIGURA 7.5.</b> CURVA DE EXPANSÃO LIVRE DO GEL ADOTADA PARA O ANEL DE DESCARGA .....	50
<b>FIGURA 7.6.</b> VARIAÇÃO DA TENSÃO $\Sigma_x$ PARA O ANEL DE DESCARGA.....	51
<b>FIGURA 7.7.</b> VARIAÇÃO DA TENSÃO $\Sigma_y$ PARA O ANEL DE DESCARGA.....	51
<b>FIGURA 7.8.</b> EVOLUÇÃO DA PRESSÃO DO GEL NO ANEL DE DESCARGA .....	52
<b>FIGURA 7.9.</b> ESQUEMA DO BLOCO DE BARRAGEM ESTUDADO.....	53
<b>FIGURA 7.10.</b> GEOMETRIA DO MODELO BIDIMENSIONAL DO BLOCO DE BARRAGEM.....	53
<b>FIGURA 7.11.</b> CONDIÇÕES DE CONTORNO DO BLOCO.....	54
<b>FIGURA 7.12.</b> CARREGAMENTO CONSIDERADO NO BLOCO DE BARRAGEM .....	54

<b>FIGURA 7.13.</b> MALHA DE ELEMENTOS FINITOS EMPREGADA NO MODELO DO BLOCO DE BARRAGEM. ....	54
<b>FIGURA 7.14.</b> DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE COMPRESSÃO NA DIREÇÃO Y PARA O BLOCO SEM A ATUAÇÃO DO GEL.....	55
<b>FIGURA 7.15.</b> EVOLUÇÃO DA PRESSÃO DO GEL SEM E COM O ACOPLAMENTO DA REAÇÃO COM A TENSÃO.....	56

## **LISTA DE TABELAS**

<b>TABELA 3.1.</b> OCORRÊNCIA DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM BARRAGENS NO BRASIL .....	13
<b>TABELA 7.1.</b> DADOS DO CONCRETO .....	47

## 1. INTRODUÇÃO

Entre as inúmeras causas de degradação das estruturas feitas de concreto figuram as reações causadoras de produtos expansíveis, tais como expansão por sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão da armadura no concreto.

Na maioria dos casos, o concreto endurecido é quimicamente estável. As reações que podem acontecer depois da cura são aquelas que envolvem um agente agressivo externo como, por exemplo, o dióxido de carbono da atmosfera, o sal marinho ou sulfato de origem externa. Estas reações, previsíveis e bem conhecidas, são consideradas na produção de concretos adequados e com a resistência necessária para garantir a durabilidade das obras de acordo com cada ambiente.

As reações internas, por sua vez, envolvem apenas os elementos presentes desde o início na composição do concreto. O seu desenvolvimento é promovido pela umidade, que dificilmente pode ser evitada, principalmente em obras externas. Os elementos reativos são certos tipos de sílica presentes nos agregados e produtos alcalinos (óxido de sódio e potássio) provenientes essencialmente do cimento no caso da Reação Álcali-Agregado (LCPC, Guide Technique, 2003).

As Reações denominadas Álcali-Agregado ou Álcali-Sílica são reações químicas envolvendo íons alcalinos do cimento Portland, íons hidroxila e certos constituintes silicosos que podem estar presentes no agregado; resulta daí a importância da escolha do cimento, dos agregados e da compatibilidade destes materiais. Manifestam-se pela expansão e fissuração do concreto, com perda de resistência, elasticidade e durabilidade (DNIT 090/2006 – Patologias do concreto – Especificações de serviço).

A descoberta destas reações e dos seus efeitos deletérios é bastante recente, datando de 1940 nos Estados Unidos, e foram divulgadas em artigos publicados por Thomas Elwood Stanton no “Engineer News Record”, em fevereiro de 1940, e no “ASCE Proceedings”, em dezembro de 1940. Segundo Stanton, algumas estruturas de concreto e rodovias, construídas com cimento Portland na Califórnia, apresentavam fissuras oriundas da expansão causada pela reação química entre os álcalis do cimento e a sílica do agregado utilizado. Ele denominou este fenômeno de Reação Álcali-Agregado (RAA) (SILVA, 2007). Os primeiros casos registrados no Brasil datam de 1946. Atualmente, existem registros de evidências de

danos por RAA em dezenas de barragens, blocos de coroamento de fundações de pontes de concreto armado e em fundações de prédios em Pernambuco (MADUREIRA, 2007).

Alguns fatores importantes influenciam as Reações Álcali-Agregado, entre eles:

- O conteúdo de álcalis do cimento e a quantidade de cimento do concreto;
- A contribuição de íons alcalinos de outras fontes tais como aditivos, agregados contaminados com sais e penetração de água do mar ou de soluções salinas;
- A quantidade, o tamanho e a reatividade do constituinte reativo aos álcalis presentes no agregado;
- A disponibilidade de umidade junto à estrutura de concreto;
- A temperatura ambiente.

As principais evidências que denunciam a ocorrência da RAA, segundo SILVEIRA (1996) (citado em SABBAG, 2003), são:

- Fissuras orientadas em forma de mapa;
- Eflorescência e exsudação de gel;
- Descoloração do concreto;
- Agregados graúdos com bordas de reação;
- Poros do concreto preenchidos total ou parcialmente;
- Microfissuração da argamassa com preenchimento de gel.

A Reação Álcali-Agregado só é verdadeiramente identificada após testes laboratoriais, não se conhecendo, até a presente data, um método definitivo de recuperação de estruturas afetadas pela RAA. Trata-se de um assunto complexo, com alto grau de sofisticação, tendo em vista seus diversos aspectos que abrangem conceitos químicos, mineralógicos, de engenharia e de ciência dos materiais.

É importante dizer, ainda, que qualquer estrutura de concreto é passível de ser afetada pela RAA, entretanto, por se tratar de uma reação dependente da umidade para se processar, as barragens, os blocos de fundações parciais ou totalmente submersos e demais estruturas hidráulicas são mais suscetíveis, segundo FARAGE (2000).

A fim de discorrer sobre os aspectos gerais da RAA, suas conseqüências e mostrar os resultados dos estudos numéricos qualitativos feitos sobre o comportamento de estruturas de concreto afetadas, este trabalho se organiza da seguinte maneira:

Na *Seção 1* - “Introdução” - é feita uma breve apresentação do tema Reação Álcali-Agregado com definições, um pouco de história e fatores influentes da reação.

Na *Seção 2* - “Objetivos” - é explicada a motivação deste trabalho e o que se pretende com os resultados buscados.

A *Seção 3* - “Revisão da Literatura” - traz os mecanismos da reação com uma breve abordagem química dos mesmos; os fatores influentes da reação explicados de maneira mais detalhada; a apresentação de alguns aspectos da reação sob a visão de outros autores; as conseqüências da RAA ilustradas com a descrição de casos nacionais e internacionais; e os tipos de controle existentes para evitar ou atenuar os efeitos expansivos da reação.

A *Seção 4* - “Modelagem da Expansão por RAA” - descreve os modelos que serviram de base para o desenvolvimento do presente trabalho.

A *Seção 5* - “Modelo da Expansão por RAA com Acoplamento Tensão x Reação” - descreve o modelo proposto com este trabalho.

Na *Seção 6* - “Descrição Geral do Programa” - encontra-se uma explicação sobre o funcionamento do programa e suas principais rotinas, e também a forma como algumas considerações do modelo foram adaptadas para melhor representarem os casos estudados e para possibilitar sua implementação.

A *Seção 7* - “Aplicação do Modelo com Acoplamento” - traz os exemplos de estruturas afetadas pela RAA considerados no estudo e uma comparação entre os resultados obtidos com o modelo com acoplamento e com o modelo sem acoplamento com a tensão.

Na *Seção 8* - “Conclusões e Trabalhos Futuros” - são apresentadas as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados deste trabalho e as pretensões para trabalhos futuros.

## 2. OBJETIVOS

Uma vez iniciada a Reação Álcali-Agregado torna-se, na maioria dos casos, impossível a interrupção do processo reativo. No sentido de se evitar os efeitos deletérios da RAA é importante a adoção de medidas remediadoras, cujo sucesso depende da estimativa do desenvolvimento dos campos de tensão e deformação estruturais. Tal fato mostra a importância de um modelo computacional que seja capaz de simular de modo realista o comportamento de estruturas atingidas pela álcali-reação (FARAGE, 2000).

O objetivo deste trabalho é aprimorar o modelo de comportamento do concreto sujeito à RAA proposto por FARAGE (2000). O modelo originalmente implementado em um programa de elementos finitos reproduz de modo satisfatório o comportamento do concreto reativo sob determinadas condições de tensão, mais especificamente situações classificadas como expansão livre, em que se pode considerar a reação química desacoplada do estado de tensões. Sabe-se que a reação é inibida pelo confinamento, portanto neste trabalho será incorporado ao modelo o acoplamento da reação com a tensão.

Os resultados aqui apresentados serão de caráter exclusivamente qualitativo.



### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. Mecanismos da RAA

Apesar de os mecanismos que regem a reação não serem muito bem compreendidos, os três principais fatores envolvidos na ocorrência da RAA no concreto são bem conhecidos:

- Sílica reativa, encontrada em alguns agregados (Si);
- Alcalinos presentes no cimento (Na, K);
- Água.

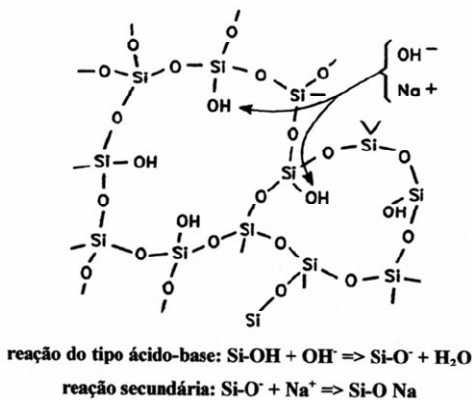
Existem três tipos de RAA, sendo a classificação dependente da composição mineralógica do agregado:

- Reação álcali-sílica;
- Reação álcali-silicato;
- Reação álcali-carbonato.

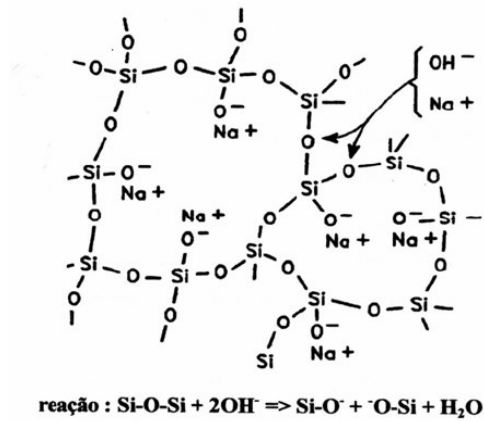
Os três tipos de RAA evoluem de forma diferente, segundo mecanismos próprios, embora causem efeitos semelhantes ao concreto.

Um dos mecanismos mais aceitos para explicar este tipo de reação, apresentado por diversos pesquisadores, como GLASSER & KATAOKA (1981a,b), é a ocorrência de um ataque ao grupo silanol (SiOH) pelos íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) através de uma reação ácido-base. Posteriormente, há um equilíbrio entre os cátions  $\text{Na}^+$  e os ânions de oxigênio  $\text{O}^{2-}$ , formando assim o gel sílico-alcálico, conforme a Figura 3.1.

A segunda etapa da reação, demonstrada na Figura 3.2, se dá pelo ataque dos íons hidroxilas ao grupo siloxano, gerando os monômeros silicatos ( $\text{H}_2\text{SiO}_4$ ), que permitem a absorção de água e de íons alcalinos, resultando em expansão, fissuração, exsudação de gel e deterioração da estrutura. (BULLETIN 79, 1991 e HASPARYK, 1999 citados em HASPARYK, 2005).



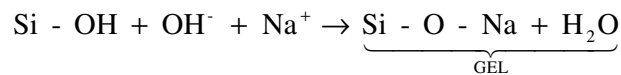
**Figura 3.1.** Ataque dos íons  $\text{OH}^-$  ao grupo silanol (TURRIZIANI, 1986; HASPARYK, 2005)



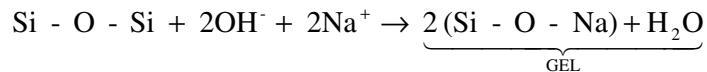
**Figura 3.2.** Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas (TURRIZIANI, 1986; HASPARYK, 2005)

Resumindo as duas fases distintas deste processo, tem-se:

- Formação de um gel higroscópico através da reação entre a sílica reativa do agregado com os álcalis do cimento:



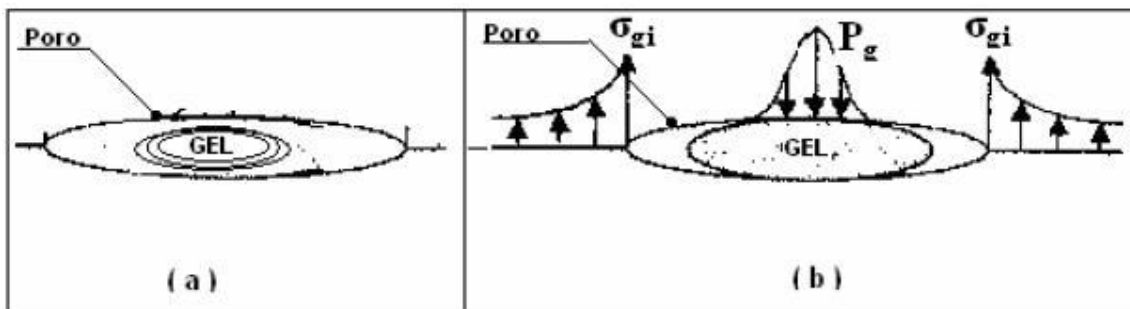
- Absorção de água pelo gel, causadora da sua expansão:



Olhando-se o segundo passo da reação, pode-se deduzir que se a umidade não for suficiente, a expansão não ocorrerá, ainda que o primeiro passo se processe gerando o gel higroscópico. Por outro lado, havendo água suficiente para a absorção e expansão do gel, enquanto existir espaço para que este se aloje não haverá expansão do concreto, sendo possível que a RAA ocorra sem que o material ou a estrutura sofra deformações. Destas observações pode-se concluir que, uma vez formado o gel, a expansão do concreto está subordinada a dois fatores:

- quantidade de água presente para ser absorvida pelo gel e
- porosidade do material

Sendo assim, durante o desenvolvimento da reação a expansão do gel pode passar por duas fases: a) expansão livre (Figura 3.3a) e b) expansão confinada (Figura 3.3b).



**Figura 3.3.** Fases da expansão do gel – a) expansão livre; b) expansão confinada (MADUREIRA,2007)

Quando o gel se expande até ocupar plenamente os espaços vazios ele passa a exercer pressões internas nas paredes dos poros, fazendo com que a matriz de concreto acompanhe o processo expansivo.

Após a fase de desenvolvimento verifica-se a fase de repouso na qual a matriz de concreto tem sua expansão interrompida pela abertura de novos espaços através da formação de fissuras, fazendo com que o gel volte para a condição de livre expansão.

### 3.2. Fatores Influentes

Além do conteúdo de álcalis no concreto, da reatividade do agregado utilizado, da

umidade e da porosidade já citados anteriormente, a temperatura e a existência de tensões confinantes também influenciam no desenvolvimento da RAA.

A temperatura age como catalisadora da reação, possuindo efeito exclusivamente sobre a cinética da reação e não sobre sua amplitude. Isso acontece porque o aumento da temperatura faz com que haja 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 (CARRAZEDO, 2004). Em países e regiões de clima frio, verifica-se que a reação ocorre de forma mais lenta. Entretanto, algumas dessas regiões podem surgir como exceções, apresentando casos de destaque na ocorrência da RAA, o que é justificado pela umidade adicional favorecida pela fissuração decorrente dos ciclos de gelo e degelo.

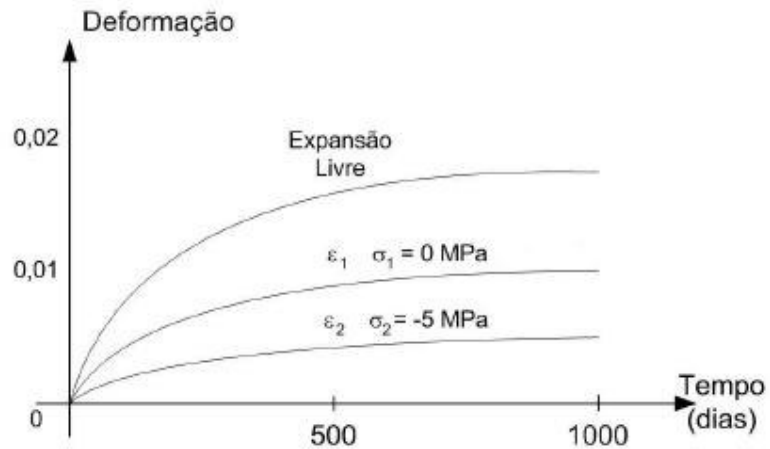
As tensões de compressão são agentes inibidores dos efeitos expansivos da RAA na direção em que são aplicadas. Contudo, na direção ortogonal à direção de aplicação do carregamento, a expansão que ocorre sofre um acréscimo devido à restrição existente. Este efeito é mostrado pelo gráfico da Figura 3.4 que representa a variação da deformação no tempo de um corpo de prova submetido a ensaio acelerado com tensão aplicada apenas na direção 2. Já as tensões de tração contribuem para o aumento da expansão em sua direção. Trabalhos experimentais indicam que, para valores baixos de tensão uniaxial externa, a expansão volumétrica causada pela reação é praticamente constante (LARIVE, 1997).

Os efeitos das tensões confinantes no sentido de inibir a ocorrência da reação química são discutidos em diversos trabalhos sobre o tema. Experimentos feitos por SHAYAN e QUICK (1992) com dormentes de concreto protendido mostram que as fissuras se formam na direção da compressão (Figura 3.5), o que indica que a reação foi contida apenas naquela direção. Em contrapartida, há quem atribua às tensões confinantes o efeito benéfico de inibir a RAA uma vez que atuam como agentes capazes de impedir a entrada de água nos poros do concreto e seu contato com o gel (SILVEIRA, 1997 citado em MADUREIRA, 2007).

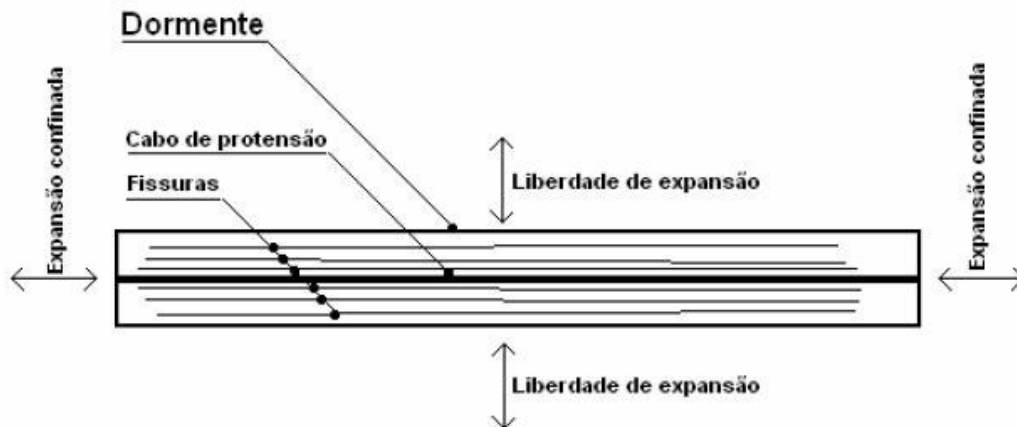
Ainda em termos de tensões confinantes, pode-se atribuir às barras de aço em elementos estruturais de concreto armado a capacidade de atenuar as expansões por RAA, uma vez que desempenham a função de conter deformações impostas ao concreto (MADUREIRA, 2007). Entretanto, segundo autores como Nizar Smaoui e Marc-André

Bérubé a possibilidade da perda de aderência entre o concreto afetado pela RAA e as barras de aço não deve ser descartada, principalmente para estruturas submetidas a freqüentes ciclos de gelo/degelo e molhagem/secagem (SILVA, 2007). Neste caso, a capacidade das barras de atuarem contra os efeitos expansivos nocivos da RAA estaria comprometida.

Quando a RAA ocorre sob confinamento há uma modificação no estado de solicitações com a redistribuição de tensões. Segundo MADUREIRA (2007), a evolução das expansões por RAA eleva a intensidade das tensões de confinamento que por sua vez, como já exposto, atenuam tais expansões. Mas neste processo iterativo a redistribuição de tensões passa, a partir de certo limite, a produzir fissuração, aumentando a permeabilidade e favorecendo a RAA.



**Figura 3.4.** Evolução da expansão, no caso uniaxial, no tempo (CAPRA e BOURNAZEL, 1998; CARRAZEDO, 2004)



**Figura 3.5.** Dormente de concreto protendido (MADUREIRA, 2007)

### 3.3. Conseqüências da RAA

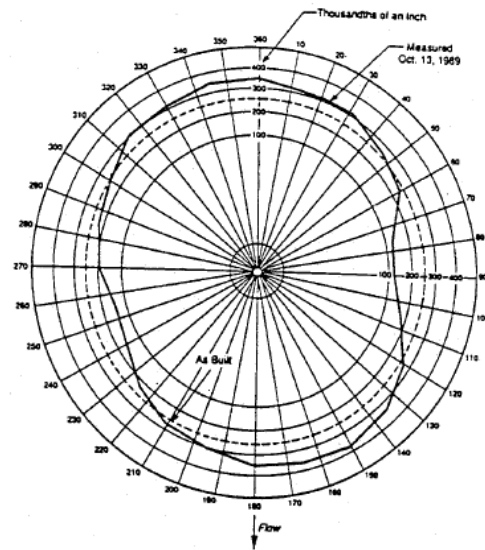
A expansão do gel silicato produzido na RAA induz deformações na estrutura, gerando fissuras que permitem a exsudação do fluido viscoso derivado do gel, por vezes utilizado como indicador da ocorrência da reação (MADUREIRA, 2007).

A Reação Álcali-Agregado promove alterações das propriedades físicas do concreto tais como a diminuição da resistência e do módulo de elasticidade. A integridade e a continuidade da massa de concreto são comprometidas pela fissuração provocada pela RAA, podendo esta gerar movimentações excessivas que ocasionam deficiências funcionais.

Como exemplo de caso de RAA que afetou diretamente o desempenho de uma estrutura, pode-se citar a Estação Geradora Mactaquac, no Canadá, que entrou em funcionamento em 1968. Em meados da década de 70 começaram a se observar os primeiros sinais, com uma crescente abertura de uma junta de dilatação ao longo da superestrutura da casa de força. Em 1980 começaram a ocorrer vazamentos nas estruturas do vertedouro, da tomada d'água e do túnel de desvio. A casa de força também sofreu deformações oriundas da RAA, que provocou, entre outros problemas, a ovalização do anel de descarga. A Figura 3.6 mostra a mudança ocorrida na geometria do anel de descarga de uma das unidades geradoras, em 1990 (FARAGE, 2000).

A Figura 3.7 mostra uma ponte em Beijin afetada pela RAA. As vigas atingidas pela fissuração paralela aos cabos de protensão são exemplos reais dos resultados obtidos por SHAYAN e QUICK (1992), citados anteriormente.

Na UHE Furnas, as primeiras observações do fenômeno da RAA ocorreram em 1976, após 13 anos do término da construção. As principais conseqüências da expansão por RAA foram: fissuração nos pilares do vertedouro, nos blocos de ancoragem dos condutos forçados e na casa de força, bem como desnivelamento do coroamento entre o muro central e os blocos adjacentes. Alguns dos efeitos da RAA na UHE Furnas podem ser vistos na Figura 3.8. A Figura 3.9 mostra o aspecto de elementos estruturais da Barragem de Mascarenhas de Moraes e da Barragem de Porto Colômbia.



**Figura 3.6.** Esquema da alteração da geometria original do anel de descarga da Estação Geradora Mactaquac, Canadá (CURTIS, 1995)



**Figura 3.7** Ponte em Beijin afetada pela RAA (LOPES, 2004)



a) Desnívelamento entre juntas e fissuras superficiais (vertedouro / muro de transição).

b) Fissuras mapeadas no topo do pilar

**Figura 3.8.** Reação Álcali-Agregado na UHE Furnas (HASPARYK, 2005)



a) Fissuras em mapa na crista de um muro divisorio da calha do vertedouro da Barragem de Mascarenhas de Moraes.

b) Fissuras e deslocamento em um pilar do vertedouro da Barragem de Porto Colômbia.

**Figura 3.9.** Barragens atingidas pela RAA no Brasil (ANDRADE, 1997)

No Brasil existem inúmeros registros de ocorrências da RAA, principalmente em barragens, como mostra a Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Ocorrência de reação álcali-agregado em barragens no Brasil

Companhia	UHE/Barragem	Situação/Ocorrência	Construção/Evidência da RAA	Tipo de Reparo ou Recuperação
CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco	Paulo Afonso I	Juntas abertas	1955 / 1978	-
	Paulo Afonso II	Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos e inclinação das pás.	1962 / 1978	-
	Paulo Afonso III	Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos e inclinação das pás.	1973 / 1978	-



	Paulo Afonso IV	Fissuração, inclinação dos eixos das turbinas, ovalização do poço da turbina, redução de folgas no desnivelamento da tampa da turbina	1979 / 1985	Em estudo.
	Moxotó	Fissuração, ovalização da casa de força e vertedouro de fundo e roçamento de pás e turbina.	1974 / 1978	Corte de juntas.
CEMIG - Cia. Energética de Minas Gerais	Jaguara	Alteamento da crista	1971 / 1988	-
	Peti	Fissuração e alteamento da crista.	1945 / 1964	Injeção de cimento, substituição do concreto superficial danificado, tratamento das fissuras, impermeabilização da face montante, em 1975; nova impermeabilização da face montante em 1984; permanência de vazamentos (1997).
FURNAS - Centrais elétricas	Furnas	Fissuração nos topos dos pilares do vertedouro, blocos de ancoragem dos condutos forçados, superfície do salto de esqui, casa de força, desnivelamento do coroamento entre muro central e blocos adjacentes.	1963 / 1976	Monitoramento.
	Mascarenhas de Moraes	Fissuração na crista, exsudação de gel e diminuição de folgas de máquinas.	1957 / 1996	Recentragem de máquinas e ajustes do mancal.
	Estreito (em avaliação)	Exsudação de gel	- /1996	
	Porto Colômbia (em avaliação)	Exsudação de gel e ovalização do poço da turbina	1973 / 1985	Esmerilhamento de anéis.
ELETROPAULO	Traição	Fissuração, infiltrações, desalinhamento do eixo das bombas, ovalização de poço, aquecimento e desgaste de mancais-guia e travamento da comporta.	1940 / 1980	-
	Billing-Pedras	Fissuração e expansão dos pilares do vertedouro.	1936 / 1992	Em estudo.
SABESP - Cia. De Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A.	Pedro Beicht	Fissuração, infiltração, lixiviação	1933 / 1991	-
	Sistema Cantareira	Ocorrência de RAA na tomada d'água do túnel 6.	1974 / 1989	Ajuste e recuperação das guias das grades, modificações nas comportas ensecadeiras.

LIGHT - Serviços de Eletricidade S.A.	Ilha dos Pombos	Fissuração nos pilares do vertedouro e paredão do canal adutor.	1924 / 1991	Injeção de cimento, recomposição do concreto segregado, impermeabilização de superfícies em contato com água através de concreto projetado.
CBA - Cia. Brasileira de Alumínio	Jurupará	Fissuração e vazamentos.	1937 / -	Atirantamento, injeção de fissuras, impermeabilização com concreto a montante.
ACESITA S.A.	Sá Carvalho	-	-	-
EMBASA - Empresa Baiana de Água e Saneamento	Joanes II	Fissuração	1971 / 1988	-

(Fonte: SABBAG, 2003. Original de “Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto”, 1997).

Historicamente, a ocorrência da reação álcali-agregado esteve limitada às obras de barragens e pontes. No entanto, nos últimos anos, essa reação começou a ser verificada em edifícios, causando, sobretudo, fissuras nos blocos de fundações. A Região Metropolitana de Recife registrou um número surpreendente de casos. Uma possível explicação para este novo grupo de casos, divulgada no meio técnico e em eventos sobre a Reação Álcali-Agregado, é a existência de lençóis freáticos rasos na cidade de Recife. Muitos dos prédios da região possuem fundações em contato direto com a água. Outro fator é a reatividade dos agregados extraídos da região, comprovada através de ensaios petrográficos realizados na Universidade Federal de Pernambuco.

A Figura 3.10 mostra o quadro fissuratório dos blocos de fundação do Edifício Apolônio Sales. Neste caso em particular a conclusão de que modificações observadas na superestrutura do prédio eram conseqüências da RAA demorou a ser formulada. Após um ano de vistorias devido à flambagem súbita de um vidro que separava o meio interno do meio externo, decidiu-se pela abertura da fundação do edifício devido aos resultados de inspeções feitas no Edifício Areia Branca. Este último entrou em colapso em 2004 por motivos de má execução dos elementos estruturais de concreto armado, mas apresentava RAA avançada em suas fundações, o que até o laudo final da perícia figurou como possível motivo da ruína, o que acabou não se confirmando.

Já o Edifício da Piedade, também em Recife, apresentou problemas com RAA em alguns de seus pilares, os quais se apresentaram totalmente deteriorados. Nas Figuras 3.11a e

3.11b é possível observar a ausência de concreto, oxidação em estado avançado e barras de aço flambadas.



**Figura 3.10.** Bloco de fundação do Edifício Apolônio Sales (SILVA, 2007)



a) Ausência de concreto e oxidação em estado avançado.



b) Ausência de concreto, oxidação e barras de aço flambadas.

**Figura 3.11.** Pescoços de pilares do Edifício da Piedade (SILVA, 2007)

### 3.4. Controle da Expansão

O controle sobre a RAA pode ser feito de duas maneiras distintas:

- Preventiva: estudo dos materiais antes da construção;
- Reativa: medidas de correção após o aparecimento de evidências do fenômeno.

O estudo dos agregados antes da construção permite escolher, caso sejam reativos, entre não utilizá-los ou adotar técnicas especiais para a fabricação do concreto no sentido de minimizar os efeitos da reação.

#### *3.4.1. Controle Preventivo*

É conseguido a partir da tomada de algumas medidas, como por exemplo:

- Uso exclusivo de agregados não reativos;
- Uso de cimento com níveis seguros de álcalis;
- Uso de adições minerais, como cinzas volantes ou escória de alto-forno moída.

A avaliação preliminar da rocha ou dos agregados pode ser feita através da análise petrográfica, que tem como objetivo identificar os minerais potencialmente reativos presentes, do ponto de vista da RAA. No estudo do cimento, é importante que seja verificado o teor de álcalis solúveis, o qual pode ser determinado através de sua análise química (HASPARYK,2005).

Quando comprovada a presença de agregados reativos pela análise petrográfica, deverá ser providenciada a troca ou adequação dos materiais. Entretanto, se a jazida da rocha reativa é a única disponível nas proximidades da obra pode se tornar economicamente inviável a troca dos agregados. Pode-se agir no sentido de trocar o cimento por um tipo que contenha baixo teor de álcalis, como o Cimento Portland de Alto Forno – CP III ou o Cimento Portland Pozolânico – CP IV. No entanto, fixar apenas um limite (que corresponde à presença máxima de 0,60% do equivalente alcalino  $\text{Na}_2\text{O}$ ) para a presença de alcalinos no cimento não é garantia da inibição da reação além de também poderem existir fontes externas adicionais de álcalis. Uma opção que também pode se mostrar viável é o emprego de adições minerais/pozolânicas tais como a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, o metacaulim, a cinza volante ou as pozolanas naturais. Estes cimentos e os teores das adições a serem empregados devem ser investigados em conjunto com o agregado reativo, novamente através de ensaios de reatividade em laboratório, seguindo a ASTM C-1567 - “Potencial alkali-silica reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (accelerated mortar-bar method)”, com o objetivo de verificar a melhor opção na inibição ou redução das expansões causadas pela

RAA (HASPARYK, 2005).

Alguns valores normalmente empregados, utilizados na prática ou sugeridos a partir de experimentações por alguns autores, são conhecidos a seguir: sílica ativa de 10% a 15%, cinza de casca de arroz amorfa, acima de 12%, metacaulim de 10 a 25%, todos em substituição ao cimento e na presença de aditivo superplastificante, pozolana natural entre 20% e 30%, cinza volante entre 25% e 50% e escória de alto-forno moída, entre 40% e 65%. (HASPARYK, 2005).

A adição de fibras de aço também faz com que o processo de fissuração frágil da matriz seja controlado, uma vez que as fissuras são interligadas pelas fibras e, como resultado, há um aumento na tenacidade e na resistência à tração e ao impacto. A forma como essas propriedades vão ser modificadas vai depender do tipo de matriz, das propriedades físicas e geométricas das fibras e da interação entre a fibra e a matriz (CARVALHO, 2008). Ensaio feitos por CARVALHO (2008) mostraram que a utilização de fibras de aço de 13,0 mm de comprimento com fração volumétrica de 2% apresentou o melhor resultado em relação a outras frações volumétricas testadas, reduzindo em cerca de 61% a expansão da matriz.

#### 3.4.2. *Controle Reativo*

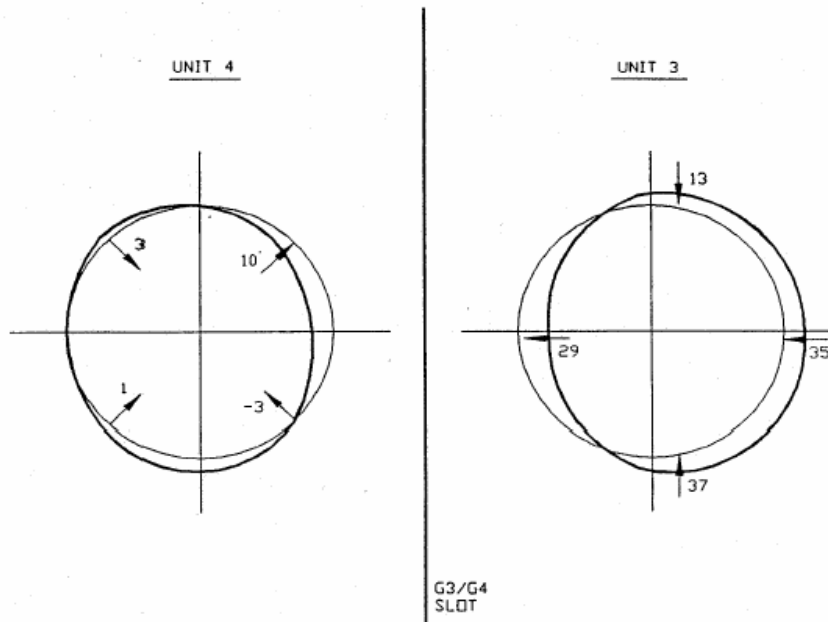
Existem poucas opções para a mitigação da expansão gerada pela RAA em barragens de concreto já construídas, principalmente devido ao caráter maciço da barragem e à inacessibilidade e complexa geometria da estrutura (STARK, 1995).

O monitoramento das estruturas constitui recurso importante para a identificação e prevenção da RAA no decorrer da sua vida útil. Para as estruturas que já apresentam sinais de RAA, permite a aquisição de dados auxiliares para a escolha de medidas corretivas (MADUREIRA, 2007).

Uma técnica reconhecida por sua ação redutora da temperatura e do pH da solução alcalina é a injeção de CO<sub>2</sub> na estrutura. Entretanto o CO<sub>2</sub> acelera de maneira significativa a corrosão das armaduras de aço (ANDRIOLO, 1997 e FOURNIER & BÉRUBÉ, 2000 citados em MADUREIRA, 2007).

A limitação da quantidade de água intersticial é eficaz na correção dos efeitos da RAA. Pode ser feita através de micro-drenagem e de impermeabilização superficial. A injeção

de resinas epóxi e microsilica tem sido eficiente na tentativa de estabilizar o processo de percolação de água. Destaca-se também a utilização de argamassas polimerizadas sobre a superfície do concreto para reduzir a penetração da umidade. Mas em casos em que já existe água em quantidade suficiente absorvida pela estrutura este método se torna ineficaz no controle da formação do gel e sua expansão.



**Figura 3.12.** Geometria deformada pela RAA e a geometria original recuperada com abertura de juntas dos anéis de duas unidades da Estação Geradora R. H. Saunders (HO, 1995)

Outra técnica muito utilizada, a abertura ou ampliação de juntas provoca a liberação de tensões criadas pelo seu fechamento quando da expansão do gel da RAA. Esta técnica foi a utilizada para amenizar os efeitos avançados da RAA na Estação Geradora R. H. Saunders, no Canadá. Após 25 anos sofrendo com problemas estruturais e operacionais diagnosticou-se em 1991 a RAA como causadora da fissuração intensa da estrutura, do fechamento de juntas de dilatação, de danos à pavimentação e da mudança de configuração no anel de descarga de algumas unidades na casa de força, como mostrado na Figura 3.6. Este último efeito da RAA pode causar prejuízos ao funcionamento das turbinas. A liberação, através desta técnica, das tensões acumuladas com o efeito expansivo do gel evitou maiores deformações nas turbinas e possibilitou a recuperação da geometria circular inicial do anel de descarga. Esta estrutura foi instrumentada e monitorada através de um sistema de aquisição de dados automático e modelos tridimensionais em elementos finitos foram desenvolvidos para representá-la. Os

modelos foram calibrados e usados na estimativa de localização e frequência de abertura das juntas (FARAGE, 2000). A Figura 3.12 mostra um esquema da geometria deformada e a geometria original recuperada dos anéis de duas unidades da Estação Geradora R. H. Saunders.

## 4. MODELAGEM DE EXPANSÃO POR RAA

A influência da tensão na modelagem da expansão por RAA ainda é um assunto bastante controverso. Na literatura especializada encontram-se modelos propostos que admitem a RAA dependente das tensões e outros que consideram a RAA desacoplada das tensões. Maiores informações sobre tais modelos podem ser encontrados nas referências LARIVE (1997), FARAGE (2000), CARRAZEDO (2004) e MADUREIRA (2007).

Neste trabalho serão descritos o modelo de expansão livre de LARIVE (1997), o modelo proposto por FARAGE (2000, 2004), com desacoplamento entre tensão e reação, e o modelo de CURTIS (1995), que considera o acoplamento.

### 4.1. Lei de Larive para a Deformação Livre

O primeiro passo para a simulação dos efeitos conjuntos da RAA e tensões externas sobre o concreto é a adoção de uma lei de evolução da expansão do gel (FARAGE, 2000). O modelo de expansão livre proposto por LARIVE (1997) para o concreto reativo se utiliza de conceitos termodinâmicos para representar a evolução de uma reação química qualquer. A partir deste modelo inicial, associado a observações experimentais, chega-se à modelagem macroscópica específica do aumento de volume provocado pela RAA. A expressão de Larive é:

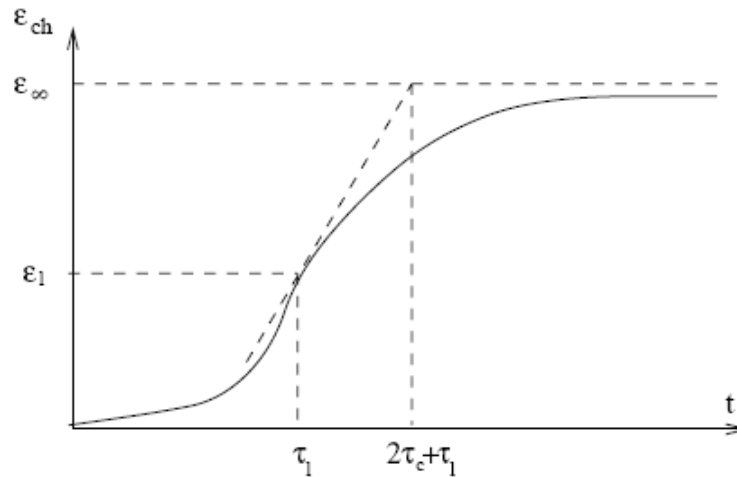
$$\varepsilon_{ch} = \varepsilon_{\infty} \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}}}{1 + e^{-\frac{t - \tau_l}{\tau_c}}} \quad (4.1)$$

sendo  $\varepsilon_{ch}$ , a deformação química unidimensional, função de três parâmetros independentes: a deformação química assintótica ( $\varepsilon_{\infty}$ ); o tempo de latência ( $\tau_l$ ) e o tempo característico ( $\tau_c$ ). A Figura 4.1 mostra a curva relativa à expressão 4.1.

Os três parâmetros independentes podem ser identificados através de um ajuste das curvas obtidas experimentalmente a partir de corpos de prova submetidos a condições variadas de umidade e temperatura. O tempo de latência representa a fase de latência, na qual a expansão é progressiva, e tende a aumentar com a abertura de fissuras. O tempo característico define a fase de atenuação exponencial, durante a qual a eficácia dos produtos



da reação diminui por causa do aumento do espaço poroso ocasionado pelas deformações. Ambos os tempos, de latência e característico, dependem da umidade e da temperatura. Mas, enquanto o tempo característico segue uma lei do tipo Arrhenius, com possibilidade de se calcular a energia de ativação da reação tanto no âmbito macroscópico quanto no microscópico, o tempo de latência varia de forma exponencial com a temperatura, de forma muito mais significativa que o tempo característico, o que identifica a fase de latência como a fase principal do desenvolvimento da reação.



**Figura 4.1.** Curva para expansão livre proposta por LARIVE (1997)

#### 4.1.1. *Justificativa para Adoção do Modelo com Desacoplamento entre Tensões Externas e a RAA*

Os estudos experimentais realizados por LARIVE (1999) abrangem diversos aspectos do comportamento do concreto sob efeito da RAA, entre os quais a influência da tensão. Em seu programa experimental são realizadas medições das deformações longitudinais e transversais em corpos de prova de concreto mantidos sob carregamento uniaxial constante. Análises mineralógicas durante as medições permitiram verificar o andamento da reação química durante a aplicação do carregamento.

Os CPs foram submetidos a três valores diferentes de tensão: 5 MPa, 10 MPa e 20 MPa. Na direção de aplicação da tensão observou-se uma forte redução da expansão, em comparação com os CPs deixados em expansão livre (Figura 4.2). A deformação longitudinal dos CPs em expansão livre atinge em média 0,2%, limita-se a 0,03% sob 5 MPa e 10 MPa e

apresenta valores negativos sob 20 MPa. A possibilidade vislumbrada por estes resultados de a aplicação de tensão ser um método eficaz para anular a expansão por RAA foi verificada realizando-se medições das deformações na direção transversal dos mesmos CPs.

As deformações transversais dos CPs sob tensões de 5 MPa e 10 MPa são superiores aos valores obtidos em expansão livre. É este comportamento que comprova a existência de uma transferência das deformações impedidas na direção do carregamento para a direção livre dos CPs. Portanto, a expansão não foi impedida pelo carregamento uniaxial. As curvas relativas à aplicação de 20 MPa também apresentam deformações superiores às obtidas sob expansão livre, comprovando a transferência de uma parcela das deformações para a direção livre (Figura 4.3). Porém, suas deformações foram inferiores às obtidas para 5 MPa. Este comportamento é explicado pela análise das deformações volumétricas.

Segundo LARIVE (1997), os CPs submetidos a 5 MPa e a 10 MPa apresentaram variação volumétrica comparável à dos CPs em expansão livre, comportamento que novamente leva a crer que as deformações impedidas na direção de aplicação da carga sejam transferidas para as direções livres. Já os CPs submetidos a 20 MPa apresentaram deformação volumétrica muito inferior à dos CPs em expansão livre. Análises por microscopia eletrônica por varredura mostraram que, apesar das menores deformações, a formação dos produtos da reação manteve-se crescente, o que mostra que a aplicação da carga não impediu a RAA. A autora concluiu que a menor variação volumétrica se deu pela microfissuração de origem mecânica, induzida pela tensão elevada (cerca de 50% da resistência à compressão do concreto), que abriu espaço para os produtos da reação se alojarem e, ainda, pela exsudação do gel formado.

À luz destes resultados, Larive considera válida a hipótese de desacoplamento entre a tensão externa e a RAA para o caso de carregamento analisado (FARAGE, 2000).

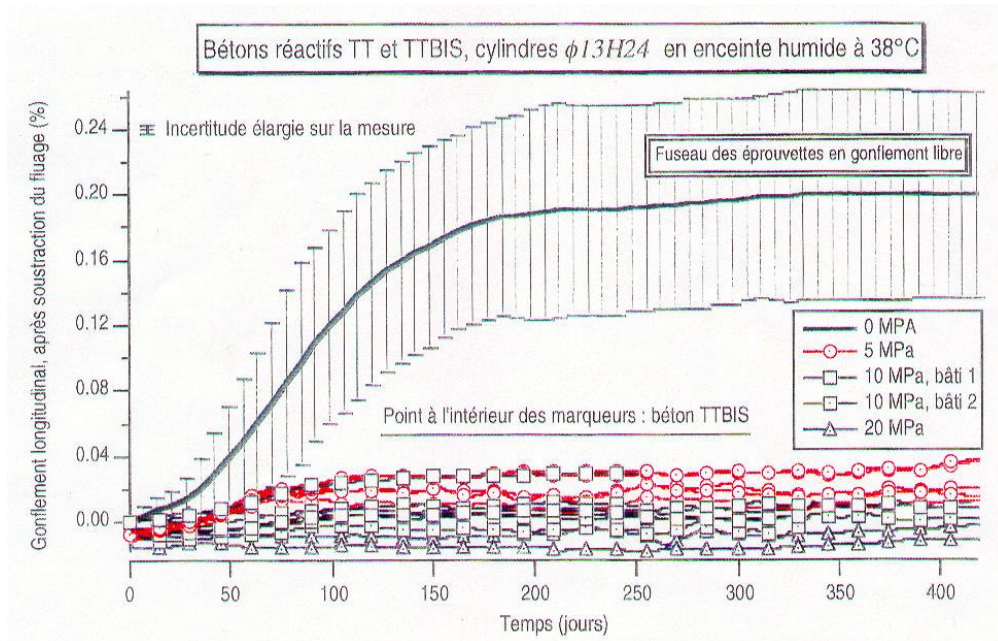


Figura 4.2. Relações *deformação longitudinal x tempo* obtidas por LARIVE (1997)

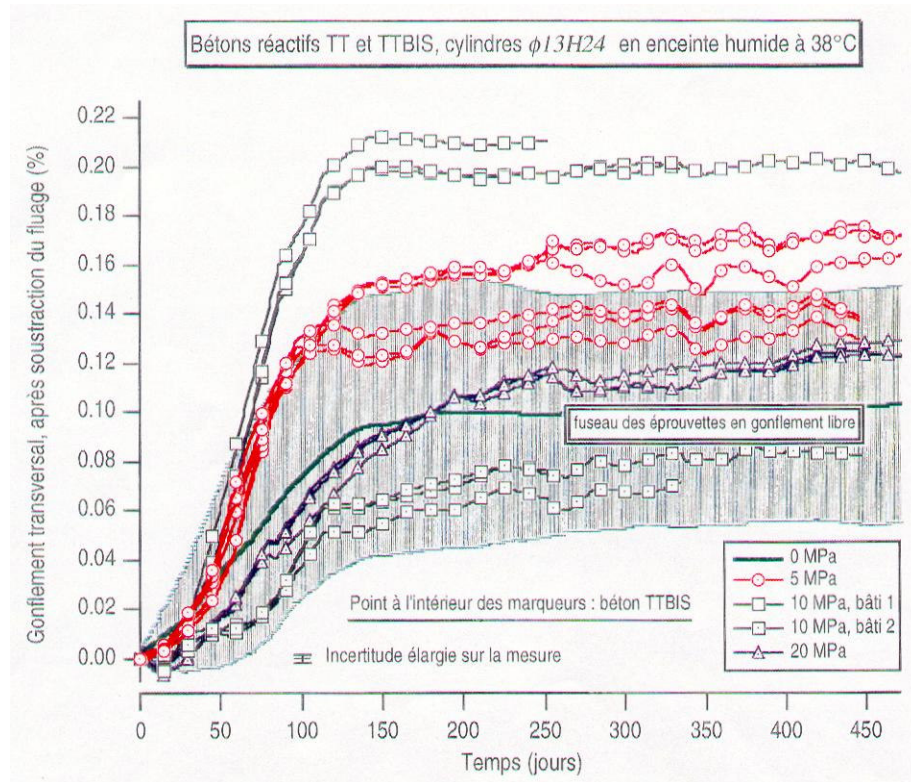
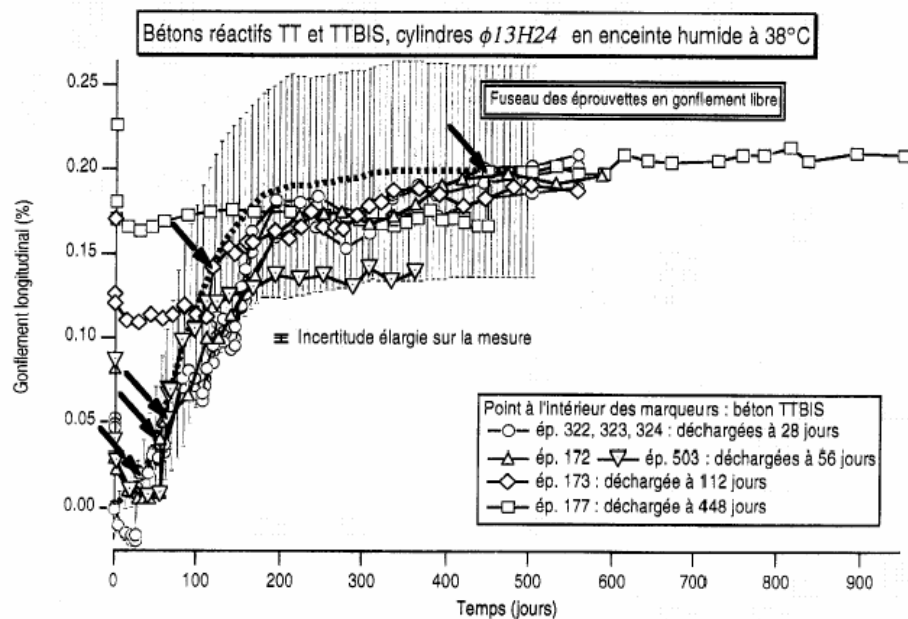


Figura 4.3. Relações *deformação transversal x tempo* obtidas por LARIVE (1997)

#### 4.1.2. Comportamento Pós-Descarga

A descrição do comportamento do concreto reativo sob condições de descarga/recarga é de extrema importância para a modelagem da expansão por RAA, uma vez que uma das medidas mais comumente adotadas na recuperação de estruturas afetadas é a abertura de juntas de dilatação (FARAGE, 2000).

Através de sua análise experimental Larive mostrou que em corpos-de-prova descarregados no 28°, no 56° e no 112° dias as deformações continuaram como se os CPs nunca tivessem sido carregados. Havendo restrição na direção longitudinal as deformações evoluem transversalmente. Retirada a restrição o CP volta a se expandir em todas as direções, apresentando comportamento igual ao dos CPs mantidos em expansão livre. Os CPs descarregados no 448° dia não voltaram a expandir porque nesta idade a reação já havia se esgotado totalmente, tendo manifestado expansão apenas nas direções livres. Este comportamento é representado no gráfico da Figura 4.4.



**Figura 4.4.** Comportamento dos corpos-de-prova reativos após descarga (LARIVE, 1997)

#### 4.2. Modelo com Acoplamento Proposto por Curtis

Uma expressão usada com frequência para representar a hipótese de acoplamento entre a tensão e a expansão química é:

$$\dot{\epsilon}_{sw} = \dot{\epsilon}^u - K \text{Log} \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (4.2)$$

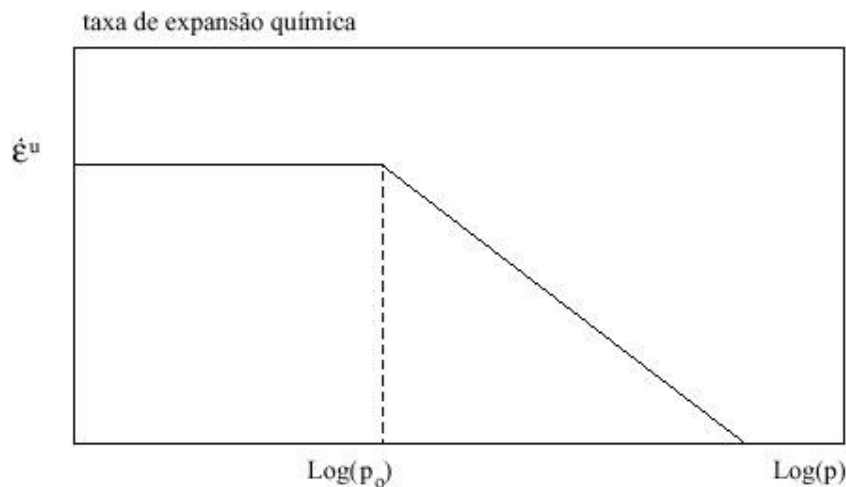
onde  $\dot{\epsilon}_{sw}$  é a taxa de expansão química do concreto reativo,  $\dot{\epsilon}^u$  é a taxa de expansão livre do concreto reativo,  $p$  é a tensão de confinamento, considerada como a média das tensões nas três direções principais,  $p_0$  é o valor da tensão de confinamento a partir da qual há redução da taxa de expansão,  $K$  é uma constante que determina a tensão de confinamento a partir da qual a taxa de expansão química é nula.

A curva da Figura 4.5 é a representação da expressão 4.2.

A expressão 4.2 é empírica e tem como características principais:

- as influências da temperatura e da umidade são desprezadas;
- considera-se a mesma taxa de deformação em todas as direções;
- o efeito da tensão sobre a expansão limita-se à direção de aplicação da carga, não havendo acoplamento com as deformações nas demais direções.

Outros modelos com acoplamento da tensão fazem ainda a consideração da fluência como sendo influenciada pela RAA, introduzindo expressões que são função do tempo, do carregamento aplicado e de variações das propriedades mecânicas do concreto.

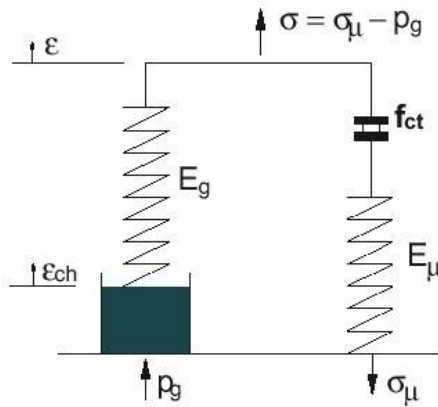


**Figura 4.5.** Curva de expansão por RAA com acoplamento da tensão (ADEGHE, 1995)

### 4.3. Modelo Desacoplado Proposto por Farage

Tendo em vista as deformações e fissuras ocasionadas pela pressão hidrostática exercida pelo gel no esqueleto do concreto, o modelo unidimensional elástico de ULM et alli (1999) e o trabalho experimental de LARIVE (1997), FARAGE (2000) propôs algumas modificações ao modelo elástico de Ulm, no sentido de introduzir o caráter anisotrópico observado por LARIVE (1997), possibilitando sua aplicação à ação conjunta da RAA e de tensões externas.

Neste modelo é introduzido um elemento de contato ao modelo unidimensional de Ulm para representar a fissuração do concreto e que é caracterizado por uma tensão limite  $f_{ct}$ , indicadora do início da abertura de fissuras, como mostra a Figura 4.6.



**Figura 4.6.** Modelo unidimensional com fissuração do concreto devido à RAA (FARAGE, 2000)

As expressões 4.3 a 4.7 são as mesmas utilizadas no modelo de Ulm.

A pressão do gel é dada por:

$$p_g = E_g (\varepsilon_{ch} - \varepsilon) \quad (4.3)$$

onde  $E_g$  é o módulo de elasticidade do gel,  $\varepsilon_{ch}$  é a deformação química unidimensional e  $\varepsilon$  é a deformação sofrida pelo esqueleto de concreto.

A pressão  $p_g$  é equilibrada pela tração no esqueleto deformável,  $\sigma_\mu$ , e pela tensão externa,  $\sigma$ , conforme a expressão 4.4:

$$\sigma = \sigma_{\mu} - p_g \quad (4.4)$$

A tensão imposta ao esqueleto do concreto é:

$$\sigma_{\mu} = E_{\mu} \varepsilon \quad (4.5)$$

onde  $E_{\mu}$  é o módulo de elasticidade do concreto.

Supondo que a deformação  $\varepsilon$  seja totalmente elástica, o módulo de elasticidade  $E$  do sistema fica:

$$E = E_g + E_{\mu} \quad (4.6)$$

Estando o material sujeito à expansão livre, anula-se a tensão  $\sigma$  e a expressão 4.4 fica:

$$\sigma_{\mu} = p_g \quad (4.7)$$

Como no modelo de Farage existe a consideração da fissuração da matriz de concreto, a deformação passa a ser composta pela parcela da deformação elástica  $\varepsilon^e$  e pela parcela da deformação pós-fissura  $\varepsilon_{cr}$ :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon_{cr} \quad (4.8)$$

#### 4.3.1. Aspectos do Modelo de Fissuração Adotado por Farage

No modelo adotado, o estado de fissuração de um elemento é representado de forma homogênea, pela deformação total. Isto significa que não há decomposição da deformação em parcelas elástica e fissurada. A diferenciação entre as fases elástica isotrópica e fissurada é feita através da substituição da matriz isotrópica do material pela matriz anisotrópica que introduz os efeitos da fissuração.

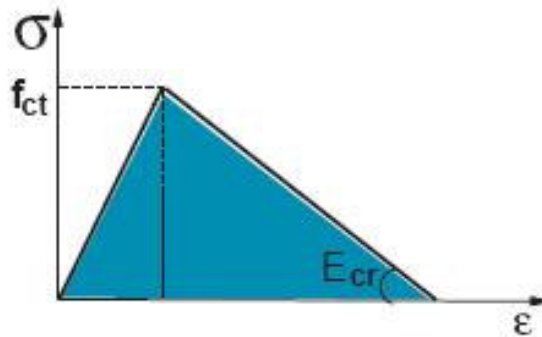
Tomando-se um sistema de coordenadas ( $n$ - $s$ - $t$ ) local à fissura, onde  $n$  é normal ao plano da fissura, e  $s$  e  $t$  estão no plano da fissura, formando um triedro direto com  $n$ , tem-se a relação *Tensão x Deformação* para o caso tridimensional

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \\ \tau_{ns} \\ \tau_{st} \\ \tau_{tn} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_n & D_{ns} & D_{nt} & 0 & 0 & 0 \\ D_{ns} & D_s & D_{st} & 0 & 0 & 0 \\ D_{nt} & D_{st} & D_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{ns} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{st} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{tn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \\ \gamma_{ns} \\ \gamma_{st} \\ \gamma_{tn} \end{Bmatrix}. \quad (4.9)$$

É utilizada neste trabalho uma versão deste modelo apresentada em FARAGE (2000), segundo a qual conforme é detectada a ocorrência de fissuras, os módulos da matriz de propriedades elásticas original sofrem reduções graduais em função de fatores multiplicadores dependentes da abertura de fissuras em cada direção. Não havendo atrito entre as faces da fissura, que se desenvolve de forma coesiva na direção normal, o estado de tensões locais  $\sigma_L$  relativo a  $(n-s-t)$  na vizinhança da fissura é dado por

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \\ \tau_{ns} \\ \tau_{st} \\ \tau_{tn} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{cr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_s & D_{st} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{st} & D_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{st} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \\ \gamma_{ns} \\ \gamma_{st} \\ \gamma_{tn} \end{Bmatrix}, \quad (4.10)$$

onde  $D_s$ ,  $D_t$ ,  $D_{st}$  e  $G_{st}$  são os módulos da matriz elástica original e  $E_{cr}$  é o módulo do material pós-fissura, dado por uma lei de fissuração coesiva unidimensional mostrada na Figura 4.7.



**Figura 4.7.** Lei de fissuração coesiva unidimensional

Esta distinção entre os módulos da direção fissurada e as demais significa que uma vez aberta uma fissura na direção  $n$ , esta se torna totalmente desacoplada das outras, e o sistema



tridimensional decompõe-se em uma direção  $n$ , cuja relação *Tensão x Deformação* passa a ser feita através do módulo  $E_{cr}$ , e um plano  $s-t$ , que continua regido pelas relações elásticas.

Quanto à orientação das fissuras, utiliza-se o modelo de fissuras fixas ortogonais (ROTS & BLAAUWENDRAAD, 1989). Segundo este modelo o número máximo de fissuras em um ponto do material é limitado pelo número de componentes de tensão direta do modelo de elementos finitos adotado. Neste trabalho serão tratados apenas casos bidimensionais, em estado plano de deformação, portanto admite-se a ocorrência de duas fissuras ortogonais por ponto.

O critério utilizado para a detecção de fissuras é o critério de Rankine, representado pela expressão 4.11.

$$\sigma_I - f_{ct} = 0; \quad I = 1,2,3 \quad (4.11)$$

onde  $\sigma_I$  são as tensões principais e  $f_{ct}$  é a resistência à tração do material.

A primeira fissura, das duas admitidas neste trabalho, é determinada pela direção principal na qual ocorreu, em primeiro lugar, a violação do critério de Rankine.

Neste trabalho será adotado o modelo de fissuração acima descrito, proposto por FARAGE (2000). As características deste modelo de fissuração e sua interpretação numérica serão detalhadas a seguir.

#### **4.4. Modelo de Fissuração**

Em seu modelo, FARAGE (2000) considerou a característica anisotrópica da expansão química (anisotropia introduzida pela fissuração) através de um modelo de fissuração distribuída.

Segundo FARAGE (2000), *“na fissuração distribuída a fissura é representada de forma contínua por microfissuras paralelas distribuídas no volume do elemento finito, sem a introdução de descontinuidades na malha de elementos. A orientação das fissuras é livre, dependendo apenas do estado de tensões do elemento e do modelo adotado. Tais modelos podem conduzir à não-objetividade da solução por elementos finitos, que significa a dependência entre os resultados obtidos e o grau de refinamento da malha empregada. O*

*problema da não-objetividade pode ser contornado com a aplicação dos conceitos da Mecânica da Fratura, segundo os quais o critério de fissuração é estabelecido pela energia de fissuração, que independe do tamanho do elemento.”*

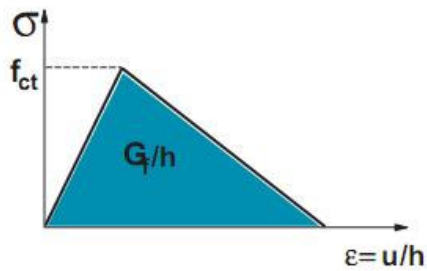
Existe também o modelo de fissuração discreta, que traz a necessidade de modificação na estrutura da malha de elementos finitos inicial, uma vez que quando uma fissura atinge um determinado nó, este deve se transformar em dois nós. Além disso, a abertura de fissuras é introduzida através de elementos finitos de interface unidimensionais, que se mantêm indeformáveis até um limite de tensão que caracteriza a abertura da fissura e o conseqüente deslocamento relativo entre os nós do elemento de interface. Estes elementos de interface limitam as direções possíveis para o desenvolvimento das fissuras, exigindo uma previsão do caminho percorrido por estas.

A fissuração distribuída trabalha apenas com a matriz elástica modificada pela fissuração. Esta característica, que dispensa a modificação da arquitetura do programa para implementar elementos de interface com relações constitutivas e cinemáticas diferentes, e o fato de o modelo de fissuração distribuída representar melhor fisicamente a microfissuração gerada em determinadas regiões pela poro-pressão oriunda da RAA, são os motivos para a adoção deste modelo no trabalho desenvolvido por FARAGE (2000).

#### *4.4.1. Relação Constitutiva para o Material Fissurado*

No modelo adotado, a abertura de fissuras é governada por um parâmetro intrínseco que é a energia específica de fissuração  $G_f$ . A energia específica de fissuração é a energia necessária para fissurar uma área unitária do material, e pode ser determinada pela área definida pelo diagrama *tensão x deslocamento* do material ou através do ensaio de flexão por três pontos, normalizado pela RILEM (1985).

O problema da não-objetividade da solução por elementos finitos pode ocorrer caso se adotem diagramas da forma apresentada na Figura 4.7 baseados em critérios de tensão (FARAGE, 2000). O critério da energia de fissuração independe do tamanho do elemento e contorna este problema transformando a relação *tensão x deslocamento* em uma relação *tensão x deformação* através do comprimento característico do elemento finito,  $h$ , no qual se considera que a fissura se processe.



**Figura 4.8.** Relação tensão x deformação derivada da relação tensão x deslocamento

A Figura 4.8 expressa a relação constitutiva do concreto submetido à tração:

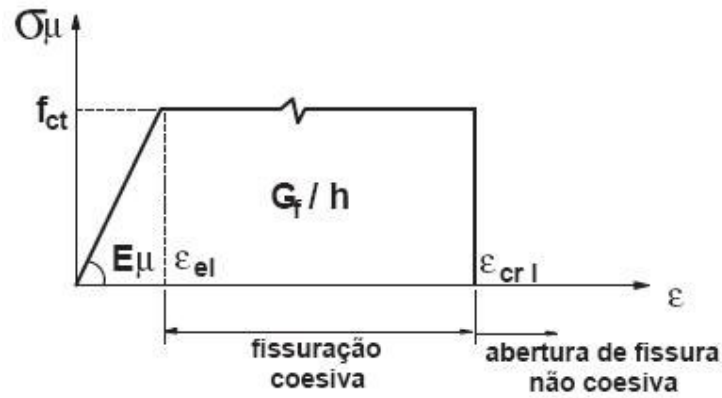
$$\sigma = D\varepsilon \quad (4.12)$$

sendo  $D$ , inicialmente, a matriz elástica do sistema, cujos termos variam com as condições de fissuração do material e  $\varepsilon$  a deformação total, uma vez que o modelo não adota a decomposição da deformação.

#### 4.4.2. Fissuração Distribuída Dúctil

A relação constitutiva adotada neste trabalho para representar o concreto sujeito à RAA no estado fissurado é a relação proposta por FARAGE (2000). Tal relação considera a região de degradação dúctil do concreto e foi obtida através da realização de análise inversa com base em informações experimentais fornecidas por LARIVE (1997).

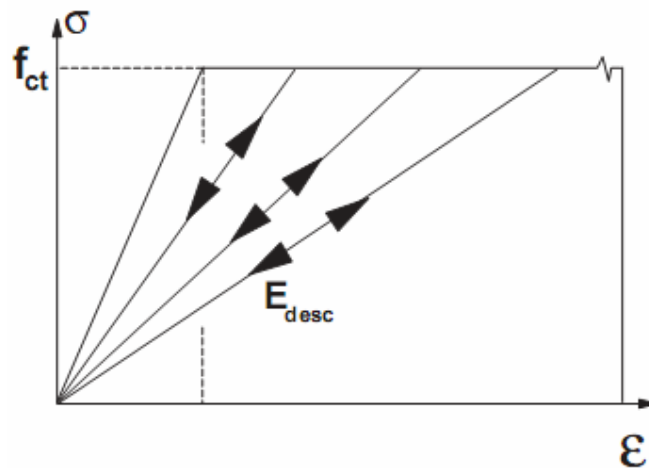
Na relação mostrada pela Figura 4.8 admite-se que, uma vez atingida a tensão limite de tração e iniciado o processo de fissuração, o concreto passa a suportar tensões cada vez menores com o aumento das deformações a ele impostas. Na relação considerada aqui, o concreto reativo microfissurado ainda é capaz de transmitir tensões de tração. Segundo FARAGE (2000), é possível que os produtos da reação, ao preencherem os vazios do concreto, possam contribuir até certo ponto para a transferência de esforços através do material. Tal capacidade é limitada por uma deformação relativa à abertura máxima da fissura,  $\varepsilon_{crl}$ , a partir da qual finda a coesão do material, conforme ilustra a Figura 4.9.



**Figura 4.9.** Relação constitutiva com fissuração dúctil (FARAGE, 2000)

#### 4.4.3. Mecanismo de Fechamento/Reabertura de Fissuras

Por simplificação, desprezam-se deformações permanentes associadas à abertura de fissuras. Supõe-se que as fissuras possam fechar totalmente, dependendo do sentido da tensão aplicada nas superfícies normais às mesmas. Apesar da hipótese de recuperação total da deformação, o modelo admite a perda de energia no sistema, o que é representado pelas alterações do módulo de elasticidade do material. Tal mecanismo é apresentado pela Figura 4.10.



**Figura 4.10.** Mecanismo de fechamento/reabertura de fissuras

O módulo  $E_{desc}$  relaciona a tensão com a deformação na situação de fechamento/reabertura de fissura (ou descarga/recarga do sistema), e é calculado por:

$$E_{desc} = \frac{\sigma_{total}}{\epsilon_{total}} \quad (4.13)$$

sendo  $\sigma_{total}$  e  $\epsilon_{total}$ , respectivamente, a tensão e a deformação totais no concreto no instante em que a descarga é imposta.

## 5. MODELO DA EXPANSÃO POR RAA COM ACOPLAMENTO TENSÃO X REAÇÃO

Como contribuição para o avanço na busca de bons modelos, capazes de simular computacionalmente o comportamento de estruturas de concreto atingidas pela RAA, ajudando na previsão do comportamento das mesmas e na tomada rápida de decisões adequadas para solucionar eventuais problemas, este trabalho propõe a consideração do efeito inibidor que as tensões confinantes exercem sobre a expansão por Reação Álcali-Agregado. Desta forma, o modelo proposto por FARAGE (2000), que é aplicável apenas a situações onde ocorra a expansão livre, será adaptado, com a adoção do acoplamento entre tensão e reação.

Este acoplamento tensão/reação será feito a partir de uma nova expressão para o cálculo da deformação do gel, que deriva da lei de Larive para expansão livre e do modelo com acoplamento proposto por Curtis, rerepresentados a seguir:

- Lei de Larive para Expansão Livre (forma diferencial):

$$\dot{\epsilon}_{ch} = \frac{\epsilon_{\infty}}{\tau_c} \left[ \frac{e^{-\frac{t}{\tau_c}} + e^{-\frac{-t+\tau_l}{\tau_c}}}{\left(1 + e^{-\frac{-t+\tau_l}{\tau_c}}\right)^2} \right] \quad (5.1)$$

- Modelo com Acoplamento de Curtis:

$$\dot{\epsilon}_{sw} = \dot{\epsilon}'' - K \text{Log} \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (5.2)$$

O modelo com acoplamento de Curtis diz que, a partir de um determinado valor de tensão denominado  $p_0$ , a expansão começa a ser inibida até que a tensão confinante aplicada,  $p$ , considerada como a média do traço do tensor de tensões, atinja um valor máximo,  $p_{max}$  capaz de interromper totalmente o processo expansivo da RAA. Utilizam-se neste trabalho valores para  $p_0=0,3MPa$  e  $p_{max}=5MPa$  baseados em trabalho publicado por Curtis (HATCH

ENERGY COMPANY, Technical Papers).

Ainda segundo Curtis, a taxa de expansão livre do concreto reativo,  $\dot{\varepsilon}''$ , também seria uma constante para o concreto. Entretanto, seguindo a proposta de unir os modelos de Larive e Curtis, a taxa de expansão livre do concreto reativo é dada pela expressão 5.1.

- Deformação causada pela RAA no modelo com acoplamento proposto:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\infty}}{\tau_c} \left[ \frac{e^{-\frac{t}{\tau_c}} + e^{-\frac{-t+\tau_l}{\tau_c}}}{\left(1 + e^{-\frac{-t+\tau_l}{\tau_c}}\right)^2} - K \cdot \text{Log}\left(\frac{p}{p_0}\right) \right] \quad (5.3)$$

### 5.1. Síntese das expressões utilizadas no modelo

Dada a hipótese do comportamento isotrópico do concreto em expansão livre, a variação da deformação química volumétrica, para o estado plano de deformações, é dada por

$$\dot{\varepsilon}_{ch}^V = 2\dot{\varepsilon}_{ch} \cdot \quad (5.4)$$

A poro-pressão exercida pelo gel é dada por

$$p_g = B \begin{bmatrix} 2\varepsilon_{ch} - \varepsilon_V & 0 \\ 0 & 2\varepsilon_{ch} - \varepsilon_V \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

sendo  $B$ , o módulo de deformação volumétrica do gel, dado por

$$B = \frac{E_g}{3(1-2\nu_g)}, \quad (5.6)$$

onde  $\nu_g$  é coeficiente de Poisson do gel.

No estado íntegro, quando a deformação na direção principal 1 é menor do que a deformação elástica limite ( $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{el}$ ), o estado de tensões é dado por

$$\dot{\sigma}_\mu = \mathbf{D}\dot{\varepsilon}, \quad (5.7)$$

com a matriz elástica  $\mathbf{D}$  dada por:

$$\mathbf{D} = \frac{E_\mu(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do concreto.

No estado fissurado ( $\varepsilon_I > \varepsilon_{el}$ ,  $I=1$  ou  $2$ ) considera-se o desacoplamento entre as direções normais às superfícies fissuradas e as demais, já que o modelo despreza as tensões cisalhantes nos planos fissurados (FARAGE, 2000). Neste caso, a matriz elástica  $\mathbf{D}$  é substituída pela matriz  $\mathbf{D}_{cr}$ , que anula os termos que expressam o acoplamento entre as direções. O modelo admite no máximo duas fissuras por elemento.

$$\dot{\sigma}_I = \mathbf{D}_{cr}\dot{\varepsilon}_I; \quad \mathbf{I} = \mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{3} \quad (5.9)$$

Para uma fissura, uma direção desacoplada tem-se

$$\mathbf{D}_{cr} = \begin{bmatrix} E_{cr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & \frac{\nu}{1-\nu}d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{1-\nu}d & d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.10)$$



$$\text{onde } d = \frac{E_{\mu}(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}.$$

Para duas fissuras, as três direções são desacopladas, ficando

$$\mathbf{D}_{cr} = \begin{bmatrix} E_{cr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{cr} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.11)$$

## **6. DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA**

Na implementação do modelo, foi utilizado um programa para análise não-linear de estruturas via MEF originalmente empregado para simular de maneira satisfatória estruturas que apresentam expansão livre, adaptado para verificar a validade do modelo acoplado à tensão descrito na Seção 5.

A seguir será feita a descrição das principais rotinas do programa, bem como será explicada a modificação nele implementada.

### **6.1. Características gerais do programa**

A implementação foi feita no programa TriNL, no ambiente Visual Fortran 5.0, para análise não linear de problemas contínuos via Método dos Elementos Finitos. A versão original de ALVES (1996) apresenta as seguintes características:

- Elemento triangular com três nós para problemas bidimensionais;
- Não-linearidade física do material, com adoção de comportamento elasto-plástico perfeito;
- Consideração de pequenos deslocamentos e pequenas deformações.

Para a resolução do sistema de equações não-lineares resultantes emprega-se uma técnica incremental-iterativa do tipo Newton-Raphson. Utiliza-se a matriz de rigidez inicial como aproximação para o jacobiano associado ao problema.

Foram mantidas muitas das características do programa original como:

- Leitura na entrada de dados dos três parâmetros característicos para o cálculo da expansão livre do gel, segundo a expressão 4.1;
- Cálculo das forças internas considerando a poro-pressão exercida pelo gel expansivo;
- Adoção da superfície de Rankine para a detecção do início da abertura de fissuras;

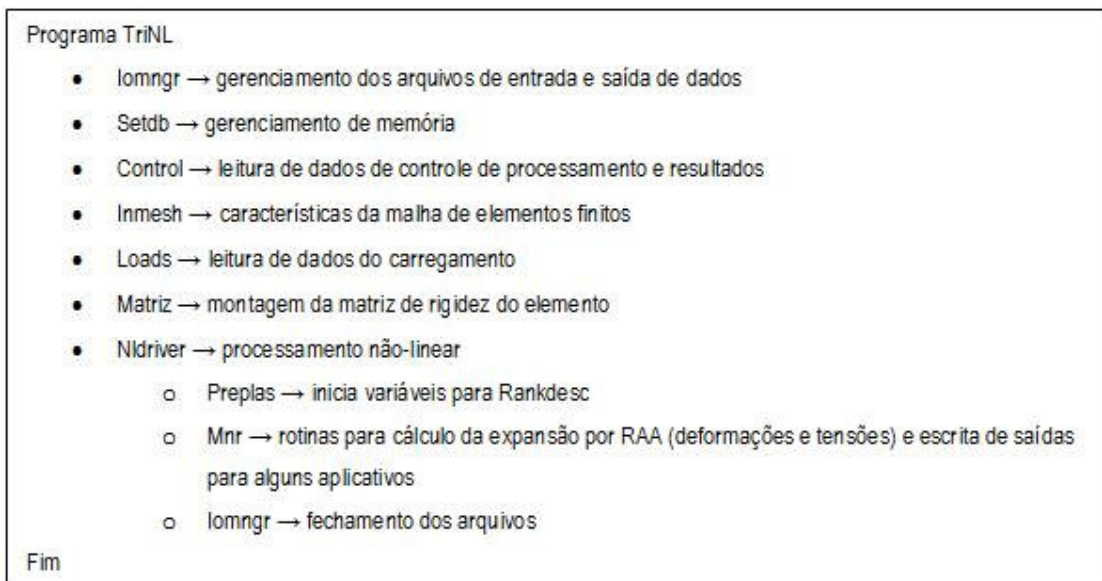
- Relação constitutiva pós-fissura baseada no critério de energia de fissuração, considerando a redução do módulo de elasticidade devido à degradação do material (tension softening);
- Mecanismo de descarga-recarga, para representar não só o efeito da retirada de carregamento externo, mas também o fechamento/reabertura de fissuras e a redistribuição de esforços dos elementos fissurados para os elementos íntegros;

A Figura 6.1 mostra o fluxo simplificado do programa TriNL.

## 6.2. Principais Rotinas

### *Rotina SETDB*

Pacote de rotinas que gerenciam a memória através da alocação dinâmica de ponteiros para estruturas de dados a tempo de execução.



**Figura 6.1.** Fluxo do programa

### *Rotina CONTRL*

Faz a leitura de informações que controlam:

- A entrada de dados e o dimensionamento de vários arranjos internos ao programa, como: numero de pontos nodais e de elementos, quantidade de materiais com propriedades distintas, numero de nós carregados;
- A saída de resultados, sendo lido um registro contendo informações para a geração de resultados e um outro registro contendo os dados necessários ao pós-processamento dos resultados por aplicativos específicos.

#### *Rotina INMESH*

Responsável pela leitura dos dados relativos à malha: condições de contorno e coordenadas nodais  $x$ - $y$ . Chama a rotina *INELEM*, que lê as conectividades dos elementos.

#### *Rotina LOADS*

Destina-se à definição do carregamento, lendo a identificação de cada nó carregado e as componentes em  $x$  e  $y$  das cargas.

#### *Rotina MATRIZ*

Chama a rotina *TRINL*, que calcula e armazena o triangulo superior das matrizes de rigidez de elemento.

#### *Rotina NLDRIVER*

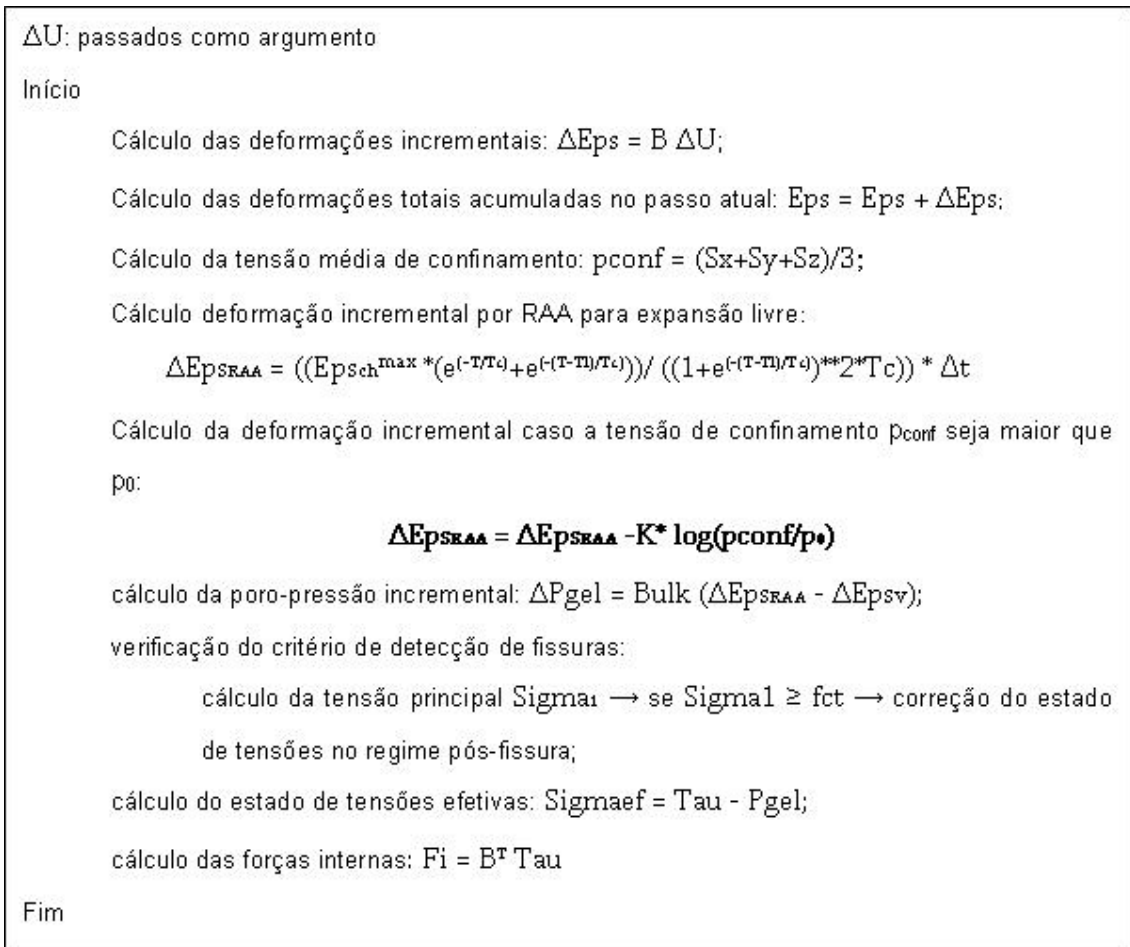
Processamento da análise não-linear do problema. Chama a rotina *PREPLAS*, que indica variáveis e estabelece os ponteiros para os arranjos utilizados no processamento, a rotina *MNR*, que faz a análise não-linear via Método de Newton-Raphson Modificado que é de onde são chamadas rotinas de cálculo das tensões e deformações do sistema, e a rotina *FINT*, que por sua vez chama a rotina *RANKDESC*, que calcula os incrementos das forças internas. Estes incrementos são acumulados pela rotina *ASMFI* também chamada pela *FINT*.

A modelagem da expansão por RAA encontra-se basicamente na rotina *RANKDESC* que será detalhada a seguir.

### 6.3. Rotina Rankdesc

Na rotina *RANKDESC*, o modelo de expansão por RAA acoplado à tensão é implementado para o caso bidimensional. O esquema da Figura 6.2 mostra, em linhas gerais, como é realizado o cálculo das forças internas. As notações utilizadas são identificadas a seguir:

- $U$  é o deslocamento;
- $B$  é o operador diferencial discreto deslocamento/deformação;
- $\tau$  é a tensão total ( $\sigma$ );
- $p_{gel}$  é a pressão no gel produzido pela RAA ( $p_g$ );
- $\sigma_{ef}$  é a tensão no esqueleto do concreto, tensão efetiva ( $\sigma_{\mu}$ );
- $f_{ct}$  é a resistência à tração do concreto ( $f_{ct}$ );
- $\epsilon$  é a deformação total do sistema ( $\epsilon$ );
- $\epsilon_{RAA}$  é a deformação volumétrica do gel ( $2\epsilon_{ch}$ );
- $D$  é a matriz elástica do sistema, a qual, por simplificação, é calculada considerando-se apenas o módulo de elasticidade do concreto ( $E_{\mu}$ );
- $E_g$  é o módulo de deformação volumétrica do gel ( $E_g$ );
- $\sigma_1$  representa a tensão principal de maior valor absoluto;
- $\epsilon_v$  é a deformação volumétrica do concreto;
- $\Delta$  é o símbolo que representa o incremento.
- $\epsilon_{sch}^{max}$  é a deformação assintótica do gel ( $\epsilon_{\infty}$ );
- $p_{conf}$  é a tensão média de confinamento;



**Figura 6.2.** Representação esquemática da rotina *RANKDESC*

## 6.4. Procedimentos relativos à modelagem

### 6.4.1. Cálculo da Poro-Pressão Causada pela RAA

A poro-pressão é calculada pela expressão 5.5. Dado um incremento de tempo, a variação de  $P_{gel}$  é dada por

$$\Delta P_{gel} = Bulk(\Delta Eps_{RAA} - \Delta Eps_v)$$

$$\text{sendo, } P_{gel}^t = P_{gel}^{t-1} + \Delta P_{gel}$$

onde,  $t$  indica o tempo total acumulado até o incremento corrente,  $(t-1)$  o tempo total acumulado até o incremento anterior,  $\Delta Eps_{RAA}$  é a variação volumétrica do gel,  $\Delta Eps_v$  é a

variação volumétrica do esqueleto do concreto e  $P_{gel}$  é considerado um valor constante no volume do elemento.

#### 6.4.2. Deformação $Eps_{RAA}$

A deformação do gel é calculada a partir da expressão (4.1) proposta por Larive para a deformação livre unidimensional do concreto ( $Eps_{ch}$ ). Na forma incremental, o cálculo da variação de deformação química volumétrica ( $\Delta Eps_{RAA}$ ) é:

$$\Delta Eps_{RAA} = 2\Delta Eps_{ch} = 2 \frac{Eps_{ch}^{max}}{Tc} \left[ \frac{e^{\left(\frac{t}{Tc}\right)} + e^{\left(\frac{-t+Tl}{Tc}\right)}}{\left(1 + e^{\frac{-t+Tl}{Tc}}\right)^2} \right] - K \log\left(\frac{pconf}{p_0}\right)$$

- $Eps_{ch}^{max}$  é a deformação química assintótica  $\rightarrow \varepsilon_{\infty}$ ;
- $Tc$  é o tempo característico  $\rightarrow \tau_c$ ;
- $Tl$  é o tempo de latência  $\rightarrow \tau_l$ ;
- $t$  é o tempo total  $\rightarrow t$ ;
- $\Delta t$  é o incremento de tempo.

Os valores de  $Eps_{ch}^{max}$ ,  $Tc$  e  $Tl$  são fornecidos na entrada de dados.

#### 6.4.3. Deformação $Eps_v$

A deformação volumétrica do esqueleto do concreto é calculada como:

$$Eps_v = Eps_x + Eps_y + Eps_z$$

sendo  $Eps_x$ ,  $Eps_y$  e  $Eps_z$  as deformações nas direções dos eixos cartesianos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . A cada incremento de tempo, tem-se:

$$\Delta Eps_v = \Delta Eps_x + \Delta Eps_y + \Delta Eps_z$$

## 6.5. Critério de Detecção de Fissuras

Calculado o estado de tensão-tentativa admitindo-se comportamento elástico, verifica-se a ocorrência de fissuras utilizando o critério de Rankine.

No caso geral tridimensional, admitem-se, no máximo três fissuras por elemento. A primeira é formada no plano normal à direção de maior tensão principal,  $\sigma_1$ , assim que esta atinja o valor de  $f_{ct}$ . Admite-se, então, que quaisquer outras fissuras que venham a surgir desenvolvam-se em planos ortogonais ao da primeira fissura.

A partir da formação da primeira fissura, adotam-se para o elemento, como orientação local, as direções das tensões principais do instante em que surgiu a primeira fissura - direções 1 e 2 e 3. Uma vez formada uma fissura, considera-se a direção normal ao plano em que esta se desenvolve como mecanicamente desacoplada do plano formado pelas direções 2 e 3, no qual o critério continua a ser verificado. A segunda fissura é formada quando a tensão principal no plano 2-3 atinge o limite determinado pelo critério de Rankine.

Os passos para a detecção da primeira fissura são os que seguem:

1. Cálculo da tensão principal do estado de tensão-tentativa:  $\sigma_1$
2. Verificação com o critério de Rankine:

$\sigma_1 < f_{ct} \rightarrow$  fase elástica

$\sigma_1 \geq f_{ct} \rightarrow$  fase pós-fissura

$\rightarrow$  determinação do estado de tensões de contato

$\rightarrow$  fissura na direção normal à de  $\sigma_1$  no estado de tensões de contato

O estado de tensões de contato do elemento é aquele cujo ponto representativo se situa sobre a superfície de Rankine, sendo:



$$\text{Sigma1} = \text{fct}$$

Para este estado de tensões é estabelecido o referencial local do sistema, formado pelas direções das tensões principais no estado de contato - direções 1, 2 e 3.

No presente trabalho a detecção de fissuras é adaptada para o caso plano, considerando-se válidas apenas duas fissuras por elemento.

A determinação do estado de tensões de contato é feita através do algoritmo desenvolvido pela técnica do “*Return Mapping*” (BARBOSA, 2008).

## 7. APLICAÇÃO DO MODELO COM ACOPLAMENTO A ESTRUTURAS

Serão apresentadas duas simulações do comportamento de estruturas feitas de concreto reativo através do programa TriNL, quais sejam:

- mudança de geometria do anel de descarga de uma unidade geradora;
- desenvolvimento de tensões em um bloco de barragem tipo gravidade.

É importante ressaltar que as análises aqui apresentadas possuem caráter exclusivamente qualitativo. Para se ter um resultado quantitativamente comparável a estruturas reais se faz necessária a tomada de informações sobre a evolução da RAA em tais estruturas, além de uma calibração dos parâmetros característicos e constantes utilizadas na descrição do material e da expansão do gel, como o tempo de latência, o tempo característico e a energia de fissuração do concreto. Mais informações sobre este tipo de ajuste paramétrico podem ser vistas na referência FARAGE (2000).

O principal objetivo aqui é comparar as potencialidades dos modelos com e sem o acoplamento da tensão com a reação.

Em todos os exemplos do trabalho foram considerados os seguintes dados para o concreto e do gel:

**Tabela 7.1.** Dados do concreto

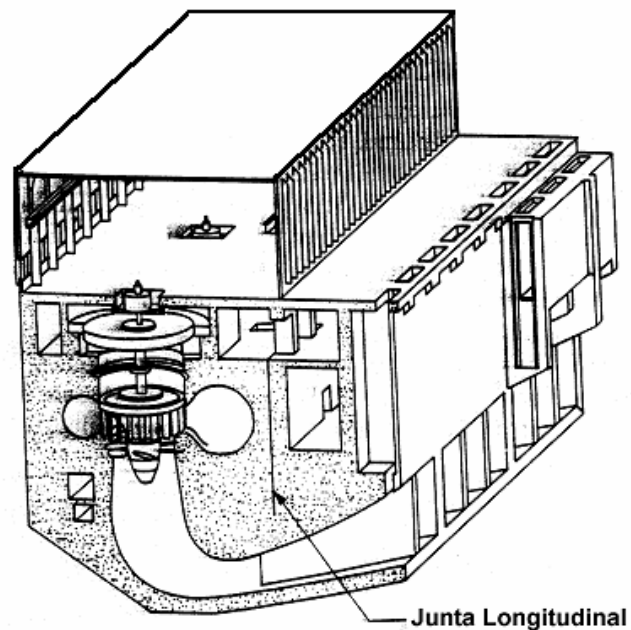
• Módulo de elasticidade do concreto ( $E$ )	$1,82 \times 10^4$ MPa
• Coeficiente de Poisson do concreto ( $\nu$ )	0,23
• Módulo de elasticidade do gel ( $E_{gel}$ )	$1,82 \times 10^4$ MPa
• Coeficiente de Poisson do gel ( $\nu_{gel}$ )	0,23
• Tempo de latência ( $\tau_l$ )	33,4 meses
• Tempo característico ( $\tau_c$ )	82,9 meses
• Energia de Fissuração ( $G_f$ )	$480 \times 10^4$ MPa.m
• Resistência do concreto à tração	3,5 MPa

### 7.1. Anel de Descarga

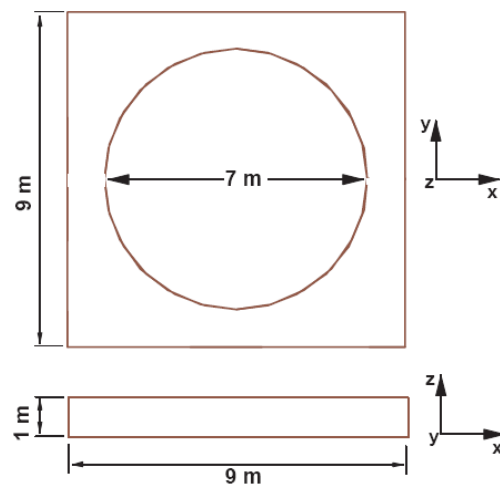
O anel de descarga de uma unidade geradora de energia situa-se na casa de força da barragem e é a estrutura que abriga as palhetas das turbinas, conforme o esquema ilustrado na

Figura 7.1. As deformações causadas pela RAA nestas estruturas podem comprometer seriamente o funcionamento e a capacidade geradora de uma usina hidrelétrica.

O modelo geométrico adotado para o anel de descarga é simples (Figura 7.2) e consta neste trabalho a título de ilustração, uma vez que o comportamento da estrutura é bem simulado tanto com o modelo que considera o acoplamento quanto com o modelo desacoplado da tensão devido à livre expansão do gel.

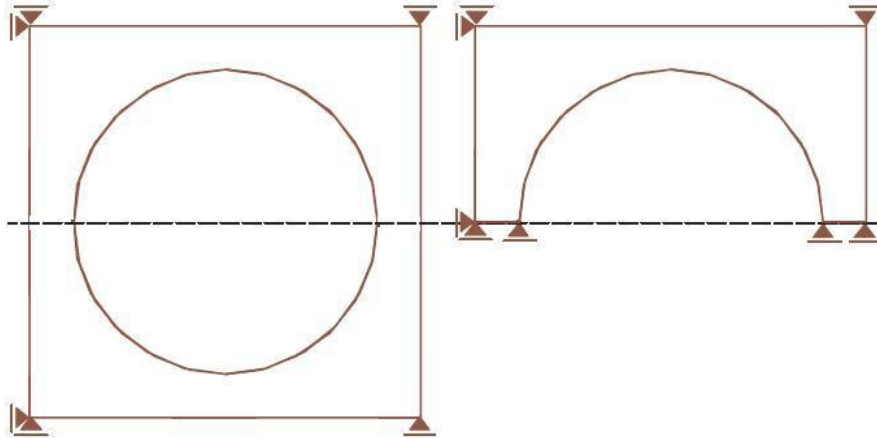


**Figura 7.1.** Seção transversal de uma casa de força

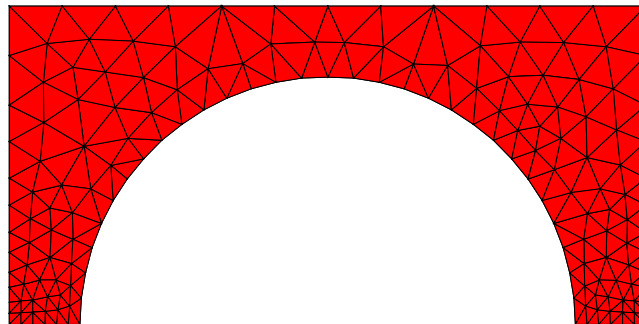


**Figura 7.2.** Geometria do anel de descarga

Tendo em vista o caráter de simetria apresentado pela estrutura foram aplicadas as condições de contorno vistas na Figura 7.3, a fim de se poupar esforço computacional. A malha adotada pode ser visualizada na Figura 7.4, possuindo 174 nós e 268 elementos triangulares de três nós.

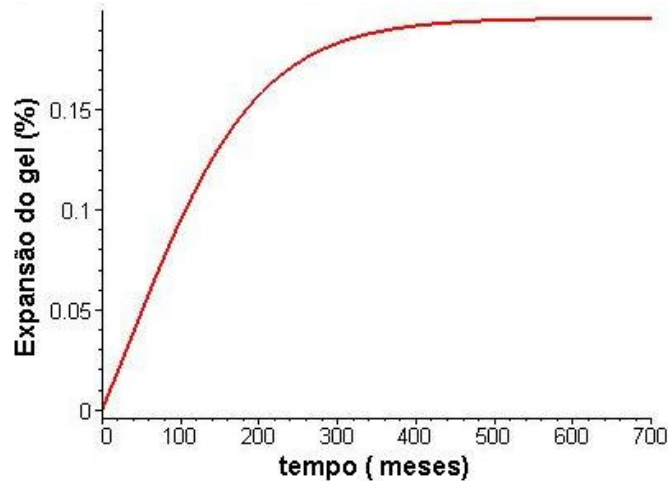


**Figura 7.3.** Condições de contorno do problema



**Figura 7.4.** Malha de elementos finitos utilizada

Admite-se que o anel esteja submetido apenas aos efeitos da RAA, estando todos os elementos sujeitos às mesmas condições de umidade e temperatura e supondo que a evolução da deformação no gel ocorra segundo a curva da Figura 7.5. Os parâmetros que definem a curva são:  $\varepsilon_{\infty}=0,196\%$ ,  $\tau_l=33,4$  meses e  $\tau_c=82,9$  meses.



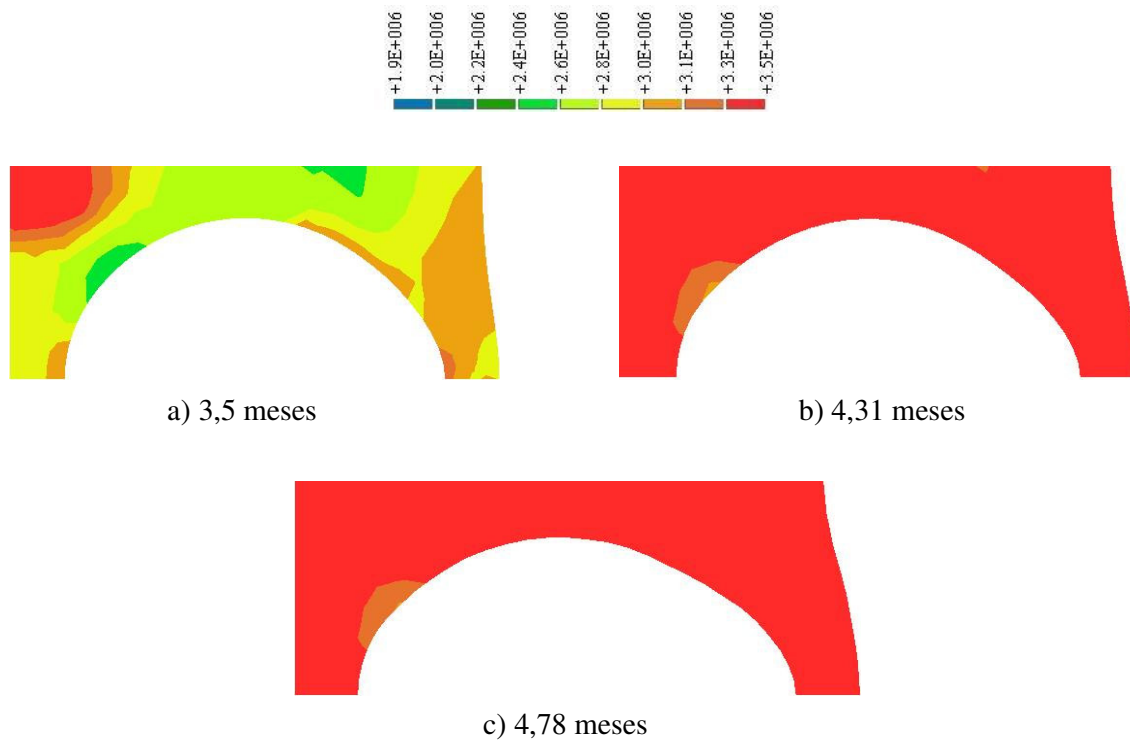
**Figura 7.5.** Curva de expansão livre do gel adotada para o anel de descarga

#### 7.1.1. Resultados para o Anel de Descarga

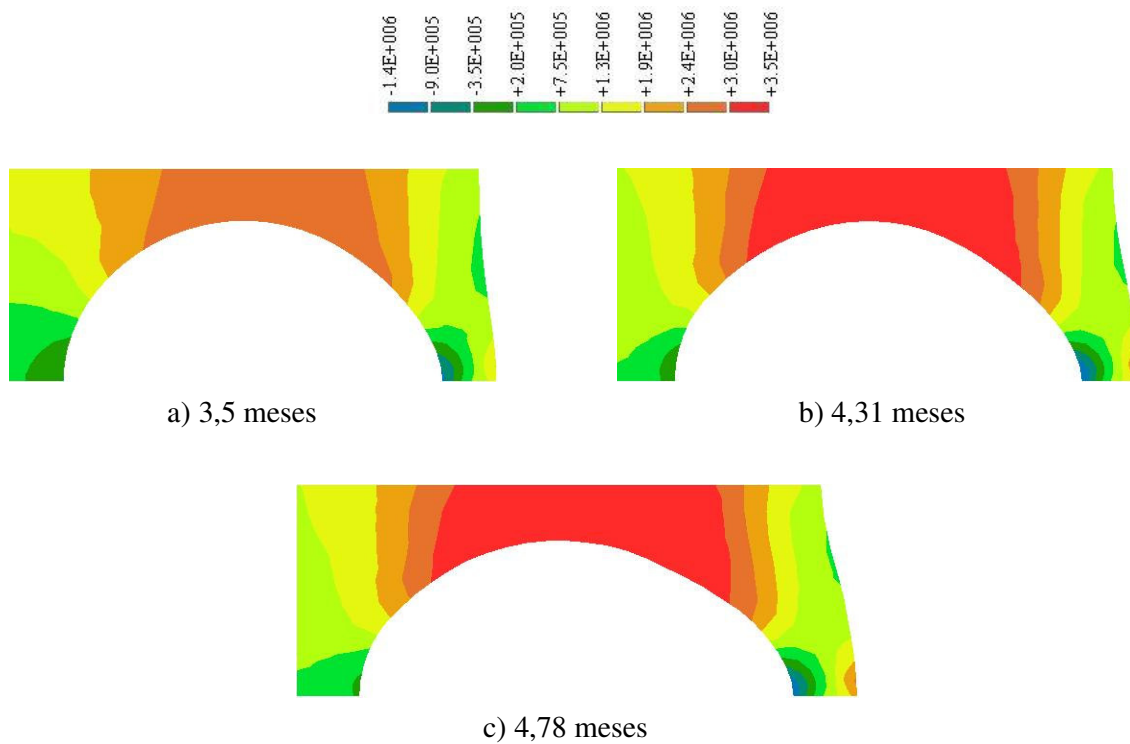
As Figuras 7.6 e 7.7 mostram as distribuições de tensão normal, respectivamente, nas direções x e y obtidas para a seção do anel de descarga, enquanto a Figura 7.8 mostra a evolução da pressão gerada pelo gel. Nas figuras, mostra-se o aspecto deformado da estrutura considerando-se a evolução da reação química por um período de até 4 meses. Pode-se observar o aspecto ovalizado do anel, que concorda com o obtido em casos reais. Para este caso, o início da ocorrência de fissuração é observado para um intervalo de tempo de 3 meses de evolução da RAA: - aos 3,5 meses a estrutura tinha 23 elementos fissurados, 239 aos 4,31 meses e 268, a totalidade dos elementos, aos 4,78 meses. Isto explica a estabilização das tensões em valores próximos à resistência à tração do material, por volta de 5 meses, enquanto prosseguem as deformações com a abertura das fissuras.

As tensões  $\sigma_y$  apresentam maior variação ao longo da altura da seção, sendo esta direção restrita segundo as condições de contorno adotadas. As tensões  $\sigma_y$  variam mais acentuadamente até os 4 meses, a partir de então tornando-se praticamente constante. A Figura 7.7 mostra as tensões  $\sigma_y$ .

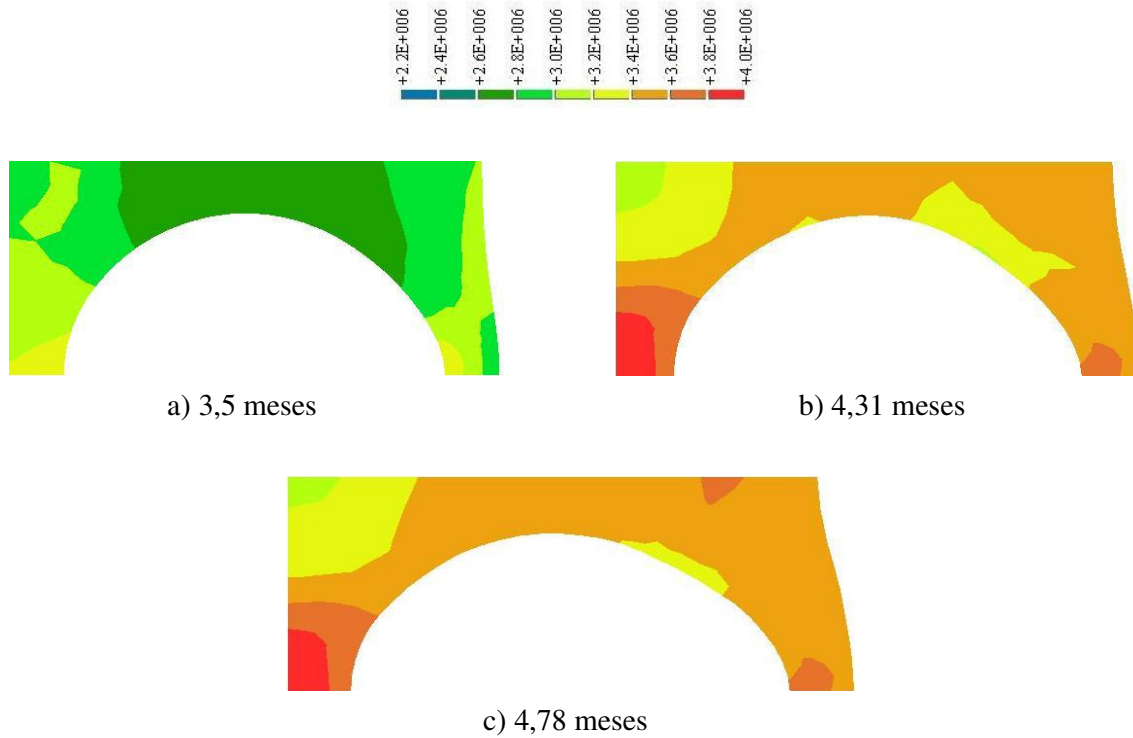
A pressão do gel atinge seu patamar máximo perto dos 4 meses, passando a sofrer variações pequenas devido a incrementos de expansão associados ao avanço da RAA, que abre espaço na matriz do concreto permitindo a acomodação do gel. A Figura 7.8 mostra a variação da pressão do gel.



**Figura 7.6.** Variação da tensão  $\sigma_x$  para o anel de descarga



**Figura 7.7.** Variação da tensão  $\sigma_y$  para o anel de descarga

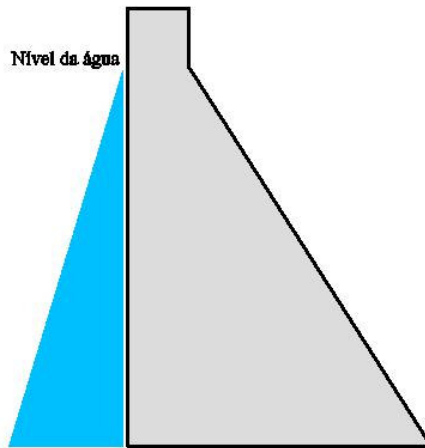


**Figura 7.8.** Evolução da pressão do gel no anel de descarga

## 7.2. Bloco de Barragem

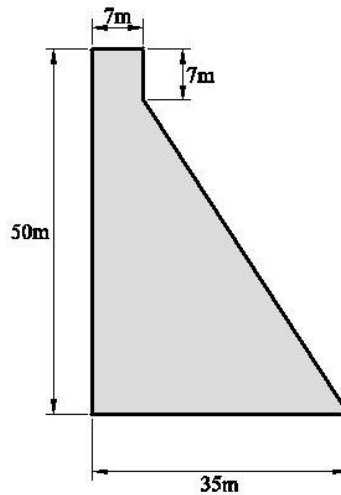
Este é o exemplo mais representativo da contribuição deste trabalho, pois se trata de uma estrutura que apresenta, em casos reais, tensões altas de confinamento em determinadas regiões, o que reconhecidamente afeta a geração e evolução da RAA. A base do bloco encontra-se confinada pela água e pelo peso da própria barragem atuando, como mostra a Figura 7.9. Espera-se, com o modelo implementado, demonstrar o efeito inibidor da expansão gerado pelas tensões confinantes nesta região, o que não se observa no modelo original (FARAGE, 2000).

Neste trabalho são consideradas as mesmas condições de umidade e temperatura para toda a barragem, traduzidas no parâmetro representativo da expansão máxima do gel  $\varepsilon_{\infty}$ , admitido como sendo igual a 0,196%. A variação de umidade existente na realidade das estruturas hidráulicas pode ser considerada no programa utilizado como base neste estudo, o que é uma sugestão para trabalhos futuros. Supõe-se para descrever a evolução da deformação no gel a curva da Figura 7.5.



**Figura 7.9.**Esquema do bloco de barragem estudado

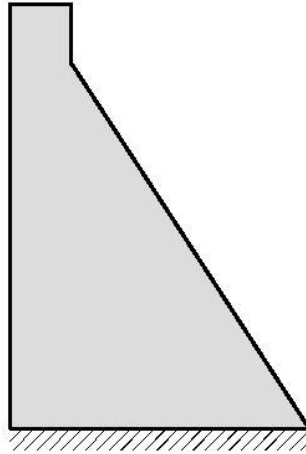
O modelo utilizado possui as características geométricas de uma barragem de porte médio, mostradas na Figura 7.10. O bloco foi considerado engastado em sua base como mostrado na Figura 7.11.



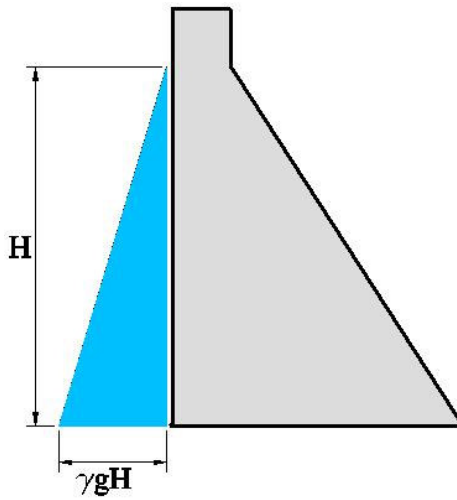
**Figura 7.10.** Geometria do modelo bidimensional do bloco de barragem

O carregamento considerado é composto pelo peso-próprio da barragem e pela pressão da água a jusante. O carregamento relativo à água é representado pelo esquema da Figura 7.12, sendo o peso específico da água  $\gamma=10\text{kN/m}^3$  e a aceleração da gravidade  $g=10\text{m/s}^2$ . O peso próprio foi distribuído entre os elementos da malha de elementos finitos (Figura 7.13), como cargas nodais, considerando-se o peso específico do concreto igual a  $48\text{kN/m}^3$ .

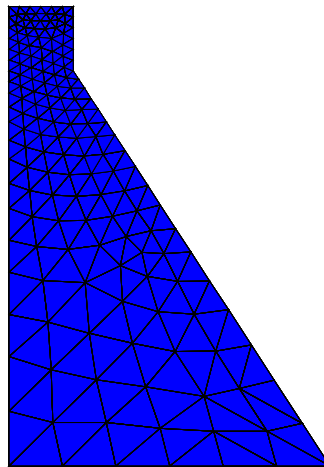




**Figura 7.11.** Condições de contorno do bloco



**Figura 7.12.** Carregamento considerado no bloco de barragem

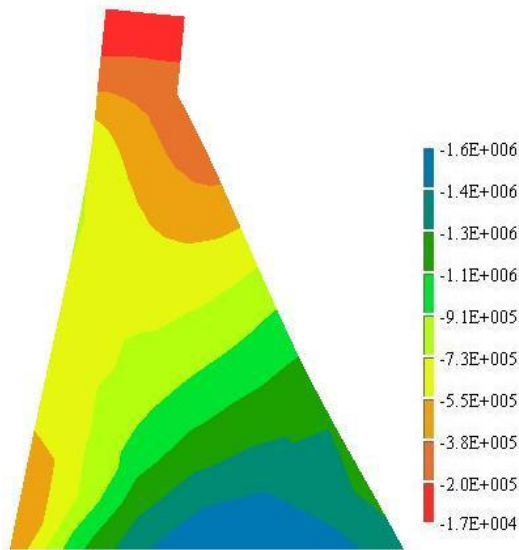


**Figura 7.13.** Malha de elementos finitos empregada no modelo do bloco de barragem.

A malha empregada possui 280 elementos triangulares de três nós e 169 nós.

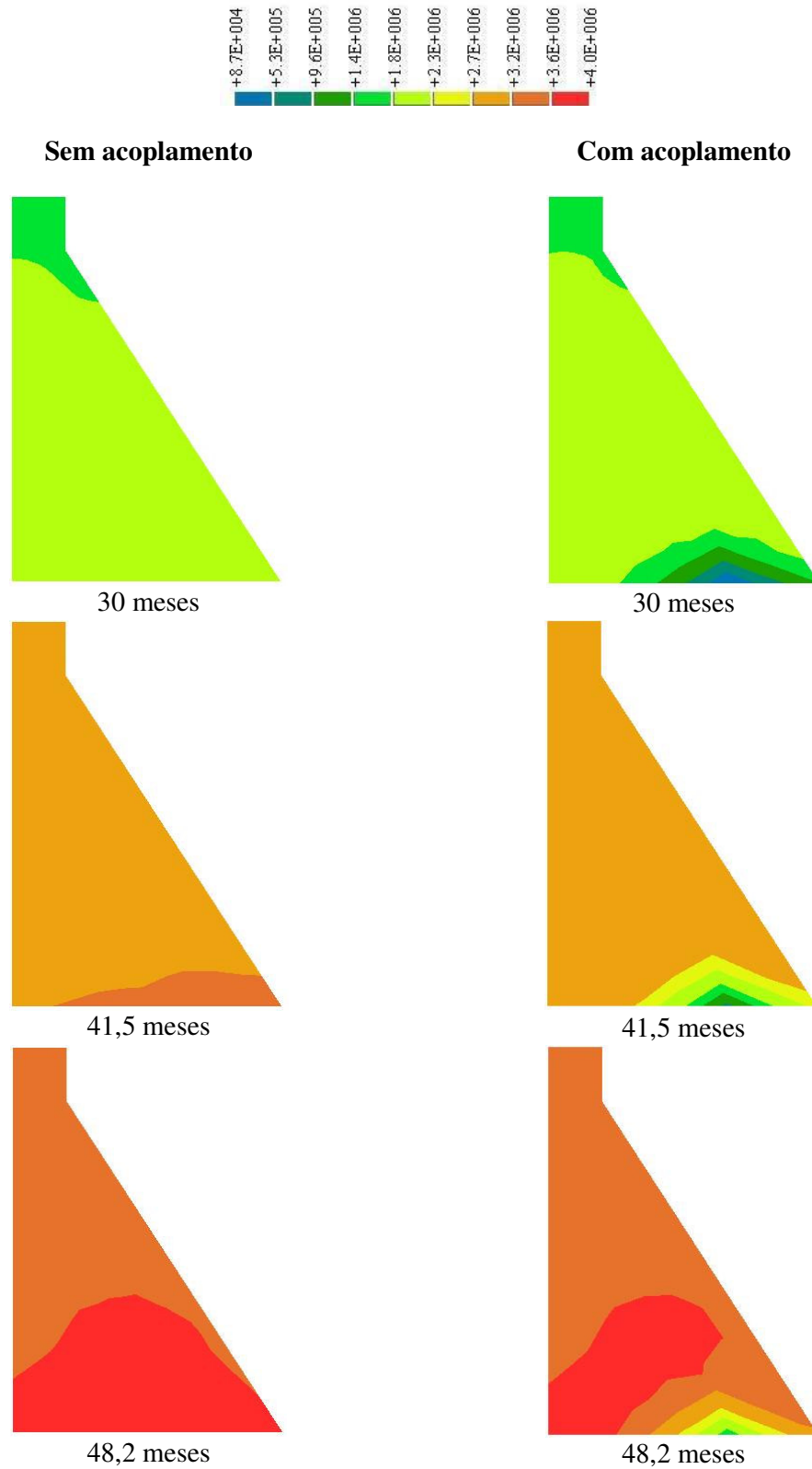
### 7.2.1. Resultados para o Bloco de Barragem

A primeira das análises feitas considerou o *bloco sem a presença do gel expansivo* decorrente da RAA. Fez-se necessária esta etapa para a garantia de que o modelo geométrico adotado e o carregamento considerado seriam capazes de simular um comportamento coerente de uma barragem de gravidade, que deve estar toda submetida a tensões de compressão. A Figura 7.14 mostra a distribuição de tensões  $S_y$  no bloco em uma idade de atuação total de sua carga, com sua geometria deformada visualizada com um fator de ampliação igual a 2.000 e sem a expansão do gel.



**Figura 7.14.** Distribuição das tensões de compressão na direção y para o bloco sem a atuação do gel

Em seguida foram verificados os resultados para o modelo que não considera o acoplamento com a tensão e para o modelo proposto com acoplamento das tensões. A Figura 7.16 mostra a evolução da pressão do gel estimada para idades de 30, 42 e 48 meses, respectivamente.



**Figura 7.15.** Evolução da pressão do gel sem e com o acoplamento da reação com a tensão

Estes resultados mostram que a distribuição da pressão do gel é estimada de modo coerente. A região inferior direita do bloco de barragem é onde se tem maior tensão confinante devido ao peso-próprio e ao sentido de atuação da pressão da água, a qual tende a empurrar o bloco fazendo-o “girar” no sentido horário. Tal região apresentou as maiores tensões de tração geradas pelo gel quando utilizado o modelo sem acoplamento da tensão com a reação. Esta condição não é observada em casos reais de estruturas de barragens afetadas, nas quais a ocorrência da RAA se dá predominantemente em superfícies livres. A incorporação do acoplamento ao modelo foi capaz de representar o efeito inibidor do confinamento sobre a geração de pressão pelo gel, conforme se pode observar na Figura 7.15.

No exemplo modelado sem o acoplamento com a tensão um total de 18 elementos fissurou. Já no exemplo em que se faz a correlação com a tensão apenas 14 elementos apresentaram fissuras.

## 8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho consistiu no estudo dos efeitos da reação álcali-agregado sobre o concreto, visando à aplicação de um modelo mais adequado aos casos em que as tensões confinantes exercem influência no desenvolvimento expansivo da RAA em estruturas de concreto atingidas.

Com base em informações experimentais e numéricas coletadas na literatura técnica, conclui-se que os modelos propostos para simulação da ação expansiva da álcali-reação sobre o concreto classificam-se, no que se refere à interação entre as tensões impostas sobre a estrutura e a evolução da reação química, em duas categorias: modelos com acoplamento entre tensão e reação e modelos com desacoplamento entre tensão e reação.

Os modelos desacoplados prestam-se bem para representar casos específicos de carregamento nos quais a reação pode se desenvolver livremente - sem confinamento - mas não são capazes de representar o efeito inibidor de tensões confinantes de determinado valor sobre a formação e expansão do gel higroscópico no interior do material.

Propôs-se aqui um aprimoramento do modelo desacoplado adotado por FARAGE (2000), através da incorporação do acoplamento entre a tensão e a reação. Os exemplos de aplicação mostram que a adoção do acoplamento entre tensão e reação torna o modelo mais adequado e geral, uma vez que a evolução da pressão gerada pelo gel higroscópico é inibida pela ação de confinamento. Com isto, é possível representar de modo mais realista o comportamento de estruturas, como a barragem de gravidade aqui apresentada, que trabalham predominantemente à compressão.

Como trabalhos futuros são sugeridos, principalmente:

- o desenvolvimento de um estudo paramétrico baseado em informações coletadas de estruturas reais afetadas pela RAA, para obtenção de valores adequados para as grandezas que definem a curva de expansão do gel;
- melhorar os resultados apresentados com a simulação do caráter aleatório das zonas reativas no concreto estabelecendo uma distribuição de elementos expansivos - para os quais haja evolução da expansão por RAA e da pressão do gel - e elementos inertes -

nos quais a pressão do gel seja nula - através da variação do parâmetro relativo à umidade;

- adoção da modelagem multiescala para incorporar os efeitos microscópicos à simulação dos efeitos macroscópicos da reação Álcali-Agregado sobre as estruturas de concreto;
- aprimorar o programa TriNL, tornando-o mais eficiente para que seja possível a análise de modelos com malhas de elementos finitos mais refinadas do que as aqui empregadas.

Conclui-se que, apesar do alto grau de simplificação empregado na modelagem geométrica e mecânica dos modelos analisados, o modelo aqui apresentado mostrou-se adequado para representar o efeito das tensões de confinamento sobre a Reação Álcali-Agregado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEGHE, L., HINDY, A., HO, M. S., “R. H. Saunders G S Concrete Growth Mitigation Project Instrumentation and Finite Element Analysis”. In: *Proceedings of Second Internacional Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hidroelectric Plants and Dams, USCOLD*, pp. 323-342, Chatanooga, Tennessee, EUA, Oct., 1995.

ALVES, J. L. D., *Programa TriMC: Manual de Entrada de Dados*, PEC/COPPE/UFRJ, 1996.

ANDRADE, W. P. e Equipe de Furnas, *Concreto Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo. Ensaio e Propriedades*, 1ª ed. São Paulo, Pini, 1997.

ANDRIOLO, F. R., *Preposições para a Conservação de Estruturas Afetadas pela Reação Álcali-Agregado*, Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 1997.

BARBOSA, F. S., *Plasticidade Computacional*, Notas de Aula, UFJF, 2008.

BULLETIN 79, *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Dams - Review And Recommendations*. Paris: CIGB/ICOLD, 1991.

CAPRA, B., BOURNAZEL, J. P., “Modeling of Induced Mechanical Effects of Alkali Aggregate Reactions”. *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 2, pp. 251-260, Fev., 1998.

CARRAZEDO, R., *Modelagem Numérica da Expansão do Concreto Devido à Reação Álcali-Agregado*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2004.

CARVALHO, M. R. P., *Influência das Fibras de Aço no desenvolvimento da Reação Álcali-agregado*, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

CRISFIELD, M. A., *Nonlinear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, v.II, U. K., John Wiley & Sons Ltd., 1997.

CURTIS, D. D., “Modeling of AAR Affected Structures Using the GROW3D FEA Program”, In: *Proceedings of the Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in*

*Hydroelectric Plants and Dams, USCOLD*, pp. 457-478, Chatanooga, Tennessee, EUA, Oct, 1995.

\_\_\_\_\_, Hatch Energy Company, Technical Papers.

DNIT 090/2006, *Patologias do concreto - Especificações de serviço*

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

FARAGE, M.C.R., ALVES, J.L.D., FAIRBAIRN, E.M.R., “Macroscopic Model of Concrete to Alkali-Aggregate Reaction”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 3, pp. 495-505, 2004.

FOURNIER, B., BÉRUBÉ, M. A., “Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A Review of Basics Concepts and Engineering Implications”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, pp. 167-191.

GLASSER, L. S.; KATAOKA, N., “The chemistry of ‘alkali-aggregate’ reaction”, *Cement and Concrete Research*, v. 11, n. 1, pp. 1-9, 1981a.

\_\_\_\_\_, “Some observations on the rapid chemical test for potentially reactive aggregate”, *Cement and Concrete Research*, v. 11, n. 2, pp. 191-196, 1981b.

HASPARYK, N. P., *Reação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exsudado*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PortoAlegre, Brasil, 2005.

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

HO, M. S., EASTMAN, K., ADEGHE, L., “Recent development in R. H. Saunders G. S. Concrete Growth Mitigation Project”. In: *Proceedings of the Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hidroelectric Plants and Dams, USCOLD*, pp. 117-132, Chatanooga, Tennessee, EUA, Oct., 1995.



LARIVE, C., *Apport Combinés de L'Alcali-Réaction et des ses Effets Mécaniques*, thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1997.

LCPC, *Guide technique - Aide à la gestion dès ouvrages atteints de réactions de gonflement interne*, Paris, France, Nov.,2003.

LOPES, L. E., *Modelagem Mecânica E Numérica Da Reação Álcali-Agregado Com Aplicação a Barragens de Concreto*, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

MADUREIRA, E. L., *Simulação Numérica do Comportamento Mecânico de Elementos de Concreto Armado Afetados pela Reação Álcali-Agregado*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2007.

ROTS, J. G., BLAAUWENDRAAD, J., *Crack Models for Concrete: Discrete or Smeared? Fixed, Multi-Directional or Rotating?*, Heron, 34/1, 1989.

RILEM, "RILEM 50-FMC Committee – Fracture mechanics of concrete. Determination of three point Bend on notched beams", *Materials and structures*, v. 106, n.18, pp. 285-309, 1985.

SABBAG, A. F., *Verificação da Existência de Reação Álcali-Agregado no Concreto da UHE de Mascarenhas*, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2003.

SHAYAN, A., QUICK, G. W., "Microscopic Features of Cracked and Uncracked Concrete Railway Sleepers". *ACI Material Journal*. v. 89, n. 4, pp. 348-361, 1992.

SILVA, G. A., *Recuperação de Blocos de Coroamento Afetados pela Reação Álcali-Agregado*, Tese de Mestrado, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil, 2007.

SILVEIRA, J. F. A. *Parecer técnico sobre as estruturas de concreto da Usina Hidroelétrica de Furnas - Relatório FR-01/96-RO*, Goiânia: FURNAS Centrais Elétricas S. A., 1996.

STARK, D., "Alkali-Silica Reaction and its Effects on Concrete". In: *Proceedings of the Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, USCOLD*, pp. 9-18, Chatanooga, Tennessee, EUA, Oct., 1995.

TURRIZIANI, R. “Internal Degradation of Concrete: Alkali-Aggregate Reaction, Reinforcement Steel Corrosion”. In: *International Congress On The Chemistry Of Cement*, 8., 1986, Rio de Janeiro, *Proceedings...* Rio de Janeiro, v. 1, pp. 388-442, 1986.