

ROGÉRIO CARRAZEDO

**MODELAGEM NUMÉRICA DA EXPANSÃO DO
CONCRETO DEVIDO À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

CURITIBA

2004

ROGÉRIO CARRAZEDO

**MODELAGEM NUMÉRICA DA EXPANSÃO DO
CONCRETO DEVIDO À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre em Ciências,
pelo Programa de Pós-Graduação em Métodos
Numéricos em Engenharia, Setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. DSc. Luiz Alkimin de Lacerda

CURITIBA

2004

Dedicatória

Dedicar o trabalho a alguém é apenas uma forma de recompensar esta pessoa por ter entendido (ou respeitado) seus anseios em momentos difíceis, mesmo sem entender o que estava acontecendo.

É por isso que dedico este trabalho a aqueles que me apoiaram desde o início, e lá estiveram quando precisei. Sem dúvida, minha esposa, Adriana Vanzelli Carrazedo, que sempre me ajudou com seu sorriso doce e amor indelével, e meus pais, Joaquim Vander Carrazedo e Elenice Cruzatti Carrazedo, a quem tanto amo.

Agradecimentos

São poucos os que aqui trabalharam, mas são muitos que construíram, não apenas com soluções, mas também com perguntas. Agradeço a todos estes, mas em especial:

Agradeço primordialmente meu orientador, Luiz Alkimin de Lacerda. Suas observações direcionaram meus estudos, dando forma a este trabalho no início disperso.

Aos professores Mildred Ballin Hecke e Roberto Dalledone Machado, que, com seus comentários desprendidos e perguntas inusitadas, traziam dúvidas e incertezas que apenas faziam crescer a ânsia de aprender.

Meus colegas de trabalho, que dividiram momentos de descobertas e crescimento, Emílio Eiji Kavamura, Fernando Pereira Lázaro e Neil Franco de Carvalho.

Por último, as empresas que tornaram possível este estudo, por ter disponibilizado os dados e ter financiado meus estudos, Escelsa, Espírito Santo Centrais Elétricas S/A e LAC-TEC, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.

Epígrafe

A água é submissa, mas tudo conquista.

A água extingue o fogo ou, diante de uma provável derrota, escapa como vapor e se refaz.

A água carrega a terra macia, ou quando se defronta com rochedos, procura um caminho ao redor.

A água corrói o ferro até que ele desintegra em poeira; satura tanto a atmosfera que leva à morte o vento.

A água dá lugar aos obstáculos com aparente humildade, pois nenhuma força pode impedi-la de seguir seu curso traçado para o mar.

A água conquista pela submissão; jamais ataca, mas sempre ganha a última batalha.

Tao Cheng (século XI).

Sumário

Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Siglas	xiii
Lista de Símbolos	xiv
Resumo.....	xvii
Abstract	xviii
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Visão Geral da Dissertação	2
2 Reação Álcali-Agregado.....	4
2.1 Reação Álcali-Sílica	6
2.2 Reação Álcali-Silicato	7
2.3 Reação Álcali-Carbonato	7
2.4 Os Efeitos da Reação Álcali-Agregado nas Propriedades do Concreto	8
3 Fatores que Influenciam a Reação Álcali-Agregado	10
3.1 Conteúdo de Álcalis no Concreto	10
3.2 Reatividade do Agregado	11
3.3 Umidade	12

3.4	Porosidade	12
3.5	Tensões Confinantes	13
3.6	Temperatura	14
4	Controle da Expansão	15
4.1	Formas de Controle Reativas	15
4.1.1	Redução da Temperatura	15
4.1.2	Abertura de Juntas	15
4.1.3	Aplicação Superficial de Argamassa	16
4.1.4	Injeção de Resinas Epóxi e Corpos de Fumo de Sílica	16
4.1.5	Monitoramento das Estruturas, Mapeamento das Fissuras e Modelos Matemáticos	16
4.2	Formas de Controle Preventivas	16
4.2.1	Substituição do Agregado	17
4.2.2	Substituição do Cimento	17
4.2.3	Relação Água-Cimento	17
4.2.4	Adição de Materiais Pozolânicos	18
4.2.5	Adições Químicas com Lítio	20
4.2.6	Adições Químicas sem Lítio	21
4.2.7	Adição de Microfibras	21
5	Modelos Matemáticos	22
5.1	Modelo Analítico de Materiais Heterogêneos	22
5.2	Modelo Probabilístico	23
5.3	Modelo Relativo à Variação de Álcalis e Temperatura	23
5.4	Modelo Termodinâmico de Materiais Porosos	24
5.5	Modelo Termodinâmico com Desacoplamento de Tensões	24
5.6	Modelo Termodinâmico de Concreto Danificado	25

5.7	Modelo Paramétrico	26
5.8	Modelagem dos Efeitos Termomecânicos devido à RAA	27
5.9	Modelos Numéricos Utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF)	28
5.9.1	Analogia à Expansão Térmica	29
5.9.2	Analogia à Expansão Térmica com Retro-Análise	29
5.9.3	Modelo Paramétrico	29
5.9.4	Modelo Ortotrópico de Concreto Danificado	30
5.9.5	Modelo Viscoelástico do Concreto com Envelhecimento	30
6	Metodologia Adotada para Modelagem Matemática	31
6.1	Fatores de Influência	32
6.1.1	Temperatura	33
6.1.2	Percolação da Água no Concreto	34
6.1.3	Difusão da Água no Concreto	34
6.1.4	Reatividade dos Constituintes	35
6.1.5	Tensões	36
6.2	Normalização em Fatores de Influência	37
6.3	Equação Constitutiva da RAA	38
6.4	Processo de Otimização	40
6.4.1	Função Objetivo	41
6.4.2	Variáveis de Estado	41
6.4.3	Variáveis de Projeto	42
6.5	Implementação da Metodologia	43
7	Descrição do Modelo e Discussão dos Resultados	44
7.1	Corpo de Prova	44
7.2	Processo de Otimização	45

7.3	Discussão dos Fatores de Influência	48
7.3.1	Conteúdo de Álcalis no Concreto e Reatividade do Agregado	49
7.3.2	Índice de Reatividade	50
7.3.3	Tensões	51
7.3.4	Umidade	52
7.3.5	Porosidade	53
7.3.6	Temperatura	54
8	Conclusão.....	56
8.1	Futuros Desenvolvimentos	58
8.2	Artigos Resultantes	58
	Referências	60
	Apêndice A – USERSW e funções de normalização.....	65
A.1	Rotina USERSW	65
A.2	USER_UMID	69
A.3	USER_POROS	70
A.4	USER_TEMP	71
A.5	USER_TENSAO.....	72
	Apêndice B – Aplicação em APDL.....	73
B.1	Análise de Percolação	73
B.2	Análise de Temperatura	76
B.3	Análise de Tensões e RAA	78
B.4	Otimização	84

Lista de Figuras

Figura 1	Expansão em corpo de prova submetido a ensaio acelerado	5
Figura 2	Relação entre quantidade de álcalis no cimento e quantidade de cimento no concreto e o potencial resultante para RAA	11
Figura 3	Evolução da expansão, no caso uniaxial, no tempo	13
Figura 4	Normalização dos fatores que influenciam a expansão no concreto devido à RAA	26
Figura 5	Metodologia para o cálculo das expansões no concreto devido à RAA .	32
Figura 6	Condições de Contorno	33
Figura 7	Coeficiente de Difusão Não-Linear do Concreto	35
Figura 8	Fatores de influência (F_M , F_P , F_C , F_T) e de calibração (k_p , k_c , k_m e k_t)	37
Figura 9	Expansão em corpo de prova submetido a ensaio acelerado	39
Figura 10	Modelo tridimensional em elementos finitos tetrahédricos do corpo de prova	45
Figura 11	Comparação das Expansões de Corpos de Prova obtidas a partir das equações 6.16 e 6.22 e funções objetivo FO_1 (6.23) e FO_2 (6.24)	47

Figura 12	Modelo de três de corpos de prova com ϵ_{vol}^{max} diferentes, utilizando a equação 6.16	49
Figura 13	Modelo de três de corpos de prova com ϵ_{vol}^{max} diferentes, utilizando a equação 6.22	49
Figura 14	Modelo de três corpos de prova com índices de reatividade diferentes, utilizando a equação 6.16	50
Figura 15	Modelo de três corpos de prova com índices de reatividade diferentes, utilizando a equação 6.22	50
Figura 16	Modelo de três corpos de prova sob diferentes estados de tensão, utilizando a equação 6.16	51
Figura 17	Modelo de três corpos de prova sob diferentes estados de tensão, utilizando a equação 6.22	51
Figura 18	Modelo de três corpos de prova expostos a umidades diferentes, utilizando a equação 6.16	52
Figura 19	Modelo de três corpos de prova expostos a umidades diferentes, utilizando a equação 6.22	52
Figura 20	Modelo de três corpos de prova com porosidades diferentes, utilizando a equação 6.16	53
Figura 21	Modelo de três corpos de prova com porosidades diferentes, utilizando a equação 6.22	53

Figura 22	Modelo de três corpos de prova sob diferentes temperaturas, utilizando a equação 6.16	54
Figura 23	Modelo de três corpos de prova sob diferentes temperaturas, utilizando a equação 6.22	54
Figura 24	Expansão de três corpos de prova sob diferentes temperaturas, utilizando a equação 6.16	55
Figura 25	Expansão de três corpos de prova sob diferentes temperaturas, utilizando a equação 6.22	55

Lista de Tabelas

Tabela 1	Composição dos minerais relacionados com a RAA	5
Tabela 2	Variáveis de projeto ou de calibração	42
Tabela 3	Variáveis de projeto do corpo de prova obtidas utilizando a função objetivo FO_1 (6.23)	46
Tabela 4	Variáveis de projeto do corpo de prova obtidas utilizando a função objetivo FO_2 (6.24)	46
Tabela 5	Dados base para elaboração das figuras 12 à 25	48

Lista de Siglas

RAA	Reação Álcali-Agregado
RAS	Reação Álcali-Sílica
RAC	Reação Álcali-Carbonato
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CTMR	Confinamento, Temperatura, Umidade e Reatividade
MEF	Método dos Elementos Finitos
UPF	<i>User Programmable Features</i>
APDL	<i>ANSYS[©] Parametric Design Language</i>

Lista de Símbolos

A_0	Constante do material para o Modelo de Concreto Danificado
A_1 e A_2	Constantes do material para o Modelo Paramétrico
c	Calor específico
C	Concentração de sal
C_0	Concentração crítica
C^e	Inversa da matriz de rigidez elástica
E	Módulo de elasticidade
E_g	Módulo de elasticidade do gel
E_a	Energia de ativação (lei de Arrhenius)
f_c	Resistência à compressão uniaxial inicial
$f(\sigma)$	Fração de trincas em propagação em um determinado instante de tempo
F_C	Fator normalizado de confinamento (tensões)
F_T	Fator normalizado de temperatura
F_M	Fator normalizado de umidade
F_R	Fator normalizado de reatividade
F_P	Fator normalizado de porosidade
g_1	Representa as restrições impostas pela pressão hidrostática
g_2	Representa as restrições impostas pela temperatura
g_3	Representa a livre expansão de acordo com o nível de álcalis
H	Umidade relativa
k	Condutividade térmica
k_0	Constante cinética (lei de Arrhenius)
k_s	Constante do material para o Modelo Probabilístico
K	Constante de proporcionalidade entre sílica reativa e expansão

P_g	Pressão exercida pelo gel
q	Taxa de calor gerado
$\aleph$	Fluxo de calor específico
$\aleph_c$	Fluxo de calor convectivo
$\aleph_r$	Fluxo de calor radiativo
r_p	Raio do poro
R	Constante de gás perfeito (lei de Arrhenius)
S	Fração de volume de sílica reativa
t	Tempo
t'	Tempo de ativação térmica
t^h	Tempo qualquer durante a expansão devido à RAA
t^p	Parâmetro relacionado com o tempo de preenchimento dos poros
T	Temperatura
T_0	Temperatura abaixo da qual a reação não ocorre
T_a	Temperatura ambiente
V_{GEL}	Volume do gel
V_{VO}	Volume do poro próximo ao local da reação
α	Coeficiente de transferência de calor na superfície
β	Parâmetro de calibração do modelo paramétrico
δ	Delta de Kronecker
$\delta^T \sigma$	Tensões hidrostáticas
ϵ	Deformação total do sistema
ϵ_0	Parâmetro relacionado com a deformação do Modelo Termodinâmico de Concreto Danificado
ϵ_F	Deformação devido à fluência
ϵ_T	Deformação térmica
ϵ_{ch}	Deformação química unidimensional

ϵ_{∞}	Deformação química assintótica
ϵ_{RAA}	Deformação devido à RAA
ϵ^h	Deformação correspondente ao t^h
$\epsilon^{\max}$	Deformação máxima devido à RAA
$\epsilon_{\text{vol}}^{\max}$	Valor assintótico da deformação volumétrica livre por RAA
ϵ_{Ω} e τ	Constantes do Modelo Termodinâmico de Materiais Porosos
$\dot{\epsilon}$	Taxa de deformação total
$\dot{\epsilon}_{RAA}$	Taxa de deformação devido à RAA
$\dot{\epsilon}^{\max}$	Máxima taxa de expansão devido à RAA
ϕ	Função de distribuição Gaussiana
Φ	Concentração de íons alcalinos
η	Tempo de latência
τ_c	Tempo característico
κ	Difusão da água
ν	Módulo de Poisson
v	Constante de Stefan-Boltzman
ρ	Densidade do material
σ	Tensor de Tensões
σ_0	Tensão abaixo da qual a taxa de expansão devido à RAA é desconfinada
Γ	Constante que determina a tensão para a qual a taxa de expansão devido à RAA se anula
ξ	Emissividade da superfície
$\Lambda_1, \Lambda_2,$ Λ_3 e T_x	Constantes do material do Modelo de Efeitos Termomecânicos devido à RAA

Resumo

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

Prever os danos provenientes da expansão pode sugerir meios de reduzir seus efeitos, e para tal previsão a ferramenta mais poderosa é a modelagem matemática. Dentre as diversas metodologias apresentadas na atualidade, o modelo paramétrico é o que consegue melhor adaptar os diversos fatores que influenciam a reação e assim determinar a distribuição espacial da expansão, bem como a sua taxa.

Nesta metodologia, os fatores de reatividade dos constituintes do concreto, de temperatura, de umidade, de porosidade e de estado de tensões são normalizados a fim de serem combinados através de uma equação constitutiva. Para melhor adaptação dos resultados obtidos pela modelagem matemática aos valores observados em campo, técnicas de otimização são empregadas.

Neste trabalho é introduzida uma nova equação constitutiva no intuito de apresentar uma alternativa mais simples para representar a expansão devido à reação álcali-agregado. Esta é então analisada junto a outra equação constitutiva conhecida em um programa comercial de elementos finitos tri-dimensional.

Palavras-chave: Reação Álcali-Agregado; Modelagem Matemática; Otimização.

Abstract

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

Foreseeing the damages that the expansion may cause, suggests ways to reduce its effects, and for this, the most powerful tool is the mathematical modeling. Amongst the diverse methodologies presented nowadays, the parametric model is the one that better combine the diverse factors that influence the reaction and thus determine the spacial distribution of the concrete expansion due to the alkali-aggregate reaction.

In this methodology, the influence factors from the concrete constituents reactivity, temperature, humidity, porosity and tension are normalized in order to be combined through a constitutive equation. To better adjust the results obtained in the mathematical model with the values observed in the real structure, optimization techniques are employed.

In this work it is introduced a new constitutive equation which aims to present an easier alternative to represent the expansion due to alkali-aggregate reaction. Then, this new equation is analyzed with another known constitutive equation in a three-dimensional finite element commercial package.

Key-words: Alkali-Aggregate Reaction; Mathematical Modeling; Optimization.

1 Introdução

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

Desacoplar estes fenômenos se torna necessário para seu estudo. Partindo deste princípio, esta dissertação procura estudar a reação álcali-agregado, que é uma reação química deletéria que ocorre entre os álcalis do cimento e determinados minerais reativos provenientes do agregado, comentando seus mecanismos expansivos e os fatores que os influenciam, além de algumas das ações utilizadas atualmente para controlar e evitar o desenvolvimento da reação. Também discute uma metodologia que visa representar e prever as deformações causadas por esta reação deletéria ao longo do tempo.

Esta metodologia, apresentada por LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) e PAPPALARDO JR. (1998), consiste na determinação dos campos que influenciam a reação álcali-agregado, normalizá-los em fatores de influência, e combiná-los através de uma equação constitutiva. Devido à natureza heterogênea da reação, um processo de otimização é empregado com o objetivo de convergir os valores obtidos pelo modelo matemático aos valores observados nos equipamentos de auscultação instalados na estrutura.

A metodologia tem o intuito de prever as deformações conforme a evolução da reação e, com isso, prover dados suficientes e relativamente confiáveis para o estudo de medidas necessárias para reduzir os danos provenientes da expansão causada pela reação álcali-agregado.

1.1 Objetivos

- Implementar a metodologia empregada para a representação da expansão do concreto devido à reação álcali-agregado apresentada por LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) e por PAPPALARDO JR. (1998);
- Propor, quando possível, modificações com a intenção de aprimorar as técnicas utilizadas por esta metodologia;
- Discutir a metodologia e suas modificações, através da análise dos diversos pontos que a constituem.

1.2 Visão Geral da Dissertação

Ao contrário da grande maioria das dissertações, teses e demais produções acadêmicas, não foi feito um capítulo específico para revisão bibliográfica no presente trabalho. Esta, porém, foi realizada ao longo do trabalho, incitando sempre o leitor a buscar os outros trabalhos desenvolvidos neste mesmo assunto.

O capítulo 2 trata da reação álcali-agregado, como esta se desenvolve e quais são os tipos de reação, além dos mecanismos sugeridos para explicar seu desenvolvimento e seu efeito deletério. A importância deste capítulo está na necessidade de entender os mecanismos que tornam a reação deletéria.

O capítulo 3 apresenta os principais fatores que modificam o comportamento da reação, assim como a forma com que a reação é afetada pelos fatores de influência. Considera-se que o conteúdo de álcalis no concreto, a reatividade do agregado, a umidade, a porosidade, a temperatura e as tensões confinantes são os principais fatores contribuintes para o desenvolvimento da reação. Estes mesmos fatores são a base da metodologia utilizada por esta dissertação.

O capítulo 4 apresenta as formas de controle da expansão estudadas atualmente. Sua importância está, para esta dissertação, na revisão bibliográfica realizada, visando apenas compreender as minúcias da reação álcali-agregado.

O capítulo 5 faz uma revisão dos modelos e metodologias empregados na representação da expansão de uma estrutura de concreto causada pela reação álcali-agregado. São brevemente apresentados os seguintes modelos: modelo analítico de materiais heterogêneos, modelo probabilístico, modelo termodinâmico de materiais porosos, modelo

termodinâmico com desacoplamento de tensões, modelo termodinâmico de concreto danificado, modelagem dos efeitos termomecânicos devido à RAA, modelo paramétrico e modelos numéricos utilizando o método dos elementos finitos.

O capítulo 6 explica a metodologia empregada por esta dissertação, iniciando pelas formas de obter os fatores de influência, depois apresentando os métodos para sua normalização e em seguida o emprego de uma equação constitutiva. Na seção 6.3 deste capítulo, apresenta-se uma modificação na equação que originou este estudo, culminando na proposta de uma nova equação constitutiva. Em seguida, os passos necessários para se realizar o processo de otimização são explicados, além de propor o emprego de uma segunda função objetivo.

O capítulo 7 descreve o modelo utilizado para comprovar a eficácia da metodologia apresentada no capítulo 6. Neste mesmo capítulo, a eficácia da metodologia é discutida através dos resultados apresentados pela sua utilização no modelo previamente descrito, além de discutir a aplicabilidade da equação constitutiva proposta em conjunto com a equação constitutiva apresentada pelo estudo prévio realizado por PAPPALARDO JR. (1998).

O capítulo 8 traz as conclusões resultantes da discussão realizada no capítulo anterior. São obtidas conclusões sobre os campos e os fatores de influências, as técnicas de normalização dos campos de influência, as equações constitutivas utilizadas neste trabalho e o processo de otimização. Além disso, são realizadas propostas para o trabalho para futuros desenvolvimentos e são apresentados os artigos resultantes da elaboração desta dissertação.

2 Reação Álcali-Agregado

Fissuras, redução da durabilidade, decréscimo da resistência mecânica, em especial à tração, são algumas das conseqüências do desenvolvimento da reação química entre os álcalis do cimento e determinados minerais provindos do agregado. Esta reação é conhecida como reação álcali-agregado, ou RAA, e, de acordo com a composição mineralógica reativa do agregado, divide-se em:

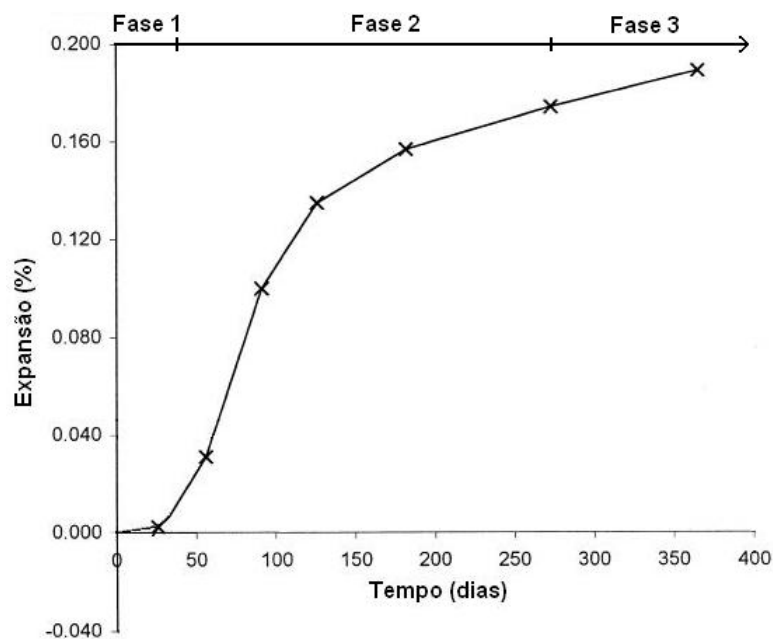
- Reação Álcali-Sílica - RAS;
- Reação Álcali-Silicato;
- Reação Álcali-Carbonato - RAC.

As três reações são deletérias, ou seja, prejudiciais, pois causam expansão e fissuração no concreto. As fissuras podem chegar à superfície, criando trincas, uma vez que a superfície não expande na mesma proporção que o interior do concreto (JONES; CLARK, 1998) e (DIAMOND, 1997). Essa diferença ocorre, por exemplo, pela lixiviação dos álcalis necessários à reação. A diferença entre expansões causa tensões de tração, induzindo o aparecimento de trincas.

Ao longo do tempo, verifica-se a existência de três fases no período evolutivo da reação, processo visualizado na figura 1 e enumerado a seguir:

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

Figura 1: Expansão em corpo de prova submetido a ensaio acelerado



Fonte: BODDY, HOOTON e THOMAS (2000).

Com relação aos mecanismos de expansão, estes diferem para cada tipo de reação, como será explicado em seguida, mas todos envolvem, de uma forma ou de outra, os álcalis liberados na hidratação do cimento e os componentes químicos reativos do agregado.

Na tabela 1, dos autores MEHTA e MONTEIRO (1994), são apresentados os minerais reativos mais comuns e qual o tipo de reação que cada um provoca.

Tabela 1: Composição dos minerais relacionados com a RAA

Mineral Reactivo	Composição Química Reativa	Natureza da Reação
Quartzo Deformado	SiO_2	Álcali-Silicato
Opala	$SiO_2.H_2O$	Álcali-Sílica
Calcedônia	SiO_2	Álcali-Sílica
Tridimita / Cristobalita	SiO_2	Álcali-Sílica
Vidros	Silicosos com Al_2O_3 e Fe_2O_3	Álcali-Sílica
Calcita e Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	Álcali-Carbonato

Fonte: MEHTA e MONTEIRO (1994).

2.1 Reação Álcali-Sílica

Durante a hidratação do cimento, hidróxidos alcalinos são liberados, tornando o fluido dos poros do concreto fortemente básico, com um pH médio de 13. Junto a este fluido, íons hidroxila (OH^-) ficam dissociados. Estes modificam a estrutura da sílica (dióxido de silício - SiO_2) constituinte do agregado, possibilitando a associação de íons metálicos alcalinos (Na e K , sódio e potássio, respectivamente), formando o gel. Além do sódio e do potássio, o íon metálico alcalino do lítio (Li) também pode ser associado. Porém sua associação é benéfica, pois a estrutura do gel resultante dificulta a absorção de água pelo gel. Contudo o lítio não é tão facilmente encontrado após a hidratação do cimento.

Outro ponto a distinguir, e que será determinante, é a concentração de hidróxido de cálcio e de álcalis na formação do gel expansivo ou não expansivo. Se a concentração de hidróxido de cálcio for superior a de álcalis, haverá a formação de um gel de cal - álcali - sílica, não expansivo. Porém, se há predominância de íons alcalinos na solução, um gel de álcali - sílica será formado, com propriedades expansivas (KURTIS et al., 1998).

Já para BLESZYNSKI e THOMAS (1998), o inverso ocorre. Os autores dizem que, com pouco cálcio, o gel é relativamente fluido e dispersa na pasta de cimento, sem causar danos. Com quantidades normais de cálcio, o gel é mais viscoso, além de expandir em contato com a água.

O gel expansivo, através de osmose, absorve uma grande quantidade de água, causando uma pressão hidráulica que, em dado momento, pode superar a resistência de ruptura à tração do concreto, criando microfissuras.

A absorção da água também responde pela mobilidade do gel. Este poderá fluir para o interior do agregado e para outros pontos no concreto, absorvendo mais água e criando fissuras ao longo do concreto, chegando à superfície. CHATTERJI, THAULOW e JENSEN (1989) resumem todo este processo da seguinte forma:



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

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

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

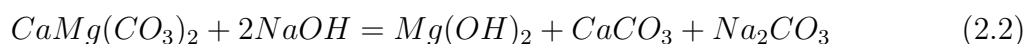
2.2 Reação Álcali-Silicato

De mesmo princípio que a reação álcali-sílica, a reação álcali-silicato ocorre entre os íons alcalinos liberados na hidratação do concreto e os minerais cuja estrutura é dominada pela ligação entre o silício e o oxigênio. Com a hidratação do concreto, há a liberação de $Ca(OH)_2$, que pode reagir com o agregado, provocando a liberação de álcalis na forma de KOH e $NaOH$, além da liberação de silicato de potássio e sódio. Quando a concentração de álcalis atinge certo ponto, os silicatos de cálcio tenderão a se dissolver em silicatos de potássio e sódio, formando um gel que terá cálcio, potássio, sódio e sílica. Este gel tem propriedades expansivas na presença de água, além de ser parcialmente solúvel, o que dá mobilidade ao gel dentro do agregado e do cimento.

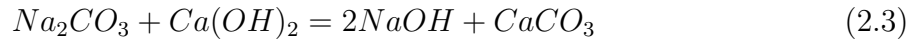
2.3 Reação Álcali-Carbonato

Vários mecanismos foram apresentados para explicar o processo de expansão da reação álcali-carbonato. Porém, todos pesquisadores concordam que o processo ocorre em ao menos duas etapas, sendo a primeira uma reação de desdolomitização e a segunda parte a regeneração dos íons alcalinos.

Como desdolomitização, entende-se como sendo a reação que ocorre entre os íons alcalinos e o calcário dolomítico, conforme a expressão vista no artigo de LIANG e MINGSHU (1995), reapresentada abaixo:



Sabe-se que na expressão 2.2, ao invés de sódio, é possível ter potássio ou lítio. Como resultado da desdolomitização, aparecem cristais de brucita ($Mg(OH)_2$) e calcita ($CaCO_3$). Percebe-se que, pela reação 2.2, deveria haver uma redução no pH do fluido dos poros do concreto devido à redução de íons alcalinos em solução. No entanto o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento reagirá com um dos produtos decorrentes da desdolomitização, o Na_2CO_3 da seguinte forma:



Ou seja, a reação vai liberar os íons alcalinos e formar mais calcita. Assim sendo, o pH se manterá e o álcali, por não participar dos produtos formados, funciona apenas como catalisador da reação.

A partir desse ponto, os pesquisadores diferem em suas teorias de expansão. De acordo com LIANG e MINGSHU (1999), dois pesquisadores que estudaram a reação em dois aeroportos [Ji Nang (LIANG et al., 1997) e Wei Fang (LIANG; MINGSHU, 1997)], a expansão é causada pela formação e crescimento de produtos cristalinos em um espaço confinado, interface de cristais dolomíticos e a matriz, mesmo sabendo que a reação de desdolomitização tem como produto de sua reação partículas de menor volume.

Já SWENSON e GILLOTT (1964) e GILLOTT (1986) (em LIANG e MINGSHU (1999)), propuseram que a expansão é causada pela absorção de íons hidroxila pelos argilo-minerais recém expostos, resultantes da reação de desdolomitização.

2.4 Os Efeitos da Reação Álcali-Agregado nas Propriedades do Concreto

Com a evolução da reação álcali-agregado, as resistências nominais do concreto são afetadas. MARZOUK e LANGDON (2003) estudaram concretos normais e de alta resistência. Ambos foram afetados de forma deletéria pela RAA. A reação reduziu a resistência à compressão com o tempo, assim como a resistência à tração. O maior efeito ocorreu no módulo de elasticidade pois acredita-se que este seja mais afetado quando ocorrem alterações na microestrutura do concreto.

MARZOUK e LANGDON (2003) obtiveram reduções na ordem de 80% no módulo de elasticidade para corpos de prova de concreto feitos com agregados altamente reativos. Para estes mesmos corpos de prova, a redução da resistência à compressão foi

na ordem de 28% e a redução observada na resistência à tração foi de 37%. Porém, utilizando um agregado moderadamente reativo, as reduções foram menores. Decréscimo de 20% no módulo de elasticidade, resistência à compressão praticamente inalterada e resistência à tração decrescida em 31%.

Para os concretos de alta resistência, o incremento das propriedades mecânicas, que deveria ser observado devido às reações pozolânicas, foi reduzido, porém sem provocar o decréscimo das propriedades como ocorreu nos corpos de prova feitos com concreto normal.

3 Fatores que Influenciam a Reação Álcali-Agregado

Para discutir as medidas que devem ser tomadas no aparecimento da reação álcali-agregado ou medidas a serem tomadas de forma a prevenir a ocorrência da reação no futuro, deve-se antes estabelecer uma relação dos principais fatores que estimulam o surgimento e desenvolvimento da reação deletéria. Não apenas isso, mas também como cada fator influencia a reação. Estes mesmos fatores serão utilizados para elaborar o modelo matemático, que será discutido no capítulo 6, de forma conveniente e na sua possibilidade.

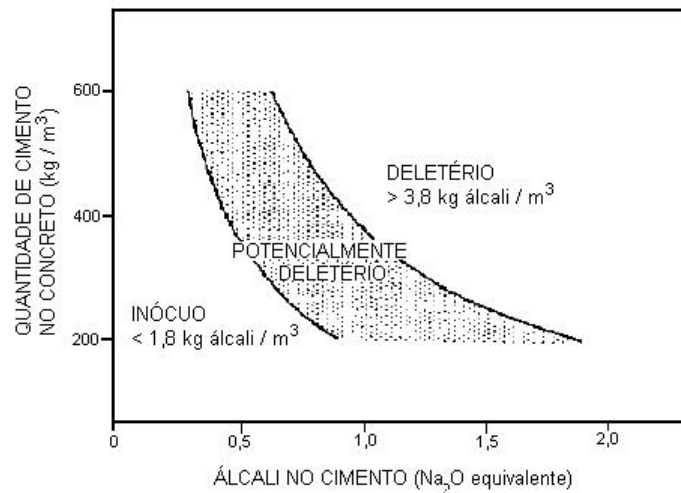
De acordo com LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) e PAPPALARDO JR. (1998), as principais causas e contribuições são provindas do conteúdo de álcalis no concreto, da quantidade, tamanho e reatividade do agregado, da umidade, da porosidade, da temperatura e das tensões confinantes.

3.1 Conteúdo de Álcalis no Concreto

O cimento é tido como a principal fonte de álcalis no concreto. De acordo com COLLINS e BAREHAM (1987), cimentos com teor de álcalis superior a 0,6% de Na_2O equivalente ($Na_2O + 0,658 K_2O$) em exposição a um agregado reativo, cria o gel expansivo das reações álcali-sílica e álcali-silicato.

Mas é importante considerar que podem haver outras fontes de álcalis, como aditivos, adições minerais, agregados contaminados e água do mar (BÉRUBÉ et al., 2002). Existem ainda agregados que liberam álcalis na solução dos poros do concreto, aumentando a concentração de álcalis o suficiente para provocar a RAA mesmo em cimentos de baixa alcalinidade (CONSTANTINER; DIAMOND, 2003). Assim sendo, é preciso determinar o conteúdo total de álcalis ao qual o concreto está exposto. Para tal, quando um agregado reativo é utilizado para a fabricação de um concreto, os parâmetros apresentados pela figura 2 devem ser observados.

Figura 2: Relação entre quantidade de álcalis no cimento e quantidade de cimento no concreto e o potencial resultante para RAA



Fonte: OBERHOLSTER (1983) em WIGUM (1995).

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

3.2 Reatividade do Agregado

O grau de reatividade do agregado está ligado diretamente à velocidade em que as reações ocorrem, assim como o tipo de reação que há de ocorrer. Para a reação álcali-sílica, uma disponibilidade maior de água de cristalização, ou seja, o grupo silanol ($SiOH$) vai propiciar um grau de reatividade maior.

Observa-se que as dimensões do agregado influenciam na reatividade devido às reações ocorrerem na superfície do agregado, ou seja, a reação álcali-agregado é altamente influenciada pela superfície reativa do agregado. De acordo com os estudos de ZHANG et al. (1999), quando o elemento reativo no agregado é a sílica e as dimensões do agregado estão compreendidas entre 0,15 mm e 10 mm, quanto menor o tamanho, maior a expansão. Agregados graúdos, quando reativos, provocam menor expansão nos períodos iniciais em relação aos seus pares miúdos, porém a expansão se propaga por um período bem maior.

3.3 Umidade

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

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

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

3.4 Porosidade

A porosidade pode intervir em diversas formas na expansão do concreto, dependendo do tipo de reação. Para a reação álcali-sílica e para a reação álcali-silicato, existem duas formas em que a porosidade pode interferir.

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

Já para a reação álcali-carbonato os efeitos são os mesmos, mas o mecanismo com o qual a porosidade interfere depende do mecanismo adotado pelo pesquisador. Relembrando, SWENSON e GILLOTT (1964) e GILLOTT (1986) (em LIANG e MINGSHU (1999)) propuseram que a expansão é causada pela absorção de íons hidroxila pelos argilo-minerais resultantes da reação de desdolomitização. A baixa porosidade, por impedir a circulação de água, também impediria a expansão.

Para LIANG e MINGSHU (1999), a formação de cristais não é influenciada pela água. Logo a baixa porosidade só restringiria o espaço para a expansão, criando tensões de tração, conseqüentemente, fissuração.

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

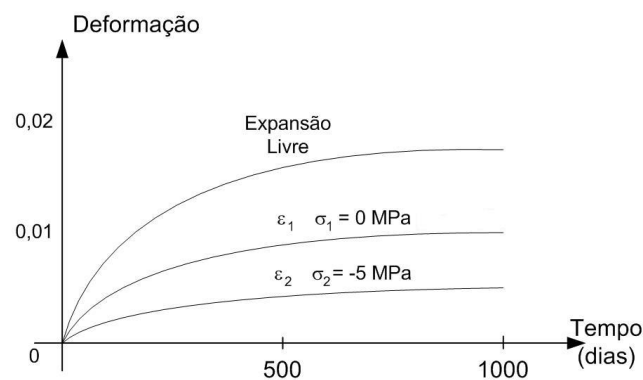
3.5 Tensões Confinantes

Tido como um dos elementos mais importantes que influencia a expansão devido à reação álcali-agregado, as tensões confinantes tendem a limitar a livre expansão do concreto, podendo até suprimi-la. Uma carga de compressão reduz a expansão na direção de aplicação, assim como uma carga de tração auxilia a expansão na mesma direção.

Além disso, quando aplicada uma carga de compressão em uma das direções, a direção ortogonal ao carregamento terá, além da expansão que sofreria normalmente, uma parte referente a expansão restringida na outra direção. Esta afirmação pode ser verificada na figura 3, em que o carregamento é aplicado na direção 2. A curva de expansão livre foi obtida pela soma das expansões nas direções 1 e 2 quando não existiam tensões aplicadas.

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

Figura 3: Evolução da expansão, no caso uniaxial, no tempo



Fonte: CAPRA e BOURNAZEL (1998).

3.6 Temperatura

Com o aumento da temperatura, há um acréscimo na solubilidade da sílica e uma redução na solubilidade do $Ca(OH)_2$, de acordo com COLLINS e BAREHAM (1987) e NEVILLE (1997). 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.

4 Controle da Expansão

Após discutidos os fatores que influenciam a reação álcali-agregado, é possível estudar meios para controlar a reação ou evitar que ela aconteça (ANDRADE, 1997). Para facilitar o estudo, dividir as formas de controle em dois grupos torna-se necessário:

- Preventivo: estudar os materiais antes da construção.
- Reativo: após o aparecimento de evidências do fenômeno, prover medidas para o seu controle.

Sem dúvida, a maneira mais eficiente para evitar danos à estrutura é estudar os materiais, e, se estes se enquadram como reativos, tomar medidas preventivas, reduzindo os efeitos ou até mesmo suprimindo totalmente o fenômeno deletério.

4.1 Formas de Controle Reativas

Primeiramente, serão discutidas as formas de controle reativas, ou seja, medidas que foram tomadas em estruturas que apresentaram evidências da reação álcali-agregado.

4.1.1 Redução da Temperatura

Conforme discutido no capítulo 3, a temperatura acelera a reação. Assim sendo, a redução da temperatura em pontos específicos pode reduzir a velocidade de aparecimento de novos focos.

4.1.2 Abertura de Juntas

Após um certo período de expansão, pode ocorrer o fechamento de juntas, que devem ser reabertas ou ampliadas suas aberturas antes do fechamento, para provocar a liberação de tensões criadas por este fechamento.

4.1.3 Aplicação Superficial de Argamassa

Devido à necessidade de água para a expansão do gel de álcali-sílica e álcali-silicato, a aplicação de uma camada sobre a superfície do concreto, pode reduzir a penetração de umidade e, conseqüentemente, a expansão do gel. Em muitos casos, porém, já existe água em quantidade suficiente absorvida pela estrutura para dar continuidade à formação de gel e expansão, sendo este método ineficaz em tais casos.

Além disso, PORTELLA et al. (2001) lembram que tal tentativa foi realizada na barragem localizada no rio Arraial, no Paraná, onde a aplicação de uma camada protetora mostrou-se ineficiente devido às trincas que vieram a surgir nesta camada.

4.1.4 Injeção de Resinas Epóxi e Corpos de Fumo de Sílica

Na tentativa de estabilizar o processo de percolação de água, necessária à expansão do gel de álcali-sílica e álcali-silicato, PORTELLA et al. (2001) relatam em seu artigo a injeção de resinas epóxi nas fissuras para preencher as fissuras e os poros na superfície do concreto. Esta medida se mostrou eficiente ao se combinar com uma segunda medida, a injeção de corpos de fumo de sílica. O método pelo qual o fumo de sílica reduz a expansão devido à RAA é discutido na seção 4.2.4.3.

4.1.5 Monitoramento das Estruturas, Mapeamento das Fissuras e Modelos Matemáticos

Obviamente estas medidas não irão conter a expansão, nem a reação. Mas o monitoramento pode revelar o grau de comprometimento da estrutura e o mapeamento das fissuras permite determinar a velocidade em que a expansão está ocorrendo e os pontos onde esta é crítica. A representação através de modelos matemáticos pode prever a forma como a reação irá progredir, e, com isso, auxiliar na decisão de formas de controle.

4.2 Formas de Controle Preventivas

Como medidas preventivas, diversos métodos existem e alguns serão discutidos. A decisão de qual medida será utilizada, no caso do estudo do agregado apresentar reatividade, dependerá apenas da disponibilidade de recursos e de um estudo da relação custo-benefício.

4.2.1 Substituição do Agregado

Durante o estudo das características mineralógicas do agregado para concreto, pode ser determinado que este é composto por substâncias reativas aos álcalis do cimento. Quando isso ocorre, a medida mais eficaz a ser tomada é a substituição do agregado por outro não reativo. Mas os custos para tal operação podem tornar a execução da obra inviável. Assim, tornam-se necessárias outras operações para inibir o surgimento ou o desenvolvimento da reação. Ainda com relação ao agregado reativo, pode-se misturá-lo a um agregado não reativo, fazendo-se necessário um estudo das proporções de cada agregado, minimizando o problema.

A utilização de um agregado poroso, mesmo se for reativo, também pode reduzir e até mesmo suprimir a expansão. COLLINS e BAREHAM (1987) constataram que os íons metálicos são diluídos pela água absorvida pelos agregados porosos, levando à redução da expansão. DUCMAN, MLADENOVIC e SUPUT (2002) utilizaram um agregado altamente reativo, porém bastante poroso. Os poros se mostraram suficientes para acomodar todo o gel formado, sem provocar danos ao concreto.

4.2.2 Substituição do Cimento

A substituição do cimento usual por um cimento de baixa alcalinidade pode reduzir a quantidade de íons alcalinos disponíveis para o desenvolvimento da reação. Esta medida já vem sendo discutida há muitos anos pois podem haver outras fontes de íons alcalinos, que promoveriam a reação, como, por exemplo, sais degelantes e água do mar (JENSEN et al., 1982).

4.2.3 Relação Água-Cimento

A relação água-cimento está ligada diretamente à porosidade do concreto. Uma relação água-cimento muito alta leva a uma alta porosidade, e por consequência, a uma resistência mais baixa do concreto. Portanto, acomodando mais gel, porém tornando o concreto mais susceptível aos seus efeitos deletérios.

Com o aumento da porosidade, como foi explicado na seção 3.4, na página 12, há um espaço maior para o gel da reação preencher, reduzindo as pressões internas e a expansão do concreto.

4.2.4 Adição de Materiais Pozolânicos

Existem diversos materiais que são estudados hoje em dia com características pozolânicas. Dentre esses materiais, pode-se citar as pozolanas naturais, a cinza volante (ou ‘*fly-ash*’), cinza de casca de arroz, escória de alto forno e o fumo de sílica (sílica ativa) como sendo as mais comuns. Além de combaterem a expansão causada pela reação álcali-agregado, a adição de materiais pozolânicos melhora outras propriedades do concreto, como, por exemplo, reduz a permeabilidade, aumenta a resistência ao calor, reduz a difusividade (devido à densificação da matriz) e reduz o tamanho da zona de transição, devido à presença de partículas sólidas menores (BIJEN, 1996).

É importante observar que, se o cimento possui uma baixa alcalinidade, as misturas que provocam a incorporação de álcalis não serão eficientes, podendo não influenciar na expansão. Também, de acordo com RAMACHANDRAN (1998), a eficácia com que as misturas de pozolanas naturais, cinza volante, cinza de casca de arroz, escória de alto forno e fumo de sílica vão prevenir os efeitos da reação álcali-agregado, vai depender da composição química das misturas (como porcentagem de SiO_2 e íons alcalinos livres), a quantidade adicionada, o tipo de agregado (o tipo de reação que será combatida) e o tipo de álcalis no cimento (Sódio, Potássio ou Lítio).

4.2.4.1 Cinza Volante e Cinza de Casca de Arroz

A cinza volante é resultante da combustão do carvão em pedra, e só é eficiente se contiver em sua composição alto teor de sílica amorfa, baixo teor de álcalis e baixa quantidade de cálcio (SHAYAN; DIGGINS; IVANUSEC, 1996) e (SHEHATA; THOMAS, 2000). As cinzas de casca de arroz devem ser obtidas através de combustão controlada, para que possa ter sílica altamente reativa e baixa quantidade de álcalis em sua composição.

Esses materiais reagem com o hidróxido de cálcio, liberado na hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado. Como a reação incorpora íons alcalinos, há uma redução no teor de álcalis, inibindo a ocorrência da reação álcali-agregado. A adição dos materiais pozolânicos deve ser determinada através de ensaios, pois esta varia para cada tipo de agregado e cada tipo de material.

É importante lembrar que a utilização de materiais pozolânicos reduz a resistência inicial do concreto, devido às fases lentas de sua hidratação, processo que se normaliza em cerca de 28 dias (LANE; OZYILDIRIM, 1999).

4.2.4.2 Pozolanas Naturais

Os estudos de MONTEIRO et al. (1997) revelaram que a utilização de pozolanas naturais para impedir a expansão causada pela reação álcali-sílica ou silicato não depende da quantidade de álcalis em sua composição. A sua influência está na incorporação de íons alcalinos e na redução da porosidade e permeabilidade do concreto. A sua eficácia está ligada à taxa de óxido de cálcio (CaO) em relação aos hidróxidos alcalinos. Quanto maior esta taxa, mais eficaz será sua adição.

Já os estudos de COLLINS e BAREHAM (1987) mostram que a adição de matérias pozolânicas provoca o excesso de sílica na mistura, que absorve os íons hidroxila, reduzindo o pH e a taxa de dissolução da sílica, que favorece a formação de C-S-H secundário (da reação pozolânica).

4.2.4.3 Fumo de Sílica

Uma discussão separada deve ser feita para o fumo de sílica, pois o princípio pelo qual ele reduz a expansão é um pouco diferente. O fumo de sílica é composto de partículas finas de sílica, que reagem rapidamente com os álcalis do concreto, exaurindo-os quando o concreto ainda está desenvolvendo resistência, evitando a expansão.

Entretanto, uma adição incorreta pode levar a resultados contrários aos esperados. Dentro de uma faixa de adição, não ocorre a extinção dos álcalis, provocando a reação não apenas com o agregado, mas também com o fumo de sílica. Além disso, DIAMOND (1997) diz que partículas de fumo de sílica com dimensões superiores a $40\mu m$ contribuem para a formação do gel de sílica, ao invés de combatê-la.

De acordo com o estudo feito por BÉRUBÉ e DUCHESNE (1993), o fumo de sílica utiliza íons alcalinos na reação pozolânica. Assim, a portlandite, que equilibra a quantidade de íons alcalinos ao deixar em solução íons hidroxila, vai liberar menos íons hidroxila, reduzindo o pH do meio e deixando menos íons hidroxila disponíveis para reagir. Ao mesmo tempo, os autores dizem que a reação pozolânica do fumo de sílica apenas retarda o aparecimento da RAA.

Com o passar do tempo, o silicato de cálcio hidratado, resultado da reação pozolânica do fumo de sílica, pode absorver cálcio, sendo que este substitui os álcalis. Estes álcalis são liberados nos poros do concreto, tornando-se disponíveis para a reação álcali-agregado. Este efeito foi novamente observado por DUCHESNE e BÉRUBÉ (1994) e por SHEHATA e THOMAS (2002).

SHEHATA e THOMAS (2002), para compensar esta liberação de álcalis, utilizam cinza volante que acabou se mostrando eficiente pois a combinação manteve a quantidade de álcalis estável. Com relação às diversas formas em que são comercializadas o fumo de sílica, na tentativa de melhorar suas propriedades, BODDY, HOOTON e THOMAS (2000) perceberam que não importa o tipo, todos se comportam de forma semelhante no que condiz a reação álcali-sílica/silicato.

4.2.5 Adições Químicas com Lítio

Outra medida que pode ser tomada para o combate da reação álcali-agregado é adicionar misturas químicas que não venham a afetar as propriedades do concreto (tanto físicas quanto químicas). Os sais de lítio são os que, em geral, apresentam maior eficiência, mas deve ser observado que nem todos são eficientes e podem estar apenas retardando a evolução do quadro reativo.

Para QINGHAN et al. (1995) e LUMLEY (1997), o lítio participa da formação do gel mais ativamente que os íons metálicos sódio e potássio, sendo seu produto não expansivo, visto que o lítio reduz o esqueleto da parte sólida do gel, dificultando a absorção da água. Porém seu uso deve ser cauteloso. Os sais de lítio, assim como o hidróxido de lítio, carregam consigo íons hidroxila, e, ao participar dos produtos de hidratação, liberam este íons hidroxila para os poros do concreto, aumentando o pH do ambiente (DIAMOND, 1997).

Ao mesmo tempo, o lítio entra na composição do C-S-H, quando presente na hidratação, deixando mais íons metálicos alcalinos em solução, aumentando o potencial reativo do sistema. Assim sendo, quando a quantidade de lítio for pequena, além de haver mais álcalis nos poros do concreto, não sobrarão íons de lítio para participar da formação do gel de sílica.

Além dos sais de lítio, DIAMOND (1999) estudou a adição de nitrato de lítio ($LiNO_3$). Este percebeu que o nitrato de lítio não aumenta a concentração de íons hidroxila (e, por consequência, não aumenta o pH) por não se dissolver na água de amassamento. Assim, a quantidade adicionada pode ser menor, respeitando a parte que será absorvida durante a hidratação do concreto. QIAN, DENG e TANG (2002) observaram que o hidróxido de lítio e outros sais de lítio foram eficientes no combate a reação álcali-sílica, mas causaram aumento ou até promoveram a reação álcali-carbonato.

4.2.6 Adições Químicas sem Lítio

Os agentes incorporadores de ar, em geral sem lítio em sua composição, redistribuem os vazios maiores em vários menores. Isto provoca a redução da expansão, visto que há uma probabilidade maior de haver um vazio próximo ao agregado reativo e este ser preenchido pelo gel resultante de reação álcali-agregado antes de iniciar a expansão. Dependendo da reatividade do agregado, estes vazios não seriam preenchidos, impedindo os efeitos deletérios do gel.

Porém, o preenchimento destes vazios pode reduzir a eficácia do concreto em ambientes com ciclos de gelo/degelo (JENSEN et al., 1984). Além disso, a utilização de agentes incorporadores de ar alteram outras propriedades do concreto, como permeabilidade e resistência.

Além dos agentes incorporadores de ar, existem ainda os retardadores de pega. GILLOTT e WANG (1993) estudaram os efeitos de sua utilização e determinaram que estes atrasam a formação da microestrutura rígida da pasta de cimento, que, por assim sendo, age plasticamente e acomoda as pressões de expansão desenvolvidas em primeiras idades.

4.2.7 Adição de Microfibras

A ligação que ocorre entre microfibras, adicionadas ao concreto, e o cimento dificulta a geração de fissuras e, conseqüentemente, há uma redução na expansão do concreto causada pela reação álcali-sílica. TURANLI et al. (2001) estudaram a adição de microfibras de aço de 32 mm de comprimento, que conseguiram reduzir a expansão de forma adequada (abaixo de um limite imposto pelo tipo de ensaio realizado).

5 Modelos Matemáticos

Existe um bom número de modelos que tentam representar a expansão causada pela reação álcali-agregado, na maioria dependentes de dados do campo para simular devidamente as deformações em uma estrutura real. Isto ocorre devido à heterogeneidade da reação e da sua distribuição randômica na estrutura, além da falta de conhecimento preciso das reações químicas. Alguns modelos são apresentados, seguindo a classificação dada por MORANVILLE-REGOURD (1997), tendo algumas considerações discutidas.

5.1 Modelo Analítico de Materiais Heterogêneos

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

Quando a água se estabelece na superfície do agregado, a água reage formando mais gel e dificultando ainda mais outras partículas de água chegarem até ao agregado. Com isso, é possível determinar quanto gel se formará e qual a pressão que este há de exercer sobre o concreto, dependendo apenas da quantidade de água que o gel absorveu e a compressibilidade do gel formado. Assim, a difusão, vista de forma microscópica, determina a taxa de dissolução e, vista de forma macroscópica, determina a distribuição das pressões exercidas na estrutura.

O modelo é parecido com o modelo apresentado por SVENSSON (1991), em que as fissuras nas partículas e no cimento são geradas por tensões criadas pela difusão baseada no transporte de íons alcalinos para dentro da partícula. Assim, em um meio elástico, sabendo-se que κ é a difusão e Φ é a concentração de íons, a equação governante do problema de difusão é dada por:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \kappa \cdot \text{div} [\text{grad} (\Phi)] \quad (5.1)$$

5.2 Modelo Probabilístico

Discutido por SWENSON e GILLOTT (1964), o modelo probabilístico é dividido em três partes. Na primeira parte, é calculada a probabilidade de existir gel e álcalis no contorno de um agregado reativo, respeitando a difusão iônica representada pela lei de Fick.

Em seguida é utilizada a lei de Laplace para determinar a pressão capilar gerada pelo gel, que é considerado como um fluido. Então estuda-se a probabilidade de haver um poro, ou a distribuição de poros, para determinar a pressão gerada pelo gel, dada por:

$$P_g = \frac{E_g}{3} \left[1 - \frac{V_{VO}}{V_{GEL}} \phi(r_p) + k_s \right] , \quad (5.2)$$

onde P_g é a pressão exercida pelo gel, E_g é o módulo de elasticidade do gel, V_{VO} é o volume do poro mais próximo ao local da reação, V_{GEL} é o volume de gel formado, ϕ é a função de distribuição Gaussiana, r_p é o raio do poro e k_s é uma constante do material.

Por último, utiliza-se a mecânica da fratura para determinar a abertura de fissuras, assim como suas dimensões, progressão e alívio de pressões exercidas pelo gel.

5.3 Modelo Relativo à Variação de Álcalis e Temperatura

CHATTERJI e CHRISTENSEN (1990) apresentaram em seu artigo a equação 5.3 para determinar a expansão última do concreto, repetida abaixo:

$$\epsilon^{\max} = S \cdot K \left(1 - \frac{d\epsilon}{dC} (C - C_0) - \frac{d\epsilon}{dT} (T - T_0) + \frac{d^2\epsilon}{dC dT} (C - C_0) \cdot (T - T_0) \right) , \quad (5.3)$$

onde $\epsilon^{\max}$ é a máxima deformação devido à RAA, S representa a fração de volume de sílica reativa, K representa uma constante de proporcionalidade entre sílica reativa e expansão, C e T são a concentração de sal e a temperatura e C_0 e T_0 são a concentração crítica e a temperatura abaixo da qual a reação não ocorre ($C_0 = 0,5$ e $T_0 = 0^\circ\text{C}$).

A necessidade do conhecimento da taxa de variação da concentração de sal restringe o uso deste modelo, limitando sua aplicação a corpos de prova. Mesmo assim, poucos parâmetros são necessários para prever a expansão do concreto, possibilitando o uso do modelo em laboratórios ou em auxílio a outros modelos.

5.4 Modelo Termodinâmico de Materiais Porosos

Limitado a aplicações em laboratório, o modelo apresentado por OBERHOLSTER (1983) considera a reação ocorrendo em um sistema fechado, onde a variação de massa dá a energia livre. Utilizando a lei de Arrhenius para acoplar a energia livre com a expansão, considerando o material elástico linear, isotrópico em condições isotérmicas, a expansão é dada por:

$$\epsilon_{RAA} = \epsilon_{\Omega} \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \right) , \quad (5.4)$$

onde ϵ_{RAA} é a deformação do concreto devido à RAA e ϵ_{Ω} e τ são constantes expressas em relação a outros parâmetros, como o tensor de propriedades elásticas, coeficiente de acoplamento entre a química e a mecânica, afinidade química inicial da reação, constantes cinéticas e a energia de ativação.

Assim, é necessário o conhecimento das reações químicas para representar o comportamento do concreto. Este comportamento, para validação, é determinado a partir de suas propriedades mecânicas, determinadas em laboratório, onde corpos de prova são utilizados, mantendo-se controle de umidade, temperatura e pressão.

5.5 Modelo Termodinâmico com Desacoplamento de Tensões

Seguindo a linha de outros pesquisadores, FARAGE (2000) utiliza-se dos conceitos da termodinâmica de materiais porosos para determinar a deformação química unidimensional, obtida através da expressão:

$$\epsilon_{ch} = \epsilon_{\infty} \frac{1 - e^{-\frac{1}{\tau_c}}}{1 + e^{-\frac{1-\eta}{\tau_c}}} , \quad (5.5)$$

onde ϵ_{ch} é a deformação química unidimensional, ϵ_{∞} é a deformação química assintótica, η é o tempo de latência e τ_c é o tempo característico, sendo estes três últimos parâmetros (ϵ_{∞} , η e τ_c) determinados através de ensaios de expansão de corpos de prova em diversos estados de umidade e temperatura. Com ϵ_{ch} , é possível determinar a pressão do gel imposta ao esqueleto do concreto.

Durante o processo expansivo, tensões geradas pela expansão do gel provocam a resposta mecânica da estrutura. Quando as tensões induzem a um estado de fissuração, o modelo, que utiliza os conceitos da mecânica da fratura, desacopla as direções normais às superfícies fissuradas e as demais.

5.6 Modelo Termodinâmico de Concreto Danificado

Associando a termodinâmica de processos irreversíveis, distribuição de umidade e a teoria do dano de meios contínuos, CAPRA e BOURNAZEL (1998) determinam a expansão causada pela reação álcali - agregado através da relação entre expansão e os fatores que a influenciam. Os fatores utilizados pelos autores são:

a – Relação reação/expansão

Seguindo a lei de Arrhenius, uma relação entre reatividade potencial e evolução da expansão é desenvolvida. Ao mesmo tempo, os autores utilizam a influência da temperatura na constante cinética da lei de Arrhenius, visto que estes dizem que a temperatura tem pouco efeito sobre a reação.

b – Relação umidade/expansão

Devido à necessidade de íons hidroxila para o desenvolvimento da reação, uma relação entre a umidade relativa e a livre expansão foi utilizada.

c – Relação tensão/expansão

Sabe-se que a expansão é gerada pela abertura de microfissuras. Essas microfissuras são causadas pela pressão exercida nos poros pela expansão do gel. Assim sendo, a abertura das microfissuras, assim como sua distribuição, são controladas pela mecânica da fratura e por um estudo de probabilidade.

A combinação desses fatores resulta na equação:

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = H^8 \frac{\epsilon_0}{A_0} \left(1 - A_0 - e^{-k_0 \cdot t \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}} \right) f(\sigma) , \quad (5.6)$$

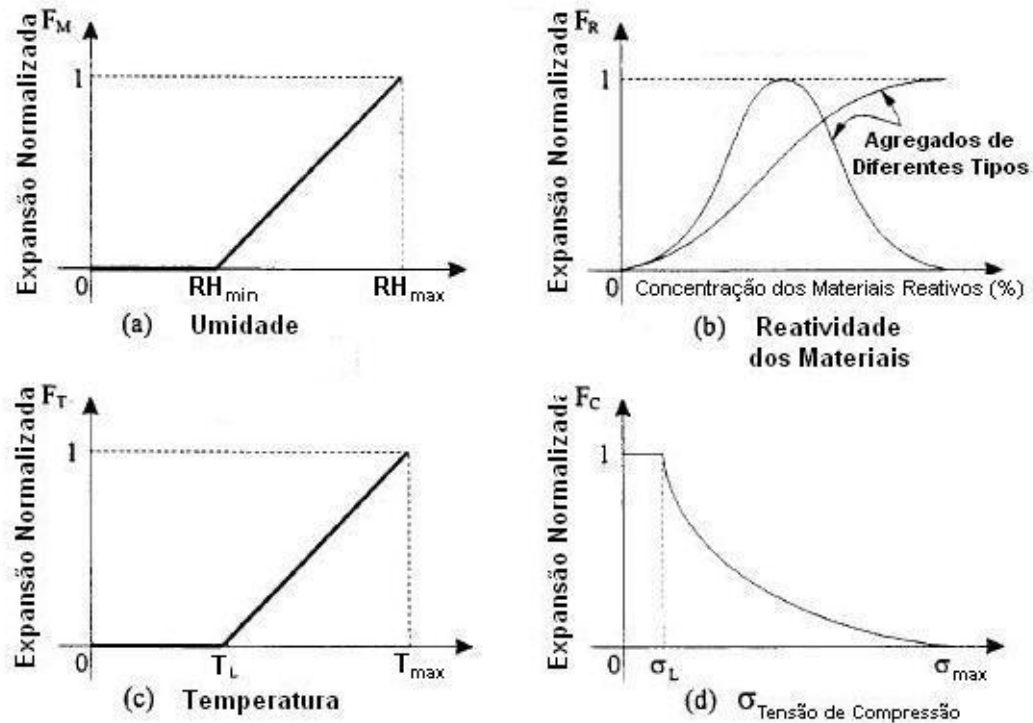
onde $\dot{\epsilon}_{RAA}$ é a taxa de deformação devido à RAA, ϵ_0 é um parâmetro relacionado com a deformação, A_0 é uma constante do material, k_0 é uma constante cinética (lei de Arrhenius), E_a é a energia de ativação, de acordo com a lei de Arrhenius, R é a constante de gás perfeito, dada pela lei de Arrhenius, $f(\sigma)$ é a fração de trincas, controlada pela mecânica da fratura, T é a temperatura, t é o tempo e H é a umidade relativa.

CROUCH e WOOD (1990) afirmam, através da teoria do dano, que o crescimento do gel higroscópico dentro e na superfície das partículas reativas do agregado criam uma distribuição de microfissuras radiais, na direção da superfície livre, ou seja, normal a direção de maior tensão, sugerindo a ortotropia e produzindo menores resistências na direção de maior tensão.

5.7 Modelo Paramétrico

Apresentado por LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996), o modelo consiste em fatores normalizados de expansão que representam os parâmetros que influenciam a reação álcali-agregado associados pela técnica “CTMR” (C = confinamento, T = temperatura, M = umidade, R = reatividade), que simula a distribuição disforme da expansão. Cada um dos campos da CMTR são gerados, separadamente, e depois normalizados, através das leis de normalização apresentadas na figura 4.

Figura 4: Normalização dos fatores que influenciam a expansão no concreto devido à RAA



Fonte: LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996).

Na figura 4, $RH_{\min}$ e $RH_{\max}$ são as umidades relativas mínimas e máximas consideradas (75% e 100%), T_L e $T_{\max}$ são as temperaturas mínimas e máximas consideradas (18°C e 36°C) e σ_L e $\sigma_{\max}$ são as tensões mínimas e máximas consideradas (0,3 MPa e 8,0 MPa).

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

$$\epsilon_{RAA} = \beta(t)[F_C(\sigma, t) F_T(t) F_M(t) F_R(t)] , \quad (5.7)$$

onde β é um parâmetro de calibração, F_C é o fator de confinamento, F_T é o fator de temperatura, F_M é o fator de umidade e F_R é o fator de reatividade, em que os fatores são determinados pelas leis de normalização da figura 4. Além disso, os fatores podem ser considerados transientes, além de ser possível considerar alterações nas propriedades do concreto devido ao desenvolvimento da reação.

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

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = \frac{\epsilon_{vol}^{max} A_1}{(A_1 + t)^2} e^{\frac{A_2 \delta^T \sigma}{f_c}} , \quad (5.8)$$

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

Baseando-se no modelo paramétrico CTMR de LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) e na equação constitutiva de PIETRUSZCZAK (1996), PAPPALARDO JR. (1998) apresenta um modelo paramétrico com modificações na normalização dos campos de influência e uma nova equação constitutiva (5.9). Um modelo modificado a partir do desenvolvido por PAPPALARDO JR. (1998) será utilizado para a modelagem numérica da reação álcali-agregado, tema desta dissertação.

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = \frac{\epsilon_{vol}^{max} A_1 F_T}{(A_1 F_T + t - t^p F_P)^2} \sqrt{F_C F_M} , \quad (5.9)$$

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

5.8 Modelagem dos Efeitos Termomecânicos devido à RAA

HUANG e PIETRUSZCZAK (1999) compõem um modelo que utiliza os efeitos termomecânicos da reação álcali-agregado ao associar às relações constitutivas para materiais elásticos a deformação volumétrica devido à expansão do gel de sílica, e a degradação das propriedades do material devido à RAA, conforme a formulação abaixo (equação 5.10 à 5.15):

$$\dot{\epsilon} = C^e \dot{\sigma} + \dot{C}^e \sigma + \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_{RAA} \delta + \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_T \delta , \quad (5.10)$$

onde $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação total, C^e é a inversa da matriz de elasticidade, σ são as tensões no corpo, δ é o delta de Kronecker e ϵ_T são as deformações de origem térmica. A parcela $\dot{C}^e \sigma$ descreve a degradação das propriedades elásticas devido à reação. $\dot{\epsilon}_{RAA}$ pode ser definido como:

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = g_1(\delta^T \sigma) \dot{g}_3(t') \quad (5.11)$$

$$g_1 = e^{\Lambda_1 \delta^T \sigma / f_c} \quad (5.12)$$

$$g_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \tanh \left(\frac{T - T_x}{\Lambda_2} \right) \right) \quad (5.13)$$

$$g_3 = \frac{\dot{\epsilon}^{\max} t'}{\Lambda_3 + t'} \quad (5.14)$$

$$\dot{g}_3 = \frac{\dot{\epsilon}^{\max} (1 - g_3 / \dot{\epsilon}^{\max})^2}{\Lambda_3} g_2, \quad (5.15)$$

onde g_1 e g_2 são as restrições impostas pela pressão hidrostática e temperatura, g_3 representa a livre expansão de acordo com o nível de álcalis, Λ_1 , Λ_2 , Λ_3 e T_x representam constantes do material, t' é o tempo de ativação térmica, uma propriedade local dependente do histórico de temperatura, $\dot{\epsilon}^{\max}$ é a máxima taxa de expansão devido à RAA e f_c é a resistência à compressão uniaxial inicial.

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

O MEF é uma técnica numérica para se resolver equações diferenciais levando em conta sua formulação variacional, tendo como fundamentação a discretização do seu domínio. O método permite modelagens complexas, não somente do ponto de vista geométrico, mas também do ponto de vista do comportamento não-linear dos materiais. Desta forma, permite a aplicação das equações apresentadas até aqui, visto o grau de complexidade de cada uma.

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

5.9.1 Analogia à Expansão Térmica

Um dos modelos mais simples e largamente usado, a técnica sugere a aplicação de cargas térmicas no intuito de representar as expansões medidas em campo (ADEGHE; HINDY; HO, 1995). Porém, simular a expansão causada pela reação álcali-agregado através da analogia do campo de expansões térmicas produz resultados bastante limitados, que devem ser interpretados apenas de forma qualitativa. Isto ocorre devido às deformações provocadas pela RAA sofrerem a influência de diversos fatores, inclusive a temperatura.

5.9.2 Analogia à Expansão Térmica com Retro-Análise

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

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

5.9.3 Modelo Paramétrico

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

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

5.9.4 Modelo Ortotrópico de Concreto Danificado

CAPRA e SELLIER (2003) publicaram um artigo com um modelo levemente modificado, baseado no modelo termodinâmico de concreto danificado (ver seção 5.6), fazendo uma aplicação em uma viga submetida à reação álcali-agregado, utilizando o método dos elementos finitos. Devido à precisão do modelo, foi possível incluir os efeitos deletérios nas propriedades do concreto, além de ter sido possível determinar o dano causado pela RAA.

5.9.5 Modelo Viscoelástico do Concreto com Envelhecimento

No intuito de avaliar o envelhecimento de estruturas de concreto massa, LEHTOLA et al. (1997) elaboram em seu artigo um modelo que considera as parcelas de fluência, variação de temperatura ao longo do tempo e reação álcali-agregado, a partir da seguinte expressão:

$$\epsilon(t) = \epsilon_F + \epsilon_T + \epsilon_{RAA} , \quad (5.16)$$

onde ϵ é a deformação total do sistema, em um determinado tempo t , ϵ_F é a parcela de deformação devido à fluência, ϵ_T é a deformação devido à temperatura e ϵ_{RAA} é a deformação devido à RAA. A soma se justifica pela consideração de que as deformações estão ocorrendo no regime elástico linear.

Atendo-se à parcela de deformação devido à RAA, desta é desconsiderada a influência devido à temperatura e umidade, levando-se em conta apenas as tensões que restringem a livre expansão do gel, observada na equação 5.17.

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = \dot{\epsilon}^{\max} - \Gamma \log \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \delta , \quad (5.17)$$

onde Γ é uma constante que determina a tensão para a qual a taxa se anula, σ_0 é a tensão abaixo da qual a taxa é desconfiada e δ é o delta de Kronecker. Vale ilustrar que o efeito de deterioração das propriedades do material foi considerado na parcela da fluência.

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

6 Metodologia Adotada para Modelagem Matemática

A metodologia adotada para obter os efeitos da RAA em uma estrutura de concreto para esta dissertação foi baseada na metodologia apresentada por LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) e por PAPPALARDO JR. (1998), que permite a utilização de técnicas de otimização para obter o resultado que melhor se adapta às medições realizadas em campo. O modelo desta metodologia consiste na obtenção da distribuição espacial dos fatores que influenciam a reação álcali-agregado, normalizá-los e depois utilizar uma equação constitutiva para combiná-los e obter a taxa de deformação volumétrica devido à RAA.

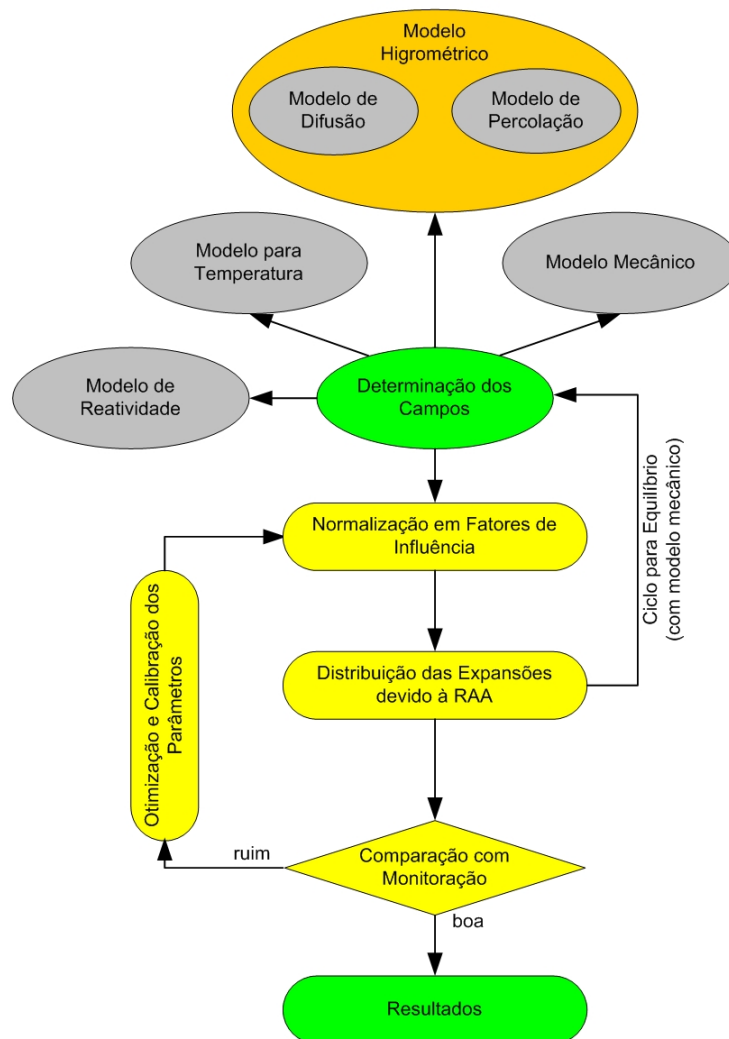
Um esquema para melhor visualizar a metodologia é apresentado na figura 5. Primeiramente são definidos os campos de umidade, através de uma análise higrométrica (de percolação e difusão), de temperatura e de reatividade, além do campo de tensões, de acordo com os diversos esforços sob os quais a estrutura está submetida. Estes campos são normalizados a fim de determinar uma estimativa inicial da distribuição das expansões devido à RAA em toda a estrutura, ao longo do tempo da análise.

Como as expansões impostas pela RAA modificam o modelo mecânico e vice-versa, ambos são recalculados até que haja um equilíbrio entre eles. Nesta metodologia não serão consideradas as inter-relações entre os campos de umidade, temperatura e tensões.

Os resultados obtidos são comparados aos dados obtidos pelo monitoramento da estrutura. As comparações servirão de base para calibrar as variáveis no processo de otimização, produzindo uma nova distribuição das expansões.

Este ciclo de otimização termina quando a comparação entre os resultados da análise e os dados do monitoramento estiverem dentro de limites aceitáveis, ao longo de todo o tempo considerado na análise, e quando as restrições impostas ao modelo estiverem sendo respeitadas.

Figura 5: Metodologia para o cálculo das expansões no concreto devido à RAA



6.1 Fatores de Influência

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

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

Já as tensões são alteradas pelas deformações causadas pelo gel. Assim, além da consideração dos esforços principais da estrutura, será considerado um ajuste nas tensões devido à influência do gel.

6.1.1 Temperatura

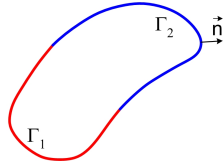
A temperatura modifica a velocidade em que o gel é gerado. Desta forma, a temperatura influencia na velocidade em que a estrutura expande, porém não influencia na expansão final do material.

Para modelar a temperatura, uma breve revisão da formulação é feita a seguir. Sendo q a taxa de calor gerado, considerado independente da temperatura, k a condutividade térmica, ρ a densidade do material e c o calor específico, a equação 6.1 representa a condução de calor para sistemas não-estacionários em um elemento qualquer, que determina a distribuição da temperatura, assim como a sua variação ao longo do tempo.

$$\frac{k}{\rho c} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + \frac{q}{T} , \quad (6.1)$$

São prescritas as condições de contorno e iniciais, conforme mostrado na figura 6 e na formulação a seguir.

Figura 6: Condições de Contorno



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

$$T = f(x) \quad \forall x \in \Gamma_1 , \quad (6.2)$$

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

$$Q = -k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \aleph + \aleph_c + \aleph_r \quad \forall x \in \Gamma_2 , \quad (6.3)$$

quando o fluxo de calor na direção da normal ($\vec{n}$) é prescrito em uma parte do contorno (Γ_2). Reconhece-se $\aleph$ como fluxo de calor específico, $\aleph_c$ como fluxo de calor convectivo (dado pela equação 6.4) e $\aleph_r$ como fluxo de calor radiativo (dado pela equação 6.5).

$$\aleph_c = \alpha(T - T_a) \quad (6.4)$$

$$\aleph_r = \xi v(T^4 - T_a^4) , \quad (6.5)$$

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

6.1.2 Percolação da Água no Concreto

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

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

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

$$\nabla^2 T = 0 , \quad (6.6)$$

onde T , nesse caso, é a umidade.

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

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

6.1.3 Difusão da Água no Concreto

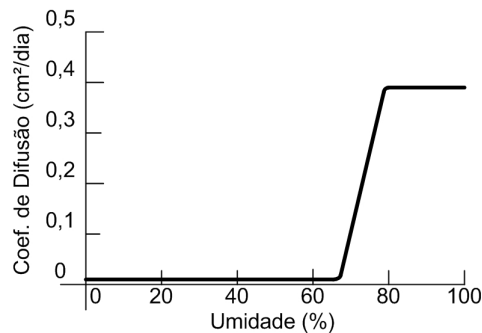
Após definir a superfície de saturação, que é uma fronteira entre a porção saturada e a porção semi-saturada da estrutura, através da análise de percolação, uma análise de difusão é realizada para determinar a umidade relativa na parte semi-saturada.

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

O coeficiente de difusão, proposto por BAZANT e NAJJAR (1971), é obtido através da umidade, como pode ser visto na figura 7, em que para umidades baixas o coeficiente é estimado em $0,0191 \text{ cm}^2$ por dia e em regiões em que a umidade relativa é alta, o coeficiente é estimado em $0,3820 \text{ cm}^2$ por dia.

A transição brusca, vista na figura 7, é devida ao mecanismo de transporte, em que em um meio saturado ocorre por percolação, muito mais rápido, enquanto em um meio não saturado ocorre por capilaridade.

Figura 7: Coeficiente de Difusão Não-Linear do Concreto



Fonte: BAZANT e NAJJAR (1971) in PAPPALARDO JR. (1998).

6.1.4 Reatividade dos Constituintes

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

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

A primeira constante do material tem como função definir a máxima deformação volumétrica que o concreto pode ter e a segunda constante tem como função definir a velocidade com que as deformações vão ocorrer.

6.1.5 Tensões

A partir dos esforços principais, é feita uma análise inicial das tensões, sem considerar as deformações causadas pela RAA. Sobre esta análise, são acrescentadas as deformações devido à RAA (que geram pressões internas e tensões confinantes quando restringidas), fazendo com que o modelo mecânico deva ser recalculado.

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

$$\epsilon = C^e \sigma + \epsilon_{RAA} , \quad (6.7)$$

onde ϵ são as deformações totais do sistema, C^e é a inversa da matriz de rigidez elástica, σ são as tensões no corpo e ϵ_{RAA} são as deformações devido à RAA. Em um corpo tri-dimensional, as matrizes são definidas como:

$$\epsilon^T = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{zz} & \gamma_{xy} & \gamma_{yz} & \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$\sigma^T = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{yy} & \tau_{zz} & \tau_{xy} & \tau_{yz} & \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

$$C^e = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} , \quad (6.10)$$

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

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} ; \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} ; \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6.11)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} ; \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} ; \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (6.12)$$

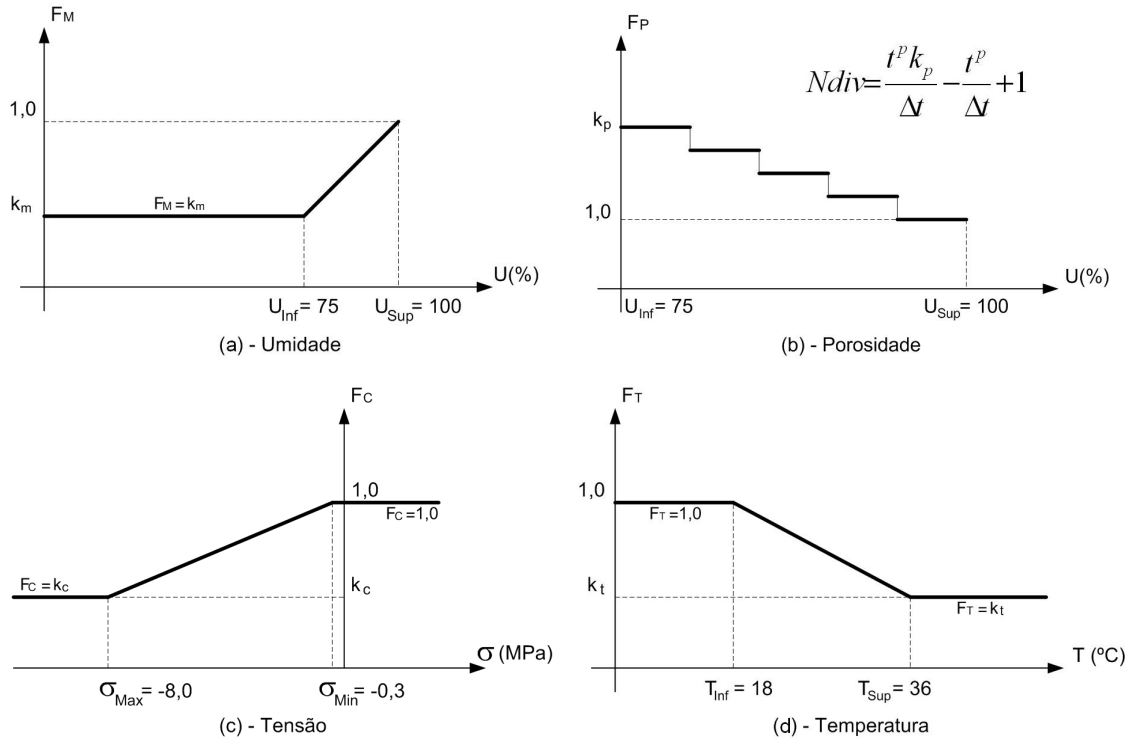
Cabe observar que ainda podem ser considerados outros efeitos comuns no concreto como deformação lenta e relaxação. Além disso, como a RAA provoca reduções no módulo de elasticidade e de Poisson, estes podem modificar conforme a RAA evolui (MARZOUK; LANGDON, 2003) e (HUANG; PIETRUSZCZAK, 1999).

6.2 Normalização em Fatores de Influência

Após a determinação dos campos de influência, estes são normalizados em fatores de influência através de leis lineares, apresentadas na figura 8, que são regidas pelos valores k_p , k_c , k_m e k_t . Cada lei de conversão foi determinada para representar o efeito correspondente pelo respectivo campo no processo expansivo, além das variáveis citadas serem alteradas durante o processo de otimização, para que a parcela de cada fator na taxa de expansão (e na expansão) possa ser ajustada.

Os limites utilizados para as leis de normalização (ou conversão) são os mesmos utilizados por LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) para tensões, umidade e porosidade e os mesmos utilizados por PAPPALARDO JR. (1998) para temperatura. Apesar disso, os limites podem ser levemente alterados, se necessário, mantendo a relação com a influência real dos campos.

Figura 8: Fatores de influência (F_M , F_P , F_C , F_T) e de calibração (k_p , k_c , k_m e k_t)



Fonte: (a), (c) e (d) PAPPALARDO JR. (1998), (b) O Autor.

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

6.3 Equação Constitutiva da RAA

Em 1996, LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) apresentaram o seu modelo paramétrico que utilizava a idéia de converter os campos que influenciavam a reação álcali-agregado em fatores de influência normalizados, para depois utilizá-los em uma equação (já apresentada no capítulo 5 e reapresentada abaixo), para combinar os seus efeitos:

$$\epsilon_{RAA} = \beta(t)[F_C(\sigma, t) F_T(t) F_M(t) F_R(t)] , \quad (6.13)$$

Na mesma época, PIETRUSZCZAK (1996) apresentou uma equação para representar a taxa de expansão do concreto devido à reação álcali-agregado, utilizando o campo de tensões, sendo esta repetida abaixo:

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = \frac{\epsilon_{vol}^{max} A_1}{(A_1 + t)^2} e^{\frac{A_2 \delta^T \sigma}{f_c}} , \quad (6.14)$$

Em 1998, PAPPALARDO JR. (1998) combinou as duas idéias, apresentando um modelo paramétrico que utilizava a conversão dos campos de temperatura, umidade, porosidade e tensões em fatores de influência normalizados, para depois combinar seus efeitos através de uma equação constitutiva, que tem a função de modelar a taxa de expansão volumétrica devido à RAA. Suas modificações resultaram na equação:

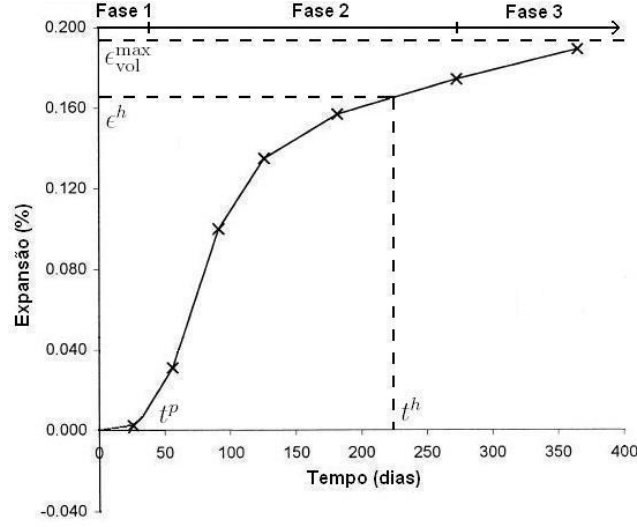
$$\dot{\epsilon}_{RAA} = \frac{\epsilon_{vol}^{max} A_1 F_T}{(A_1 F_T + t - t^p F_P)^2} \sqrt{F_C F_M} , \quad (6.15)$$

Ao observar a equação, pode-se perceber que, no momento que $A_1 F_T + t = t^p F_P$, ocorrerá uma singularidade. Para que esta seja evitada, é proposta a inclusão de uma função Heaviside, sobre t e $t^p F_P$, que ao mesmo tempo faz com que a taxa de expansão seja apenas calculada após o preenchimento completo dos poros. Tal modificação é apresentada na equação 6.16.

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = H(t - t^p F_P) \frac{\epsilon_{vol}^{max} A_1 F_T}{(A_1 F_T + t - t^p F_P)^2} \sqrt{F_C F_M} , \quad (6.16)$$

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

Figura 9: Expansão em corpo de prova submetido a ensaio acelerado



Fonte: BODDY, HOOTON e THOMAS (2000).

Com o intuito de apresentar uma alternativa mais simples para representar a reação álcali-agregado, uma nova equação constitutiva foi desenvolvida. Observando a figura 9 (que é a reapresentação da figura 1, apresentada no capítulo 2), é possível verificar que uma função exponencial, na forma da equação 6.17, consegue representar suas características básicas:

$$f(t) = H(t - t^p) [a_0 - a_1 e^{-a_2(t-t^p)}] \quad (6.17)$$

Considerando $f(t)$ como sendo a expansão volumétrica devido à RAA (ϵ_{RAA}), t^h um tempo qualquer e ϵ^h a expansão correspondente, as seguintes condições podem ser observadas na figura 9:

$$\begin{aligned} \epsilon_{RAA} &= 0 &> t &= 0 \dots t^p \\ \epsilon_{RAA} &= \epsilon^h &> t &= t^h \\ \epsilon_{RAA} &= \epsilon_{vol}^{max} &> t &= \infty \end{aligned} \quad (6.18)$$

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

$$a_0 = a_1 = \epsilon_{vol}^{max} \quad \text{e} \quad a_2 = \frac{\ln\left(\frac{\epsilon_{vol}^{max} - \epsilon^h}{\epsilon_{vol}^{max}}\right)}{t^h - t^p} \quad (6.19)$$

Substituindo os coeficientes da equação 6.19 na equação 6.17, a equação se torna:

$$\epsilon_{RAA} = H(t - t^p) \epsilon_{vol}^{max} [1 - e^{-a_2(t-t^p)}] \quad (6.20)$$

Antes de completar a equação com os fatores de influência, é possível perceber que a_2 tem o papel inverso de A_1 , o índice de reatividade da equação 6.16, visto que ambos alteram a velocidade com que a expansão atinge seu pico. Visto isso, é necessário introduzir os fatores de influência da temperatura, umidade, porosidade e estado de tensões na equação 6.20 para que esta possa representar os efeitos destes campos. Observando a ação de cada parâmetro, a equação fica da seguinte forma:

$$\epsilon_{RAA} = H(t - t^p F_P) \epsilon_{vol}^{max} \left[1 - e^{\frac{-(t-t^p F_P)}{A_2 F_T}} \right] \sqrt{F_C F_M}, \quad (6.21)$$

onde $A_2 = 1/a_2$. Para obter a taxa de expansão volumétrica devido à RAA, diferencia-se a equação 6.21 em relação ao tempo. Assim:

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = H(t - t^p F_P) \epsilon_{vol}^{max} \left[\frac{e^{\frac{-(t-t^p F_P)}{A_2 F_T}}}{A_2 F_T} \right] \sqrt{F_C F_M} \quad (6.22)$$

Porém decorre do uso da função Heaviside que não ocorrerão expansões devido à RAA antes de t^p . Em consequência disso, dependendo do passo de tempo adotado, um erro poderá estar sendo incluso na análise, que pode ser minimizado com o refinamento da discretização temporal. A alternativa empregada foi a adoção de uma lei de conversão “tipo escada” para F_P (ver figura 8) e adotar um passo de tempo tal que t^p seja múltiplo desse valor, fazendo com que t^p esteja sempre no início de um passo de tempo.

6.4 Processo de Otimização

Após ter realizado uma primeira iteração no cálculo, com valores iniciais atribuídos aleatoriamente, é feita uma verificação na função objetivo. Se não forem respeitadas as condições impostas tanto pela função objetivo quanto pelas variáveis de estado, é realizada uma tentativa de minimizar a função objetivo, alterando as variáveis de projeto e, se necessário, as variáveis de estado.

O método utilizado para resolução do processo de otimização foi o “*Subproblem Approximation Method*” que é um método de ordem zero, ou seja, que requer apenas os valores das variáveis de estado e da função objetivo, mas não de suas derivadas.

Para tal, o problema restrito, composto pela função objetivo, variáveis de estado, variáveis de projeto e seus limites, é modificado para um problema sem restrições através de funções de penalidade. Este problema é então minimizado através de uma técnica de minimização sequencial irrestrita.

6.4.1 Função Objetivo

A função objetivo consiste em uma função a ser minimizada através do processo de otimização. PAPPALARDO JR. (1998) utiliza como função objetivo a função erro entre a deformação medida, em campo (por exemplo, nas hastes dos extensômetros instalados na estrutura), e a deformação calculada, ao longo da análise, conforme visto na equação 6.23. Esta função erro, que será chamada de FO_1 , pode receber coeficientes de ponderação diferentes para cada parcela, incitando uma importância maior àquela que receber maior valor.

$$FO_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n k_i} \left\{ k_1 \left[1 + \text{ABS} \left(\frac{M_1 - C_1}{M_1} \right) \right] + \dots + k_n \left[1 + \text{ABS} \left(\frac{M_n - C_n}{M_n} \right) \right] \right\}, \quad (6.23)$$

onde n é o número de medições consideradas (e cada valor de i representa um equipamento de medição em um determinado instante de tempo), M_i é a deformação medida em campo, C_i é a deformação calculada pelo modelo, k_i é o coeficiente de ponderação adotado.

Percebe-se que a métrica utilizada não é eficiente, visto que podem existir vários pontos convergindo e apenas um com grande erro e ainda assim obter um função minimizada. Então é proposto utilizar uma segunda função objetivo, que será chamada de FO_2 e é dada pela maior das diferenças entre as deformações, onde o objetivo seria minimizar a maior distância entre pontos das retas que formam a deformação no tempo, ou seja:

$$FO_2 = \max\{\text{ABS}[k_{ij}(\text{Def. Medida}_{ij} - \text{Def. Calculada}_{ij})]\}, \quad (6.24)$$

com i variando de 1 até n , que é o número de instrumentos considerados (e cada valor de i representa um equipamento de medição), j variando de 1 até m , que é o número de passos de tempo adotado (e cada valor de j representa um ponto no tempo) e k_{ij} é o coeficiente de ponderação adotado para o equipamento de medição, no tempo considerado.

6.4.2 Variáveis de Estado

As variáveis de estado são as restrições do problema, que são dependentes das variáveis de projeto. A elas são impostas condições que funcionam como limites de variação. Por exemplo, as tensões na estrutura não devem ser superiores aos limites definidos para o material. Ainda, em locais com a presença de trincas bem definidas as tensões devem superar a resistência à tração do concreto. A definição das variáveis de estado podem levar em consideração o fator tempo.

6.4.3 Variáveis de Projeto

As variáveis de projeto (ou de calibração) são as variáveis independentes do sistema, modificadas pelo processo de otimização a fim de minimizar a função objetivo. Para o modelo, a tabela 2 mostra as variáveis de projeto utilizadas e o seu significado.

Tabela 2: Variáveis de projeto ou de calibração

Variável	Intervalo	Significado
A_1 ou A_2	$0 < A_1$ ou $A_2 < \text{tempo de análise}$	Define o tempo necessário para que o processo expansivo da RAA se estabilize
$\epsilon_{\text{vol}}^{\text{max}}$	Depende do tipo de RAA	Máxima deformação volumétrica esperada em um ensaio livre de tensões
t^p	moderada: $20 < t^p < 50$ anos severa: $3 < t^p < 10$ anos	Tempo de preenchimento dos poros pelo gel expansivo produzido pela RAA
k_p	$1,0 < k_p < \text{tempo de análise}/t^p$	Modifica o início do mecanismo expansivo da RAA, a partir de t^p
k_t	$0,0 < k_t < 1,0$	Modifica a velocidade das expansões por RAA
k_m	$0,0 < k_m < 1,0$	Regula a importância da umidade no processo expansivo
k_c	$0,0 < k_c < 1,0$	Regula a importância das tensões confinantes no processo expansivo

Fonte: PAPPALARDO JR. (1998).

A definição de um intervalo de validade para o índice de reatividade através de ensaios laboratoriais é difícil em virtude da lentidão do processo expansivo sob condições normais. Por essa razão, os limites adotados estão diretamente relacionados à idade da estrutura ou ao tempo total de análise.

Os limites definidos para a máxima expansão volumétrica dependerão do tipo de RAA. Ensaios químicos e acelerados podem fornecer um bom indicativo para esses valores.

A agressividade da RAA pode fornecer uma idéia sobre o tempo necessário para o preenchimento dos poros com o gel expansivo. Em uma estrutura real sujeita a essa patologia, a inspeção periódica pode fornecer o intervalo de tempo mais apropriado para a definição de t^p .

Os limites para a variação das constantes de calibração k_p , k_c , k_m e k_t podem ser observados na figura 8. Apenas k_p pode assumir valores superiores a uma unidade.

6.5 Implementação da Metodologia

A metodologia foi implementada no programa comercial de elementos finitos *ANSYS*® pois possibilita a inclusão de rotinas programáveis pelo usuário, chamadas “*User Programmable Features*” (UPF), através da linguagem “*ANSYS*® *Parametric Design Language*” (APDL). Dentre as diversas rotinas que o programa permite a alteração e manipulação, a escolhida para o uso foi a **USERSW**, própria para representar a reação álcali-agregado.

Nesta rotina, foram programadas as chamadas às funções de conversão dos campos necessários para o processo (leis de normalização) assim como a função que calcula a taxa de expansão devido à RAA, na linguagem de programação *FORTRAN*®.

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

Como as análises de temperatura e de umidade foram consideradas estacionárias, devido ao alto custo computacional se consideradas transientes, seus resultados salvos em arquivos são recuperados pela rotina **USERSW** para cada elemento.

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

Apesar de prover uma entrada para a rotina que possibilita a representação espacial das expansões devido à reação álcali-agregado, o *ANSYS*® impõe uma limitação: a expansão é tida como isotrópica. Como na análise são obtidas três componentes de expansão (cada qual para uma das direções principais do elemento), é feito uma média aritmética destas expansões para obter a expansão isotrópica.

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

7 Descrição do Modelo e Discussão dos Resultados

Para poder comprovar o devido funcionamento da metodologia apresentada no capítulo 6, foi realizado um estudo em um corpo de prova, submetido a um teste acelerado, apresentado no artigo de BODDY, HOOTON e THOMAS (2000).

Logo após, a metodologia utilizada por este trabalho recebe um enfoque nos seus diversos pontos, cada qual estudado separadamente através de uma análise de sensibilidade, para verificar a coerência dos resultados obtidos, e o que a variação de cada ponto inclui à metodologia. Os pontos discutidos são os fatores de influência e o processo de otimização.

7.1 Corpo de Prova

O estudo realizado por BODDY, HOOTON e THOMAS (2000) utiliza um corpo de prova prismático de 7,5 x 7,5 x 30 centímetros, feito com concreto altamente alcalino e agregado deletério por reações com a sílica de sua composição, submetido a uma temperatura de 38°, umidade relativa de 100% e sem restrições de movimento. O resultado das medições pode ser visto na figura 1, página 5.

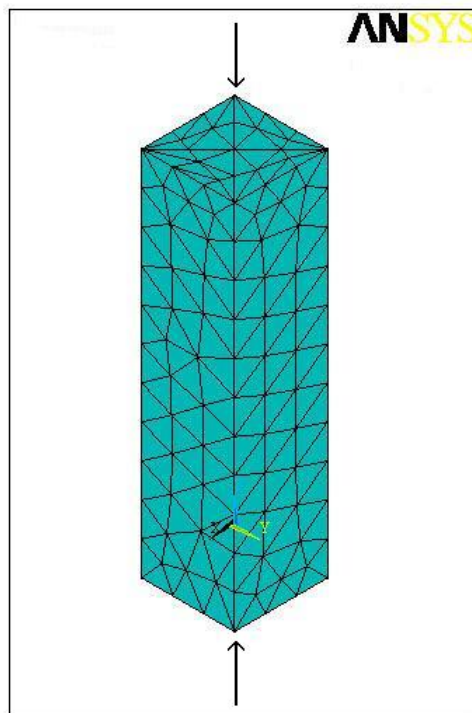
O modelo utilizado para representar o corpo de prova consiste em um modelo tridimensional de elementos finitos, de 625 elementos tetrahédricos de 10 nós, aplicando as mesmas condições que o corpo de prova real foi submetido, ou seja, temperatura de 38°, umidade relativa de 100% e possibilidade de expandir livremente (sem restrições). O modelo pode ser visto na figura 10.

Com relação ao concreto, seu comportamento foi considerado elástico-linear, não sendo considerados os fenômenos não-lineares do concreto (fluência, relaxação e fissuração), nem as alterações nas propriedades físicas com o desenvolvimento da RAA, como bem lembrado por MARZOUK e LANGDON (2003). Assim, o módulo de elasticidade considerado foi igual a 20 GPa e módulo de Poisson de 0,2.

As análises de umidade e temperatura foram consideradas estacionárias na aplicação. Para o problema em estudo essas análises poderiam ser dispensadas, dado que a temperatura e a umidade para todo o corpo de prova são previamente conhecidos. Entretanto, para a metodologia de análise, as análises devem ser efetuadas para que os arquivos de dados a serem normalizados sejam criados.

Para determinar o campo de temperatura, foram considerados os seguintes parâmetros (MEHTA; MONTEIRO, 1994): condutividade térmica isotrópica igual a 2,367 kcal/mh°C e calor específico de 0,23 kcal/kg°C. Para realizar a análise de percolação, foram considerados os seguintes parâmetros (MEHTA; MONTEIRO, 1994): coeficiente de permeabilidade igual a $30 \cdot 10^{-10}$ cm/s e potencial hidráulico em metros de coluna de água ao invés de pressão hidráulica como esforço.

Figura 10: Modelo tridimensional em elementos finitos tetrahédricos do corpo de prova



Nota: 625 elementos tetrahédricos de 10 nós.

7.2 Processo de Otimização

Visto que os valores obtidos pelo modelo numérico diferem dos valores observados nas medições realizadas em campo, um processo de otimização foi utilizado para ajustar o modelo numérico. Como parte da metodologia, o processo foi aplicado utilizando as funções objetivo 6.23 e 6.24 para o corpo de prova apresentado na seção anterior.

A partir dos resultados do modelo foram montadas as tabelas 3 e 4, sendo que a primeira foi obtida pelos resultados apresentados utilizando a função objetivo FO_1 (6.23) e a segunda tabela foi obtida pelos resultados apresentados utilizando a função objetivo FO_2 (6.24). É importante ressaltar que $FO_1 = 1,00$ e $FO_2 = 0,00$ significa uma ótima adaptação da curva obtida pelo modelo numérico com a curva obtida pelos valores observados nas medições em campo.

Na sequência, a figura 11 apresenta as curvas de expansão associadas a estes resultados, assim como a curva almejada pela análise numérica, apresentada por BODDY, HOOTON e THOMAS (2000).

Tabela 3: Variáveis de projeto do corpo de prova obtidas utilizando a função objetivo FO_1 (6.23)

Variável	Variáveis de projeto obtidas com a equação 6.16	Variáveis de projeto obtidas com a equação 6.22	Precisão
Função Objetivo	1,204442	1,197940	0,000001
A_1 ou A_2	237,968 dias	250,989 dias	0,001 dia
ϵ_{vol}^{max}	0,001843	0,001737	0,000001
t^p	56 dias	52 dias	1 dia
k_p , k_m e k_c *	1,00	1,00	0,01
k_t *	0,20	0,20	0,01

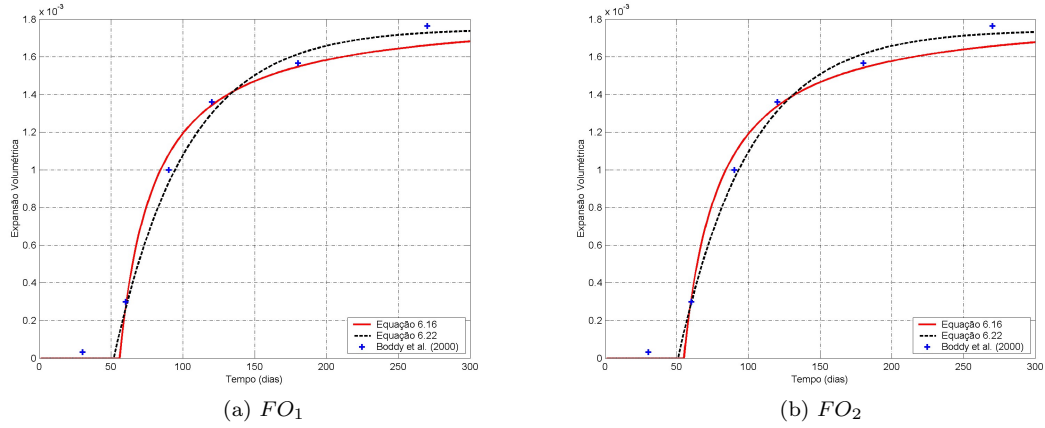
Nota: * - Devido aos estados de umidade, temperatura e tensões sob os quais o corpo de prova foi mantido, as variáveis k_p , k_m e k_c foram mantidas constantes e unitárias e a variável k_t foi mantida constante e igual a 0,20.

Tabela 4: Variáveis de projeto do corpo de prova obtidas utilizando a função objetivo FO_2 (6.24)

Variável	Variáveis de projeto obtidas com a equação 6.16	Variáveis de projeto obtidas com a equação 6.22	Precisão
Função Objetivo	0,000107	0,000050	0,000001
A_1 ou A_2	246,449 dias	247,340 dias	0,001 dia
ϵ_{vol}^{max}	0,001843	0,001744	0,000001
t^p	55 dias	51 dias	1 dia
k_p , k_m e k_c *	1,00	1,00	0,01
k_t *	0,20	0,20	0,01

Nota: * - Devido aos estados de umidade, temperatura e tensões sob os quais o corpo de prova foi mantido, as variáveis k_p , k_m e k_c foram mantidas constantes e unitárias e a variável k_t foi mantida constante e igual a 0,20.

Figura 11: Comparação das Expansões de Corpos de Prova obtidas a partir das equações 6.16 e 6.22 e funções objetivo FO_1 (6.23) e FO_2 (6.24)



Através da análise dos resultados apresentados na tabela 3, obtida utilizando a FO_1 , é possível perceber que as curvas de expansão obtidas estão próximas aos valores observados em laboratório (pelo valor da FO_1).

Analisando a figura 11a, que contém as curvas de expansão correspondentes, percebe-se que a curva de expansão obtida com a equação 6.22 tem pequenos erros nos diversos pontos de medição, conforme esperado.

No entanto, para a curva obtida com a equação 6.16 (ainda na figura 11) ocorre um problema de convergência, em que diversos pontos calculados pelo modelo estão próximos aos resultados da medição e um ponto (o que foi medido no 270° dia) tem um erro maior e, mesmo assim, o valor da FO_1 indica a proximidade dos valores calculados aos valores medidos.

Aplicando-se a FO_2 , que utiliza uma métrica diferente, e analisando-se os resultados apresentados na tabela 4, permanece a configuração já observada, em que a curva obtida utilizando a FO_2 e a equação 6.22 está mais próxima dos resultados do que a curva obtida utilizando a FO_2 e a equação 6.16.

Pela análise da figura 11b, que contém as curvas de expansão correspondentes, percebe-se que há, em ao menos um ponto, uma diferença maior entre os pontos calculados e os medidos quando utilizando a FO_2 e a equação 6.16 (novamente visualizado no 270° dia).

7.3 Discussão dos Fatores de Influência

Para compreender como, na presente metodologia, as equações 6.16 e 6.22 são afetadas por cada um dos fatores de influência, será promovida uma discussão separada de cada fator, ilustrando através de figuras seus efeitos. Estas figuras, assim como a discussão, são elaboradas variando apenas o fator que está sendo discutido e os demais são mantidos fixos.

Os dados utilizados como base para elaboração das figuras são apresentados na tabela 5. Tais dados base foram obtidos visando representar os resultados apresentados por BODDY, HOOTON e THOMAS (2000) e as condições sob as quais o ensaio foi realizado.

Tabela 5: Dados base para elaboração das figuras 12 à 25

Variável	Dados para Equação 6.16	Dados para Equação 6.22
A_1 ou A_2	200 dias	250 dias
ϵ_{vol}^{max}	0,0020	0,0018
t^p	50 dias	50 dias
k_p (umidade 100%)	1,00	1,00
k_t (temperatura 38°)	0,22	0,22
k_m (umidade 100%)	1,00	1,00
k_c (livre de restrições)	1,00	1,00

Com relação aos valores adotados para os parâmetros de calibração das leis de normalização (k_p , k_t , k_m e k_c), estes foram determinados aleatoriamente, apenas para ilustrar como sua alteração modifica a importância do campo analisado.

Assim sendo, para umidade de 75%, limite adotado para a lei de normalização, k_p e k_m serão considerados igual a 1,8 e 0,1, respectivamente. Para estados de tensão que restringem o movimento da estrutura, ou seja, tensões de compressão superiores à 8 MPa, o valor adotado para o parâmetro k_c foi de 0,4. Por último, o valor de k_t adotado para temperaturas superiores a 36° foi de 0,22, enquanto que para temperaturas inferiores a 18°, o valor de k_t denotado pela lei de normalização é de 1,0.

É importante ressaltar que o passo de tempo adotado para a elaboração das figuras foi de 1 dia.

7.3.1 Conteúdo de Álcalis no Concreto e Reatividade do Agregado

Os íons alcalinos junto aos minerais reativos do agregado compõem a reatividade dos constituintes do concreto, que afeta diretamente a expansão do concreto, assim como a taxa de expansão. Esta reatividade é representada pelo valor assintótico de deformação volumétrica livre por RAA (ϵ_{vol}^{max}) e pelo índice de reatividade (A_1 ou A_2).

Nesta seção, é verificado o que o ϵ_{vol}^{max} agrega à metodologia. Para visualizar a influência do parâmetro, foram empregados três concretos com reatividades distintas, representados por ϵ_{vol}^{max} diferentes, na equação 6.16 e na equação 6.22, resultando nas figuras 12 e 13, respectivamente. Pode-se verificar que o ϵ_{vol}^{max} realiza a função que lhe foi proposta, ou seja, altera a máxima expansão final, para ambas equações.

Figura 12: Modelo de três de corpos de prova com ϵ_{vol}^{max} diferentes, utilizando a equação 6.16

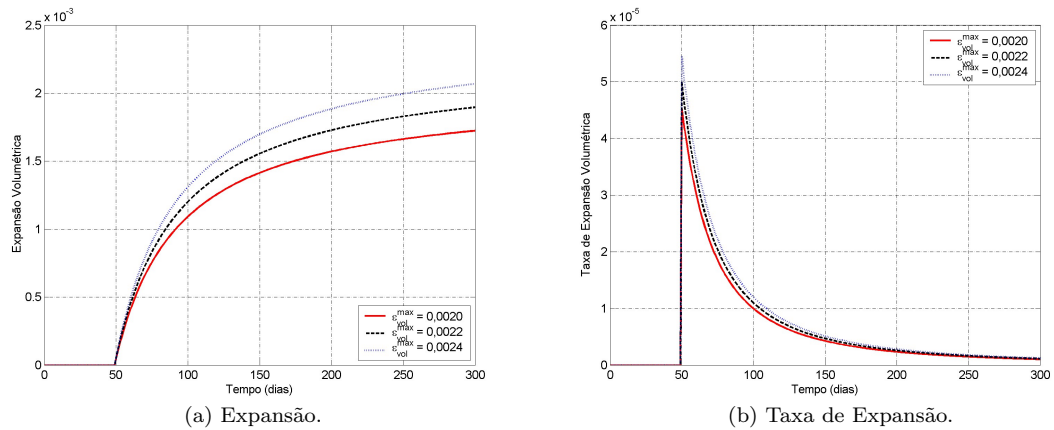
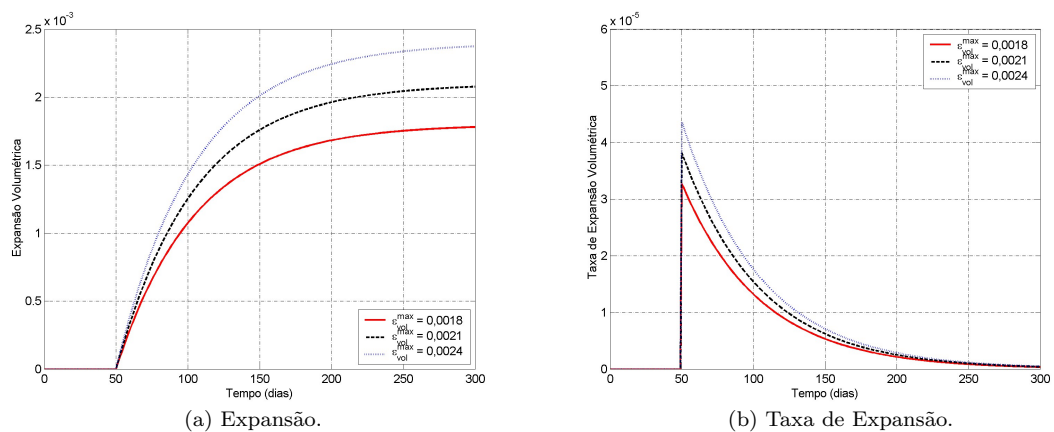


Figura 13: Modelo de três de corpos de prova com ϵ_{vol}^{max} diferentes, utilizando a equação 6.22



7.3.2 Índice de Reatividade

Além do ϵ_{vol}^{max} , a reatividade dos materiais é representada pelo índice de reatividade (A_1 na equação 6.16 e A_2 na equação 6.22), onde diferentes valores influenciam na curvatura da expansão. Sua influência nas equações pode ser vista nas figuras 14 e 15, através da mudança do índice de reatividade representando três agregados diferentes.

O índice de reatividade está relacionado com F_T , em razão de ambos terem o mesmo tipo de influência na taxa de expansão, ou seja, modificam a velocidade com que a estrutura expande. É possível verificar que, quando utilizada a equação 6.16 (ver figura 14) há modificações no valor final da expansão, fato que não deveria ocorrer, como pode ser visualizado na figura 15, obtida utilizando a equação 6.22.

Figura 14: Modelo de três corpos de prova com índices de reatividade diferentes, utilizando a equação 6.16

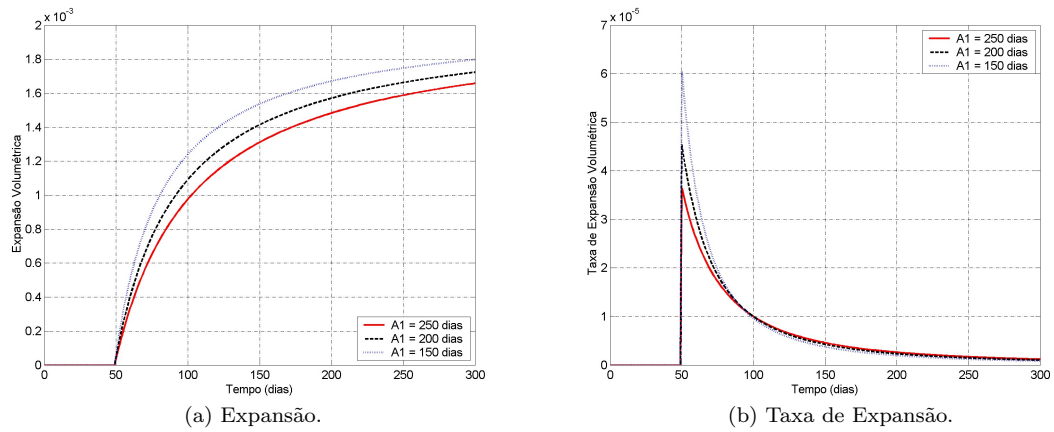
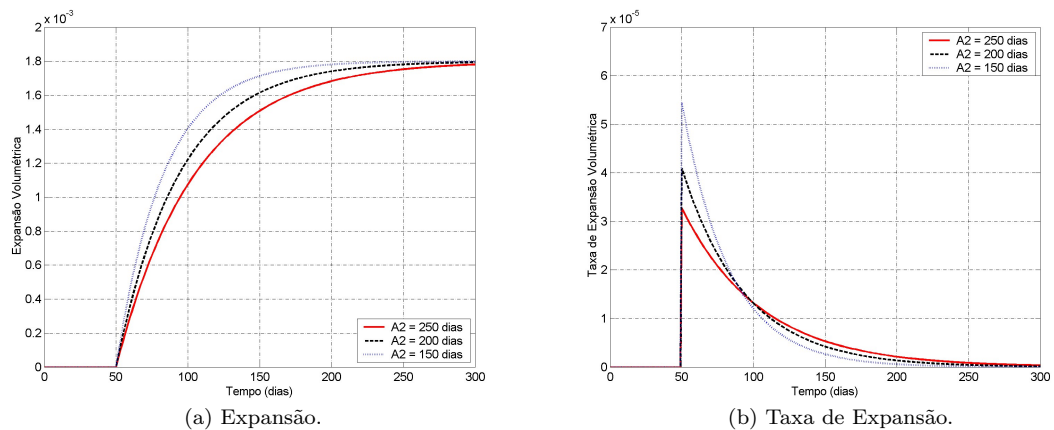


Figura 15: Modelo de três corpos de prova com índices de reatividade diferentes, utilizando a equação 6.22

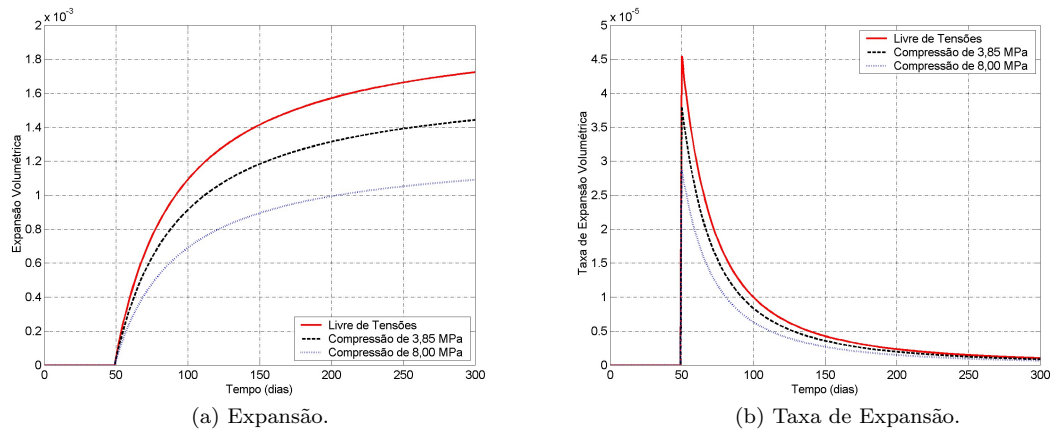


7.3.3 Tensões

A existência de tensões confinantes pode restringir o movimento da estrutura. Assim sendo, uma tensão hidrostática de compressão pode inibir completamente o processo expansivo devido à RAA, assim como tensões diferentes em diversas direções que não venham a restringir a expansão induzem expansões anisotrópicas no concreto.

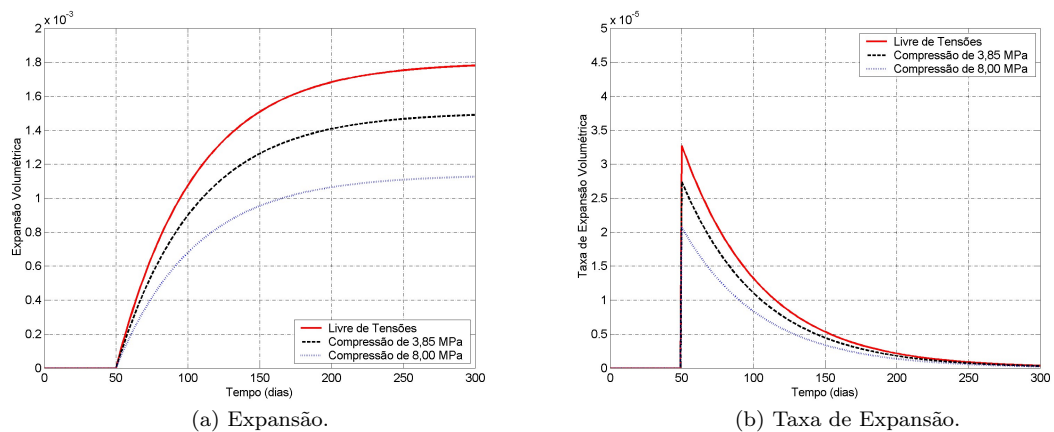
A figura 16 e a figura 17 mostram a variação da expansão e da taxa de expansão, restringidas por diferentes tensões confinantes (ver aplicação da tensão na figura 10) ou livres de restrições de movimento, aplicadas às equações 6.16 e 6.22. Estas variações indicam a devida representação, por ambas equações, da restrição provocada por tensões de compressão.

Figura 16: Modelo de três corpos de prova sob diferentes estados de tensão, utilizando a equação 6.16



Nota: Para tensão de -8,0 MPa, k_c adotado de 0,4.

Figura 17: Modelo de três corpos de prova sob diferentes estados de tensão, utilizando a equação 6.22



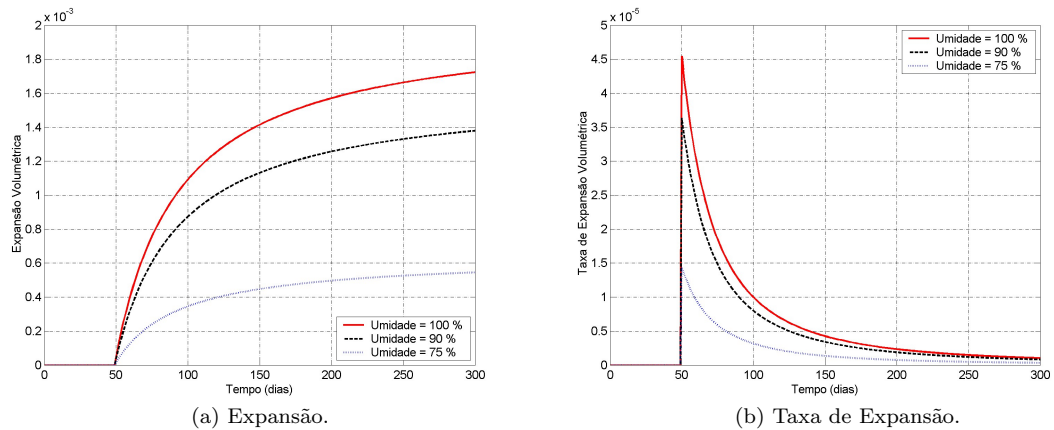
Nota: Para tensão de -8,0 MPa, k_c adotado de 0,4.

7.3.4 Umidade

Para que ocorra expansão no concreto devido à RAA, há a necessidade de existir água diluída nos poros do concreto. Além disso, abaixo de uma determinada umidade relativa, não há água suficiente para ser absorvida pelo gel da RAA, e, consequentemente, não há expansão. Estes efeitos são simulados na formulação pelo fator F_M .

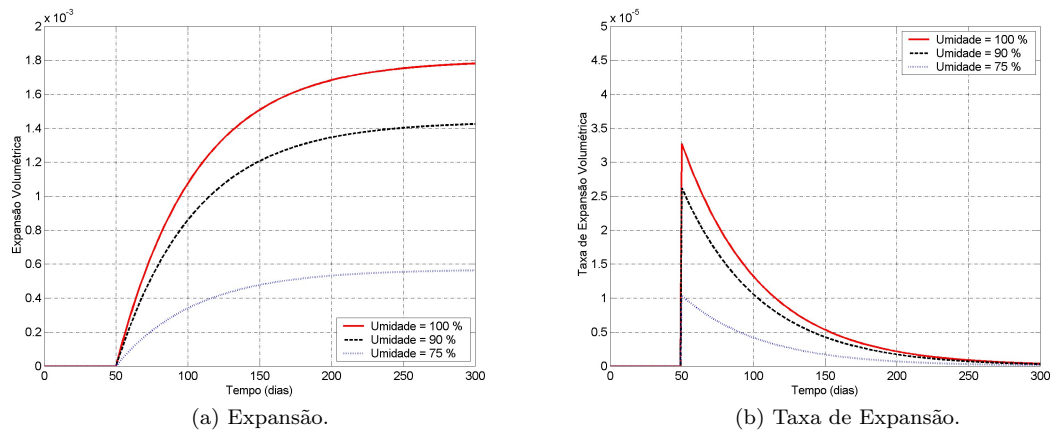
A alteração devido à umidade pode ser vista na figura 18, no que condiz à equação 6.16 e na figura 19, no que condiz à equação 6.22. A variação indica a devida representação da restrição provocada pela falta de água necessária à expansão por ambas equações. Como estão sendo analisadas apenas as alterações devido à umidade, o fator da porosidade F_P foi mantido constante.

Figura 18: Modelo de três corpos de prova expostos a umidades diferentes, utilizando a equação 6.16



Notas: Para umidade de 75%, k_m adotado de 0,1.

Figura 19: Modelo de três corpos de prova expostos a umidades diferentes, utilizando a equação 6.22



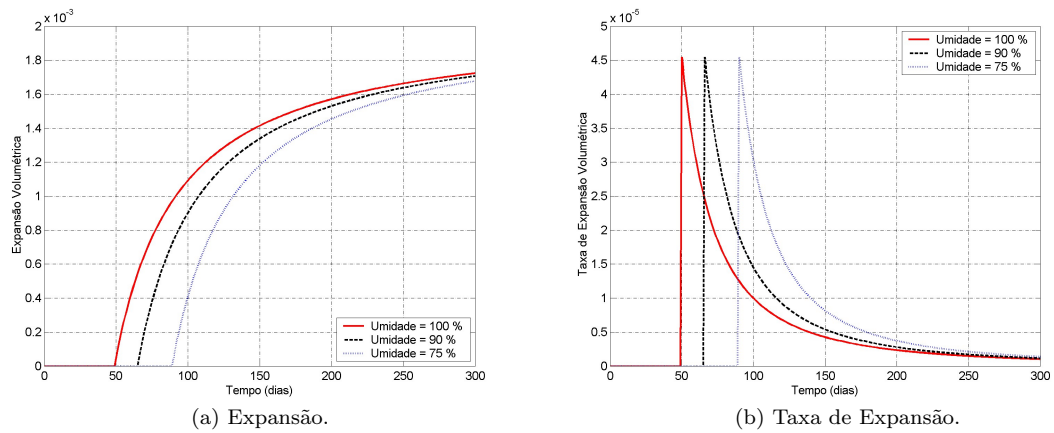
Notas: Para umidade de 75%, k_m adotado de 0,1.

7.3.5 Porosidade

O tempo de preenchimento dos poros é representado por t^p , enquanto o atraso no preenchimento é representado pelo fator F_P . Este atraso é visto na figura 20 e na figura 21 quando ocorre utilizando a equação 6.16 e a equação 6.22, respectivamente, atrasos decorrentes do uso da função Heaviside proposto por este trabalho.

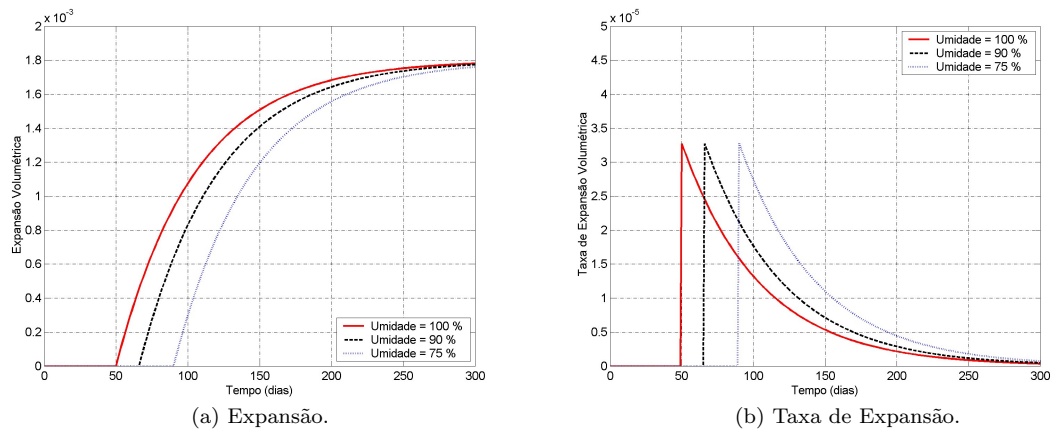
Observa-se que quanto menor a umidade, maior será o atraso no preenchimento. O tempo de início difere devido à variação de F_P , porém converge para o mesmo valor de expansão. Como está sendo analisada apenas as alterações devido à porosidade, o fator da umidade F_M foi mantido constante.

Figura 20: Modelo de três corpos de prova com porosidades diferentes, utilizando a equação 6.16



Notas: Para umidade de 75%, k_p adotado de 1,8.

Figura 21: Modelo de três corpos de prova com porosidades diferentes, utilizando a equação 6.22



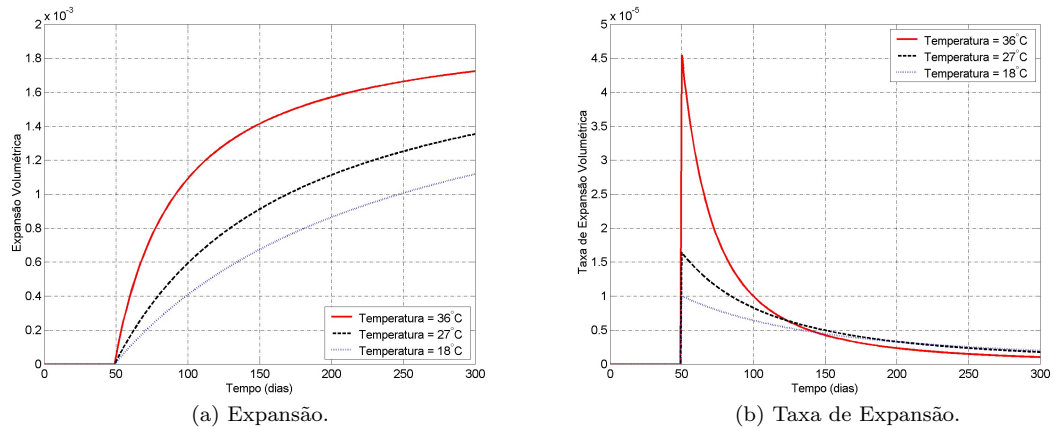
Notas: Para umidade de 75%, k_p adotado de 1,8.

7.3.6 Temperatura

O índice de reatividade define a velocidade com que a expansão ocorre. A temperatura está a ele relacionado devido à sua influência modificar esta taxa de expansão. É importante observar que a temperatura não deve alterar a expansão final.

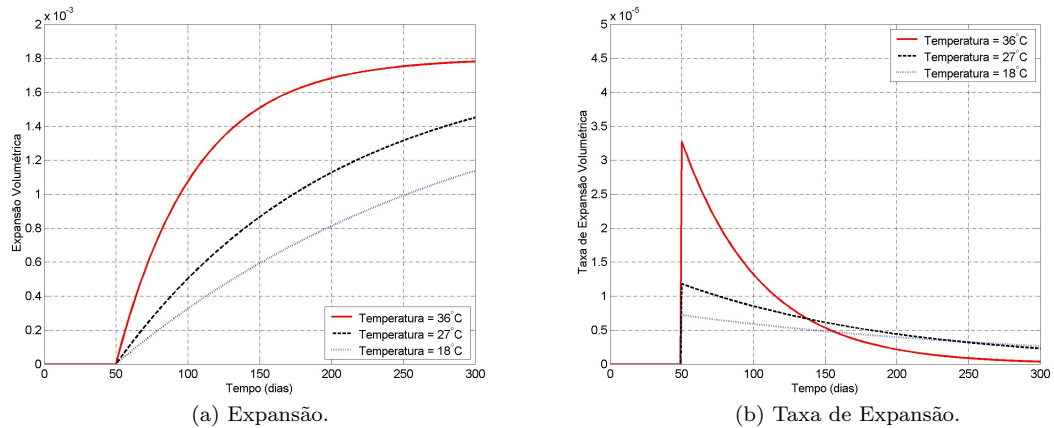
Na figura 22, que foi obtida utilizando a equação 6.16, é possível observar a alteração na taxa de expansão. Porém, da forma como F_T está colocado nesta equação, seu uso implica na mudança da área do gráfico da taxa de expansão. Assim, o fator provoca um pequeno erro, pois resulta em expansões finais diferentes. Na figura 23, obtida utilizando a equação 6.22, a alteração na taxa de expansão é observada, porém a expansão final se mantém, devido à forma mais coerente de aplicação do índice F_T .

Figura 22: Modelo de três corpos de prova sob diferentes temperaturas, utilizando a equação 6.16



Nota: Para temperatura de 18°, k_t igual a 1,0.

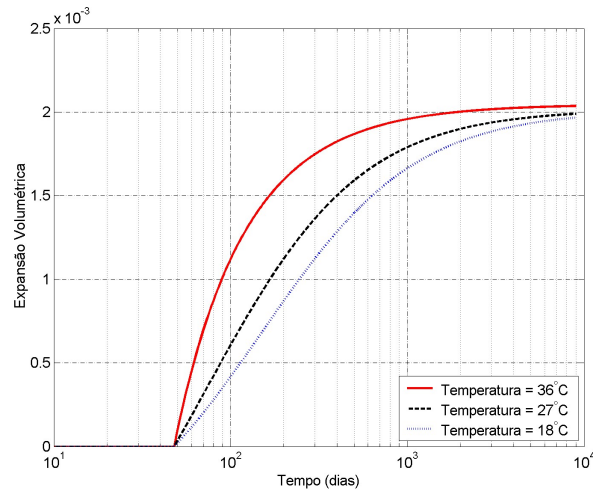
Figura 23: Modelo de três corpos de prova sob diferentes temperaturas, utilizando a equação 6.22



Nota: Para temperatura de 18°, k_t igual a 1,0.

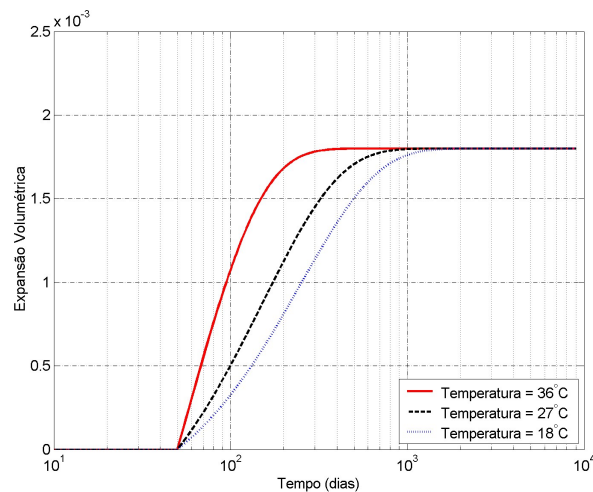
Aplicando novamente a equação 6.16, demonstra-se na figura 24, através de um gráfico semi-logarítmico, que a expansão converge para valores próximos quando decorrido mais tempo (mantendo o pequeno erro). Pela figura 25, determinada a partir da equação 6.22, demonstra-se que tal erro não procede.

Figura 24: Expansão de três corpos de prova sob diferentes temperaturas, utilizando a equação 6.16



Nota: Para temperatura de 18°, k_t igual a 1,0.

Figura 25: Expansão de três corpos de prova sob diferentes temperaturas, utilizando a equação 6.22



Nota: Para temperatura de 18°, k_t igual a 1,0.

8 Conclusão

Para implementar a metodologia apresentada por LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996) e PAPPALARDO JR. (1998), foi utilizado o programa comercial de elementos finitos *ANSYS*®, por possibilitar a inclusão de rotinas programáveis pelo usuário. Estas rotinas, chamadas de “*User Programmable Features*” (UPF), incluídas através da linguagem “*ANSYS*® *Parametric Design Language*” (APDL), possibilitaram a representação dos efeitos deletérios decorrentes da reação álcali-agregado. Diante da implementação da metodologia, as seguintes conclusões puderam ser obtidas:

1. Campos e Fatores de Influência

Após a determinação dos campos necessários a esta metodologia e a normalização em fatores de influência, a utilização destes fatores demonstra a generalidade e a abrangência da técnica, almejada por PAPPALARDO JR. (1998) e por este trabalho.

O comportamento do campo das tensões foi devidamente representado pelo seu fator de influência normalizado, onde tensões de compressão restringem o movimento da estrutura e, conseqüentemente, sua expansão.

O campo da umidade, onde a existência de água livre faz-se necessária para que ocorra a expansão, teve sua representação de forma coerente.

O campo da porosidade, onde vazios devem ser preenchidos pelo produto da reação antes de se iniciar o processo de expansão, teve seu retardo apresentado pelo modelo.

O campo da temperatura, que influencia na velocidade das reações, teve seus efeitos devidamente representados, apesar de uma diferença aceitável na expansão final dos corpos quando utilizada a equação 6.16, diferença que não ocorre quando utilizada a equação 6.22.

Por último, mas não menos importante, o campo da reatividade dos constituintes do concreto teve sua representação feita por dois parâmetros, representando a expansão volumétrica final e o índice de reatividade do concreto.

2. Normalização em Fatores de Influência

As leis lineares de normalização dos campos de umidade, temperatura e estado de tensões, utilizadas por PAPPALARDO JR. (1998), baseadas no estudo apresentado por LÉGER, CÔTÉ e TINAWI (1996), se mostraram eficientes em seu processo. Ainda assim, ajustes podem ser feitos através da mudança dos valores que delimitam a normalização (U_{INF} , U_{SUP} , T_{INF} , T_{SUP} , σ_{INF} , σ_{SUP}), se necessário. Além disso, todas as leis de conversão são regidas por variáveis de calibração, que são modificadas no processo de otimização para regular a importância de cada campo no processo expansivo.

Já a normalização do campo da porosidade, apresentada no trabalho de PAPPALARDO JR. (1998) como sendo linear, foi alterada para uma lei de conversão “tipo escada”, visto a necessidade de $t^p F_P$ estar sempre no início de uma passo de tempo para não provocar um erro de discretização temporal.

3. Equação Constitutiva

A equação apresentada por PAPPALARDO JR. (1998) (5.9) incorria em uma singularidade no momento em que a parcela responsável pelo preenchimento dos poros igualasse a parcela do índice de reatividade somada ao tempo. Esta singularidade levou a uma modificação que consiste na inclusão de uma função Heaviside, tornando a equação mais eficiente, ao evitar o erro, gerando assim a equação 6.16.

Apesar da equação 6.16 se mostrar eficaz, este trabalho apresenta uma nova equação constitutiva (6.22), que se mostrou mais eficiente, em especial na representação dos efeitos da temperatura e do índice de reatividade. Os efeitos dos demais parâmetros na equação 6.22 são análogos aos efeitos visualizados na equação 6.16.

4. Processo de Otimização

O processo de otimização, como esperado, conseguiu convergir os valores obtidos pela análise numérica aos valores observados em campo. Porém, a função objetivo utilizada por PAPPALARDO JR. (1998) (6.23) apresentou problemas na convergência, visto que em momentos a equação levava a mínimos locais e, por vezes, resultava em uma função minimizada, com um ponto apresentando um grande erro.

A função objetivo 6.24 se mostrou um pouco mais eficiente por ter uma métrica mais eficaz, levando mais rapidamente a soluções mais precisas. Apesar disso, houveram casos em que ocorreram convergências para mínimos locais.

A ocorrência de mínimos locais é inevitável nesse processo, e a maior ou menor rapidez em se obter um resultado final aceitável depende dos limites para a faixa de valores aceitáveis para as variáveis de projeto, bem como do número de restrições impostas como variáveis de estado.

8.1 Futuros Desenvolvimentos

Com relação aos futuros adendos à metodologia, considera-se, em ordem de importância, as seguintes ações:

- Antes de atentar a possíveis melhorias ao modelo apresentado, é importante implementar a metodologia em uma estrutura de grande porte que esteja desenvolvendo a patologia.
- Implementar análises transientes para temperatura e umidade, incluindo as suas influências no estado de tensões.
- Considerar o deterioramento das propriedades do concreto, em especial o módulo de elasticidade.
- Incluir a anisotropia das expansões provocadas pelo gel da RAA e o acoplamento das expansões nas direções principais.
- Adicionar os fenômenos de fluência e relaxação, possibilitando a inclusão dos efeitos de envelhecimento do concreto, em um modelo visco-elástico.
- Implementar no modelo uma forma de análise do dano causado pela RAA e prover, através da mecânica da fratura, o estado de fissuração da estrutura.

8.2 Artigos Resultantes

Os seguintes artigos foram elaborados a partir dos estudos realizados para esta dissertação:

- CARRAZEDO, R.; LACERDA, L. A.; SAVA, J. A. Discussão dos fatores de influência da expansão do concreto causada pela reação álcali-agregado utilizado em um modelo paramétrico. In: *Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia*. Lisboa, Portugal: [s.n.], 2004.

- CARRAZEDO, R.; LACERDA, L. A. A parametric model discussion for the concrete expansion due to AAR. In: *12th International Conferences on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Beijing, China: [s.n.], 2004.
- CARRAZEDO, R.; LACERDA, L. A. Expansão do concreto causada pela reação álcali-agregado determinada por um modelo paramétrico: Aplicação em corpo de prova. In: *XXV Congresso Ibero-Latino-Americano em Métodos Computacionais em Engenharia*. Recife, Brasil: [s.n.], Novembro de 2004.

Referências

- ADEGHE, L.; HINDY, A.; HO, M. S. R. H. Saunders generating station concrete growth mitigation project - instrumentation and finite element analysis. In: USCOLD. *International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams*. Chattanooga, 1995. v. 2, p. 323–342.
- ANDRADE, W. P. *Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo*. São Paulo, Brasil: PINI, 1997.
- BAZANT, Z. P.; NAJJAR, L. J. Drying of concrete and non-linear diffusion problems. *Cement and Concrete Research*, v. 1, n. 5, p. 461–473, 1971.
- BAZANT, Z. P.; STEFFENS, A. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 3, p. 419–428, Março 2000.
- BERNARDES, H. D. M.; ANDRÉ, J. C.; CASTRO, A. T. D. Retro-análise na observação dos efeitos da reatividade Álcali-agregado. In: *Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto*. Goiânia, Brasil: [s.n.], 1997.
- BERNARDES, H. D. M.; ANDRÉ, J. C.; RODRIGUES, R. D. O. Observação de deformações em barragens de concreto sob reações Álcali-agregado. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. *43º Congresso Brasileiro do Concreto*. Foz do Iguaçu, Brasil, 2001.
- BÉRUBÉ, M.-A.; DUCHESNE, J. Does silica fume merely postpone expansion due to alkali-aggregate reactivity? *Construction and Building Materials*, v. 7, n. 3, p. 137–143, Setembro 1993.
- BÉRUBÉ, M.-A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 8, p. 1215–1227, Agosto 2002.
- BIJEN, J. Benefits of slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 10, n. 5, p. 309–314, Julho 1996.
- BLESZYNSKI, R. F.; THOMAS, M. D. Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions. *Advanced Cement Based Materials*, v. 7, n. 2, p. 66–78, Março 1998.
- BODDY, A. M.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. The effect of product form of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 7, p. 1139–1150, Julho 2000.
- CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P. Modeling of induced mechanical effects of alkali aggregate reactions. *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 2, p. 251–260, Fevereiro 1998.

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

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

CHATTERJI, S.; CHRISTENSEN, P. Studies of alkali-silica reaction. Part 7: Modelling of expansion. *Cement and Concrete Research*, v. 20, n. 2, p. 285–290, Março 1990.

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

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

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

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

CROUCH, R. S.; WOOD, J. G. M. Damage evolution in AAR affected concretes. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 35, n. 1-3, p. 211–218, 1990.

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

DIAMOND, S. Unique response of LiNO₃ as an alkali silica reaction-preventive admixture. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 8, p. 1271–1275, Agosto 1999.

DUCHESNE, J.; BÉRUBÉ, M.-A. The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: Another look at the reaction mechanisms. Part 1: Concrete expansion and portlandite depletion. *Cement and Concrete Research*, v. 24, n. 1, p. 73–82, 1994.

DUCMAN, V.; MLADENOVIC, A.; SUPUT, J. S. Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 2, p. 223–226, Fevereiro 2002.

FARAGE, M. C. R. *Modelagem e Implementação Numérica da Expansão por Reação Álcali-Agregado do Concreto*. Tese (Doutor em Ciências) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Setembro 2000.

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

GILLOTT, J. E.; WANG, H. Improved control of alkali-silica reaction by combined use of admixtures. *Cement and Concrete Research*, v. 23, n. 4, p. 973–980, Julho 1993.

- GLASSER, L. S. D.; KATAOKA, N. The chemistry of alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 11, n. 1, p. 1–9, Janeiro 1981.
- HUANG, M.; PIETRUSZCZAK, S. Modeling of thermomechanical effects of alkali-silica reaction. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 125, n. 4, p. 476–485, Abril 1999.
- JENSEN, A. D.; CHATTERJI, S.; CHRISTENSEN, P.; THAULOW, N.; GUDMUNDSSON, H. Studies of alkali-silica reaction. Part 1: A comparison of two accelerated test methods. *Cement and Concrete Research*, v. 12, n. 5, p. 641–647, Setembro 1982.
- JENSEN, A. D.; CHATTERJI, S.; CHRISTENSEN, P.; THAULOW, N. Studies of alkali-silica reaction. Part 2: Effect of air-entrainment on expansion. *Cement and Concrete Research*, v. 14, n. 3, p. 311–314, Maio 1984.
- JONES, A. E. K.; CLARK, L. A. The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment. *Engineering Structures*, v. 20, n. 9, p. 785–791, Setembro 1998.
- KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. M.; BROWN, J. T.; MEYER-ILSE, W. Imaging of ASR gel by soft x-ray microscopy. *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 3, p. 411–421, Março 1998.
- LANE, D. S.; OZYILDIRIM, C. Preventive measures for alkali-silica reactions (binary and ternary systems). *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 8, p. 1281–1288, Agosto 1999.
- LÉGER, P.; CÔTÉ, P.; TINAWI, R. Finite element analysis of concrete swelling due to alkali aggregate reactions in dams. *Computers & Structures*, v. 60, n. 4, p. 601–611, Junho 1996.
- LEHTOLA, R.; VAZ, L. E.; VARGAS JR., E. A.; GUEDES, Q. M. Modelos numéricos para a simulação da RAA em estruturas de concreto massa. In: *Simpósio sobre Reatividade Alkali-Agregado em Estruturas de Concreto*. Goiânia, Brasil: [s.n.], 1997.
- LIANG, T.; MIN, D.; XIANHUI, L.; MINGSHU, T. A case study of two airport runways affected by alkali-carbonate reaction; Part one: evidence of deterioration and evaluation of aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 3, p. 321–328, Março 1997.
- LIANG, T.; MINGSHU, T. A case study of two airport runways affected by alkali-carbonate reaction; Part two: microstructural investigations. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 3, p. 329–336, Março 1997.
- LIANG, T.; MINGSHU, T. Correlation between reaction and expansion of alkali-carbonate reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 3, p. 470–476, Abril 1995.
- LIANG, T.; MINGSHU, T. Expansion mechanism of alkali-dolomite and alkali-magnesite reaction. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, n. 5-6, p. 361–373, Dezembro 1999.
- LUMLEY, J. S. ASR suppression by lithium compounds. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 2, p. 235–244, Fevereiro 1997.

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

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

MONTEIRO, P. J. M.; WANG, K.; SPOSITO, G.; SANTOS, M. C.; ANDRADE, W. P. Influence of mineral admixtures on the alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 12, p. 1899–1909, Dezembro 1997.

MORANVILLE-REGOURD, M. Modelling of expansion induced by ASR – new approaches. *Cement and Concrete Composites*, v. 19, n. 5-6, p. 415–425, 1997.

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

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

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

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

PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; CANTÃO, M. P.; ESMANHOTO, E.; FERREIRA, E. S.; NOGUEIRA, J. R. G.; SOUZA, G. P.; ROBERT, R.; SWINKA FILHO, V.; ELIAS, M. M.; BIONDI, J. C. Assessment and repair of hydroelectric power plant concrete dam damage after 43 years operation. In: UNITED STATES ON DAMS. *21st USSD Annual Meeting and Lecture*. Denver, Estados Unidos, 2001. v. 1, p. 733–745.

QIAN, G.; DENG, M.; TANG, M. Expansion of siliceous and dolomitic aggregates in lithium hydroxide solution. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 5, p. 763–768, Maio 2002.

QINGHAN, B.; NISHIBAYASHI, S.; XUEQUAN, W.; YOSHINO, A.; HONG, Z.; TIECHENG, W.; MINGSHU, T. Preliminary study of effect of LiNO_2 on expansion of mortars subjected to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 8, p. 1647–1654, Dezembro 1995.

RAMACHANDRAN, V. S. Alkali-aggregate expansion inhibiting admixtures. *Cement and Concrete Composites*, v. 20, n. 2-3, p. 149–161, Abril 1998.

SHAYAN, A.; DIGGINS, R.; IVANUSEC, I. Effectiveness of fly ash in preventing deleterious expansion due to alkali-aggregate reaction in normal and steam-cured concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 1, p. 153–164, Janeiro 1996.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 7, p. 1063–1072, Julho 2000.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 3, p. 341–349, Março 2002.

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

SVENSSON, S. E. Eigenstresses generated by diffusion in a spherical particle embedded in an elastic medium. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 33, n. 3, p. 211–223, 1991.

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

TURANLI, L.; SHOMGLIN, K.; OSTERTAG, C. P.; MONTEIRO, P. J. M. Reduction in alkali-silica expansion due to steel microfibers. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 5, p. 825–827, Maio 2001.

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

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

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

APÊNDICE A – USERSW e funções de normalização

Neste apêndice são apresentadas as rotinas programadas em *Fortran*® que foram utilizadas na implementação da metodologia. Estão expostas a rotina principal, em que está programada a equação constitutiva, e as funções auxiliares, que foram feitas para normalizar os campos em fatores de influência.

A.1 Rotina USERSW

```
*deck,usersw           parallel           user           pck dc

subroutine usersw (option,elem,intpt,mat,proptb,ncomp,epswe1,
x epel,e,nuxy,fluen,dfluen,tem,dtem,tofst,timvll,timvnc,usvr)

c  Argumentos de entrada:
c    option  (int,sc,in)      opção para expansão devido à RAA
c    elem    (int,sc,in)      número do elemento (label)
c    intpt   (int,sc,in)      ponto de integração do elemento
c    mat     (int,sc,in)      número de referência do material
c    proptb  (dp,ar(*),in)    tabela de materiais não-lineares
c    ncomp   (int,sc,in)      componentes de deformações (1, 4 ou 6)
c                                1 - elementos de barra
c                                4 - sólidos 2-d
c                                6 - sólidos 3-d e cascas
c    epswe1  (dp,sc,inout)    deformação total acumulada devido à RAA
c                                antes deste substep
c    epel    (dp,ar(ncomp),inout)  deformação elástica
c    e       (dp,sc,in)      módulo de elasticidade
c    nuxy    (dp,sc,in)      módulo de poisson
c    fluen   (dp,sc,in)      fluência total (comando bf ou bfe)
```

```

c      dfluen  (dp,sc,in)      incremento na fluência para este substep
c      tem     (dp,sc,in)      temperatura (comando bf ou bfe)
c      dtem    (dp,sc,in)      incremento da temperatura neste substep
c      toffst  (dp,sc,in)      offset da escala de temperatura do zero
c                                  absoluto (comando toffst)
c      timvll  (dp,sc,in)      tempo ao final deste substep
c      timvnc  (dp,sc,in)      incremento de tempo neste substep
c      usvr    (dp,ar(*),inout) variáveis de estado (user defined)
c
c  Argumentos de saída - retorno:
c      epswel  (dp,sc,inout)    deformação total acumulada devido à RAA
c                                  após este substep
c      epel    (dp,ar(ncomp),inout) deformação elástica ajustada para
c                                  incremento da deformação por RAA
c      usvr    (dp,ar(*),inout) variáveis de estado atualizadas

#include "impcor.inc"

      external erhandler

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

c  proptb(63) -> Fator de calibração da temperatura
c  proptb(64) -> Fator de calibração da porosidade
c  proptb(65) -> Fator de calibração da umidade
c  proptb(66) -> Fator de calibração da tensão
c  proptb(67) -> expansão máxima volumétrica (assintótico)
c  proptb(68) -> índice de reatividade (em unidade de tempo)
c  proptb(69) -> parâmetro relacionado ao tempo de preenchimento dos poros

c  Variáveis necessárias ao cálculo
      double precision tens(3),tx_expand,Gu,Gp,Gt,Gc(3)

c  Constantes de Lamé
      double precision lambda, mu

```

```

c Mensagem para verificar devido funcionamento
  if (intpt .eq. 1) then
    if (elem .eq. 1) then
      call erhandler('usersw',5000,2,
        x 'ANSYS,INC.- Funcao SWELL chamada devidamente.',0.0d0,' ')
    endif
  endif

c O próximo comando é verdadeiro para qualquer lei de formação
  eptot(1) = epel(1) + epswel

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

c Atribuição dos valores das constantes de Lamé
  lambda = nuxy * e / ((1. + nuxy) * (1. - 2. * nuxy))
  mu = e / (2. * (1. + nuxy))

c Calcula a tensão, considerando o concreto como um sólido elástico linear
  tens(1) = lambda * (eptot(1) + eptot(2) + eptot(3)) + 2 * mu * eptot(1)
  tens(2) = lambda * (eptot(1) + eptot(2) + eptot(3)) + 2 * mu * eptot(2)
  tens(3) = lambda * (eptot(1) + eptot(2) + eptot(3)) + 2 * mu * eptot(3)

c Chama rotinas para converter os campos em fatores de influência
c Rotina de normalização da temperatura
  call Fator_Temperatura(elem,proptb(63),Gt)

c Rotina de normalização da porosidade
  call Fator_Porosidade(elem,proptb(64),Gp)

c Rotina de normalização da umidade
  call Fator_Umidade(elem,proptb(65),Gu)

c Rotina de normalização do estado de tensões
  call Fator_Tensao(tens,proptb(66),Gc)

```

```

c Equações constitutivas da RAA
c Dependentes da temperatura, umidade, porosidade e tensões
c Primeiramente determina a taxa de expansão para o tempo atual

c Lei 1 -> Proposta por A. Pappalardo Jr. (1998)
c Modificada por este trabalho para incluir a função Heaviside
  if ((timvll - proptb(69) * Gp) .lt. 0) then
    tx_expand = 0
  else
    tx_expand = proptb(67) * proptb(68) * Gt * dsqrt(Gu) /
      x (proptb(68) * Gt + timvll - proptb(69) * Gp) ** 2
  endif

c Lei 2 -> Proposta por este trabalho
  if ((timvll - proptb(69) * Gp) .lt. 0) then
    tx_expand = 0
  else
    tx_expand = proptb(67) * exp( - (timvll - proptb(69) * Gp) /
      x (proptb(68) * Gt)) * dsqrt(Gu) / (proptb(68) * Gt)
  endif

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

c O próximo comando é verdadeiro para qualquer lei de formação
epswel = epswel + (delswl(1) + delswl(2) + delswl(3))/3

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

return
end

```

A.2 USER_UMID

```

subroutine Fator_Umidade(elem,ku,Fu)

c Rotina de conversão do campo de umidade para o fator de influência
c Argumentos:
c   elem      (int,sc,in)      número do elemento
c   ku        (dp,sc,in)      parâmetro de calibração da umidade
c   Fu        (dp,sc,out)     fator de influência da umidade

integer elem, iElem
double precision ku, Fu, Umid_Med

c iElem      -> Número do elemento lido do arquivo
c Umid_Med -> Umidade média (considerada no elemento)

c Lê a umidade média do elemento atual
open(1,FILE='UmidElem.txt',STATUS='old')

iElem = 0
do while (iElem .NE. elem)
  read(1,*) iElem, Umid_Med
end do

close(1)

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

return
end

```

A.3 USER_POROS

```

subroutine Fator_Porosidade(elem,kp,Fp)

c Rotina de conversão do campo de porosidade para o fator de influência
c Argumentos:
c   elem      (int,sc,in)      número do elemento
c   kp        (dp,sc,in)      parâmetro de calibração da porosidade
c   Fp        (dp,sc,out)     fator de influência da porosidade

integer elem, iElem
double precision kp, Fp, Umid_Med

c iElem      -> Número do elemento lido do arquivo
c Umid_Med -> Umidade média (considerada no elemento)

c Lê a umidade média do elemento atual
open(1,FILE='UmidElem.txt',STATUS='old')

iElem = 0
do while (iElem .NE. elem)
  read(1,*) iElem, Umid_Med
end do

close(1)

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

return
end

```

A.4 USER_TEMP

```

subroutine Fator_Temperatura(elem,kt,Ft)

c Rotina de conversão do campo de temperatura para o fator de influência
c Argumentos:
c   elem      (int,sc,in)      número do elemento
c   kt        (dp,sc,in)      parâmetro de calibração da temperatura
c   Ft        (dp,sc,out)     fator de influência da temperatura

integer elem, iElem
double precision kt, Ft, Temp_Med

c iElem      -> Número do elemento lido do arquivo
c Temp_Med -> Temperatura média (considerada no elemento)

c Lê a temperatura média do elemento atual
open(1,FILE='TempElem.txt',STATUS='old')

iElem = 0
do while (iElem .NE. elem)
  read(1,*) iElem, Temp_Med
end do

close(1)

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

return
end

```

A.5 USER_TENSAO

```

subroutine Fator_Tensao(tens,kc,Fc)

c Rotina de conversão do campo de tensões para o fator de influência
c   tens      (dp,ar(3),in)      tensões no elemento (em KN/m$^2$)
c   kc        (dp,sc,in)         parâmetro de calibração das tensões
c   Fc        (dp,ar(3),out)     fator de influência das tensões

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

c Lei de normalização das tensões
if (tens(1) .LT. -8000.) then
  Fc(1) = kc
else if (tens(1) .LT. -300.) then
  Fc(1) = (tens(1) + 8000.) * (1 - kc) / 7700. + kc
else
  Fc(1) = 1
end if

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

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

return
end

```

APÊNDICE B – Aplicação em APDL

B.1 Análise de Percolação

```

! *****
! Título
/TITLE,Bloco de Concreto - Analise de Percolacao

! *****
! Entra no pré-processador
/PREP7

! *****
! Comandos para definir o modelo
BLOCK,0,0.075,0,0.075,0,0.3,

LSTR,7,5
LSTR,6,8
LSTR,3,2
LSTR,4,1

FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,13
FITEM,3,-14
ASBL,2,P51X

FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,15
FITEM,3,-16
ASBL,1,P51X

```

ET,1,SOLID87

ET,2,LINK33

R,1,0.25, ,

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,KXX,1,,3e-9

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,KXX,2,,3e-9

VATT,1,1,1,0

VMESH,1

TYPE, 2

MAT, 2

REAL, 1

ESYS, 0

SECNUM,

TSHAP, LINE

FLST,2,2,1

FITEM,2,8

FITEM,2,93

E,P51X

! *****

! Sai do Pré-processador e entra no tab Solução

FINISH

/SOLU

! *****

! Cargas Hidráulicas (100 % em todo contorno)

DA,all,TEMP,1,1

```

! *****
! Determina a distribuição de umidade
/STATUS,SOLU
SOLVE

! *****
! Obtém o número do maior nó e o maior elemento da malha
*GET,MaxNo,NODE,all,NUM,MAX
*GET,MaxElem,ELEM,all,NUM,MAX

! *****
! Obtém a matriz de umidade nos nós
*DIM,UmidNo,ARRAY,MaxNo,1,1,,
*DO,i,1,MaxNo
  *GET,UmidNo(i),NODE,i,TEMP
*ENDDO

! *****
! Obtém a umidade em cada elemento e salva em arquivo
*CFOPEN,UmidElem,Txt,,

*DO,i,1,MaxElem - 1 ! 1 é o número de extensômetros
  UmidEl = 0
  *DO,j,1,10
    *GET,aux,ELEM,i,NODE,j
    UmidEl = UmidEl + UmidNo(aux)
  *ENDDO
  UmidEl = UmidEl / 10
  *VWRITE,i,UmidEl
  %d,%.8f
*ENDDO

*CFCLOS

! *****
! Deleta todos os parâmetros criados
*DEL,ALL,

```

B.2 Análise de Temperatura

```

! *****
! Título
/TITLE,Bloco de Concreto - Analise de Temperatura

! *****
! Entra no pré-processador
/PREP7

! *****
! Propriedades do Material
MP,KXX,1,2.367 ! Condutividade Térmica Isotrópica
MP,C,1,0.23     ! Calor Específico
MP,HF,1,5.6     ! Coeficiente para troca de calor por convecção
MP,KXX,2,2.367 ! Condutividade Térmica Isotrópica
MP,C,2,0.23     ! Calor Específico
MP,HF,2,5.6     ! Coeficiente para troca de calor por convecção

! *****
! Sai do Pré-processador e entra no tab Solução
FINISH
/SOLU

! *****
! Limpa todas as cargas (da análise de percolação)
LSCLEAR,ALL

! *****
! Coloca as cargas térmicas
DA,all,TEMP,38,1

! *****
! Determina a distribuição de temperatura
/STATUS,SOLU
SOLVE

```

```

! *****
! Obtém o número do maior nó da malha
*GET,MaxNo,NODE,all,NUM,MAX

! *****
! Obtém o número do maior elemento da malha
*GET,MaxElem,ELEM,all,NUM,MAX

! *****
! Cria a matriz de temperatura nos nós
*DIM,TempNo,ARRAY,MaxNo,1,1,,

! *****
! Obtém a temperatura em cada nó e guarda na matriz
*DO,i,1,MaxNo
    *GET,TempNo(i),NODE,i,TEMP
*ENDDO

! *****
! Obtém a temperatura em cada elemento e salva em arquivo
*CFOPEN,TempElem,Txt,,

*DO,i,1,MaxElem - 1 ! 1 é o número de extensômetros
    TempEl = 0
    *DO,j,1,10
        *GET,aux,ELEM,i,NODE,j
        TempEl = TempEl + TempNo(aux)
    *ENDDO
    TempEl = TempEl / 10
    *VWRITE,i,TempEl
    %d,%.8f
*ENDDO

*CFCLOSE

! *****
! Deleta todos os parâmetros
*DEL,ALL,

```

B.3 Análise de Tensões e RAA

```

! *****
! Título
/TITLE,Bloco de Concreto afetado pela RAA

! *****
! Entra no pré-processador
/PREP7

! *****
! Comandos para definir o modelo e propriedades
BLOCK,0,0.075,0,0.075,0,0.3,

LSTR,7,5
LSTR,6,8
LSTR,3,2
LSTR,4,1

FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,13
FITEM,3,-14
ASBL,2,P51X

FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,15
FITEM,3,-16
ASBL,1,P51X

ET,1,SOLID92
ET,2,LINK8
R,1,0.25, ,

MP,EX,1,2.9e7 ! Módulo de Young
MP,PRXY,1,0.2 ! Módulo de Poisson
MP,KXX,1,,2.367 ! Condutividade Térmica Isotrópica
MP,C,1,,0.23 ! Calor Específico
MP,EX,2,1 ! Módulo de Young para a barra

```

VATT,1,1,1,0

VMESH,1

TYPE, 2

MAT, 2

REAL, 1

ESYS, 0

SECNUM,

TSHAP, LINE

FLST,2,2,1

FITEM,2,8

FITEM,2,93

E,P51X

! *****

! Restrições de Apoio

DA,2,UZ,

DA,11,UZ,

DA,12,UZ,

DA,13,UZ,

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

! *****

! Define os parâmetros iniciais

E_{max} = 0.0054 ! Expansão Máxima Volumétrica (valor assintótico)

A₁ = 250 ! Constante do Material (em unidade de tempo)

t_p = 50 ! Tempo de preenchimento dos poros

k_p = 1.5 ! Fator de calibração da porosidade

k_u = 0.6 ! Fator de calibração da umidade

k_c = 0.8 ! Fator de calibração da tensão

k_t = 0.25 ! Fator de calibração da temperatura

! *****

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

TB,BISO,1,1,2,

TBTEMP,0

TBDATA,,20000,0,,,,

```

! *****
! Tabela de Swelling (a User é utilizada para chamar a USERSW)
TB,SWELL
TBDATA,72,10
TBDATA,67,Emax,A1,tp
TBDATA,63,kt,kp,ku,kc

TB,USER,1,1,72,
TBDATA,72,10

! *****
! Sai do Pré-processador e entra no tab Solução
FINISH
/SOLU

! *****
! Temperatura Inicial no elemento (vai para Usersw)
! Dados obrigatórios para o funcionamento, mesmo que não utilizados
BFV,ALL,TEMP,30
BFV,ALL,FLUE,0

! *****
! Tempo Inicial (quase zero)
TIME,1E-8

! *****
! Guarda todos os resultados de saída
OUTRES,ALL,ALL,

! *****
! Critérios de Convergência
CNVTOL,F,,,1E-6
CNVTOL,M,-1

! *****
! Resolve o STEP 1
SOLVE

```

```

! *****
! Número de Substeps, máximo e mínimo nº de substeps
NSUBST,300,3000,300    ! Delta t de 1 dia
!NSUBST,60,600,60      ! Delta t de 5 dias
!NSUBST,20,200,20      ! Delta t de 15 dias

! *****
! Tempo Final de Cálculo (unidade depende da Usersw)
TIME,300

! *****
! Temperatura e Fluências Finais no elemento (vai para Usersw)
! Dados obrigatórios para o funcionamento, mesmo que não utilizados
BFV,ALL,TEMP,40
BFV,ALL,FLUE,10

! *****
! Resolve o STEP 2
SOLVE

! *****
! Sai do tab Solução
FINISH
/POST1

! *****
! Obtem o comprimento do elemento de barra
*GET,compr,ELEM,626,LENG

! *****
! Entra no step do dia 30
SET, , ,1, , , ,31,    ! 30 dias para dt de 1 dia
!SET, , ,1, , , ,7,    ! 30 dias para dt de 5 dias
!SET, , ,1, , , ,3,    ! 30 dias para dt de 15 dias
ETABLE,EPELAXL,LEPEL,1
*GET,DMAX1,ELEM,626,ETAB,EPELAXL
DMAX1 = DMAX1*compr

```

```

! *****
! Repete para os demais steps
SET, , ,1, , , ,61, ! 60 dias para dt de 1 dia
!SET, , ,1, , , ,13, ! 60 dias para dt de 5 dias
!SET, , ,1, , , ,5, ! 60 dias para dt de 15 dias
ETABLE,EPELAXL,LEPEL,1
*GET,DMAX2,ELEM,626,ETAB,EPELAXL
DMAX2 = DMAX2*compr

SET, , ,1, , , ,91, ! 90 dias para dt de 1 dia
!SET, , ,1, , , ,19, ! 90 dias para dt de 5 dias
!SET, , ,1, , , ,7, ! 90 dias para dt de 15 dias
ETABLE,EPELAXL,LEPEL,1
*GET,DMAX3,ELEM,626,ETAB,EPELAXL
DMAX3 = DMAX3*compr

SET, , ,1, , , ,121, ! 120 dias para dt de 1 dia
!SET, , ,1, , , ,25, ! 120 dias para dt de 5 dias
!SET, , ,1, , , ,9, ! 120 dias para dt de 15 dias
ETABLE,EPELAXL,LEPEL,1
*GET,DMAX4,ELEM,626,ETAB,EPELAXL
DMAX4 = DMAX4*compr

SET, , ,1, , , ,181, ! 180 dias para dt de 1 dia
!SET, , ,1, , , ,37, ! 180 dias para dt de 5 dias
!SET, , ,1, , , ,13, ! 180 dias para dt de 15 dias
ETABLE,EPELAXL,LEPEL,1
*GET,DMAX5,ELEM,626,ETAB,EPELAXL
DMAX5 = DMAX5*compr

SET, , ,1, , , ,271, ! 270 dias para dt de 1 dia
!SET, , ,1, , , ,55, ! 270 dias para dt de 5 dias
!SET, , ,1, , , ,19, ! 270 dias para dt de 15 dias
ETABLE,EPELAXL,LEPEL,1
*GET,DMAX6,ELEM,626,ETAB,EPELAXL
DMAX6 = DMAX6*compr

```

```

! *****
! Cria o parâmetro que vai ser a função objetivo (F01)
AUX1 = ABS((0.000033-DMAX1)/0.000033)
AUX2 = ABS((0.000300-DMAX2)/0.000300)
AUX3 = ABS((0.001000-DMAX3)/0.001000)
AUX4 = ABS((0.001360-DMAX4)/0.001360)
AUX5 = ABS((0.001567-DMAX5)/0.001567)
AUX6 = ABS((0.001764-DMAX6)/0.001764)

FO_AUX1 = 1*(1+AUX1)+1*(1+AUX2)+1*(1+AUX3)
FO_AUX2 = 1*(1+AUX4)+1*(1+AUX5)+1*(1+AUX6)

FO = (FO_AUX1 + FO_AUX2)/6

! *****
! Cria o parâmetro que vai ser a função objetivo (F02)
AUX1 = ABS(0.000033-DMAX1)
AUX2 = ABS(0.000300-DMAX2)
AUX3 = ABS(0.001000-DMAX3)
AUX4 = ABS(0.001360-DMAX4)
AUX5 = ABS(0.001567-DMAX5)
AUX6 = ABS(0.001764-DMAX6)

FO = AUX1
*IF,FO,LT,AUX2,THEN FO = AUX2 *ENDIF
*IF,FO,LT,AUX3,THEN FO = AUX3 *ENDIF
*IF,FO,LT,AUX4,THEN FO = AUX4 *ENDIF
*IF,FO,LT,AUX5,THEN FO = AUX5 *ENDIF
*IF,FO,LT,AUX6,THEN FO = AUX6 *ENDIF

! *****
! Registra, em arquivo, os valores atuais das variáveis de projeto
*CFOPEN,LogOtim,Txt,,APPEND

*VWRITE,Emax,A1,to,Fp,Fu,Fc,Ft,FO
%.8f,%.8f,%.8f,%.8f,%.8f,%.8f,%.8f,%.8f

*CFCLOSE

```

B.4 Otimização

```

! *****
! Faz a análise de percolação de água no concreto
/INPUT,'Bloco_05_Percolacao','txt','','', 0

! *****
! Faz a análise de temperatura
/INPUT,'Bloco_05_Temperatura','txt','','', 0

! *****
! Retira os dados das análises anteriores da memória
FINISH
/CLEAR,START

! *****
! Entra com os dados na memória e faz a primeira análise
/INPUT,'Bloco_05_Swelling','txt','','', 0

! *****
! Entra no módulo de otimização
/OPT

! *****
! Determina o arquivo a ser otimizado
OPANL,'Bloco_05_Swelling','txt',' '

! *****
! Declara as variáveis de otimização (design variables)
OPVAR,Emax,DV,0.0025,0.0065, , ! Máxima deformação volumétrica
OPVAR,A1,DV,50,400, , ! Índice de Reatividade
OPVAR,to,DV,40,80,1.0, ! Tempo de preenchimento dos poros
!OPVAR,kp,DV,1.2,3, , ! Aciona o início do mecanismo expansivo da RAA
!OPVAR,ku,DV,0,1, , ! Regula a importância da umidade
!OPVAR,kc,DV,0,1, , ! Regula a importância das tensões
!OPVAR,kt,DV,0,1, , ! Regula a importância da temperatura

```

```

! *****
! Variáveis de estado (state variables)
OPVAR,DMAX1,SV,0,0.000040, ,
OPVAR,DMAX2,SV,0,0.000400, ,
OPVAR,DMAX3,SV,0.0008,0.0012, ,
OPVAR,DMAX4,SV,0.0012,0.0015, ,
OPVAR,DMAX5,SV,0.0015,0.0016, ,
OPVAR,DMAX6,SV,0.0017,0.0018, ,

! *****
! Função objetivo
OPVAR,F0,OBJ, , ,0.000000001,

! *****
! Escolhe o método de otimização: Subproblem Approximation Method
OPTYPE,SUBP

! *****
! Opções do método selecionado
OPSUBP,30
OPKEEP,ON

! *****
! Inicia o loop de otimização
OPEXE

! *****
! Lista os valores dos parâmetros para todos os sets calculados
OPLIST,ALL, ,0

```