



ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DO CAMPO HIGROMÉTRICO NÃO-UNIFORME NA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Rafael Corrêa Salomão

Rogério Carrazedo

rafaelsalomao@usp.br

rogcarrazedo@sc.usp.br

Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
Avenida Trabalhador São Carlense, 400, 13566-590, São Carlos, São Paulo, Brasil

Resumo. A reação álcali-sílica (RAS) é uma patologia proveniente da reação química entre os álcalis presentes na pasta de cimento e o agregado reativo em uma estrutura de concreto. É sabido que o campo de umidade exerce influência significativa no processo de expansão da RAS, afetando principalmente sua taxa de expansão e valor máximo. Usualmente considera-se que uma estrutura de concreto está totalmente sob regime constante de umidade, o que não reflete a realidade. O provimento tardio, ou de períodos não constantes de umidade, são capazes de alterar significativamente a forma que se dá a expansão por RAS e a possibilidade de modelar este comportamento é de grande valia. Neste trabalho, para a solução do campo mecânico no estado plano de deformação foi utilizado o Método dos Elementos Finitos Posicional. Para a resolução do campo higrométrico, foi empregado o Método dos Elementos Finitos convencional com uso de uma função quasi-heaviside para representar a posição relativa dos pontos de integração com relação à superfície de percolação, obtendo assim um resposta mais fiel aos casos reais. É também proposta uma alteração na equação constitutiva da taxa de expansão do concreto devido à RAS para contemplar os ciclos de secagem e molhagem e provimento tardio de umidade. Por fim são apresentados exemplos numéricos que validam a metodologia aplicada.

Palavras-chave: Concreto Massa, RAS, Percolação em Meios Porosos, Regime de Umidade Não-Uniforme, MEF, Modelo Paramétrico.

1 INTRODUÇÃO

Embora o concreto seja um material de inúmeras características favoráveis para a construção civil, este também apresenta susceptibilidade à deterioração por diversos fatores. De forma geral, o processo de degradação do concreto pode ser entendido dentro de dois grandes grupos, o da deterioração física e química. A reação álcali-sílica (RAS) se insere dentro dos fenômenos de deterioração química, dado o fato que ocorrem transformações químicas entre os compostos constituintes do concreto.

Na RAS ocorre o ataque da sílica amorfa presente no agregado constituinte do concreto pelos álcalis presentes no fluido dos poros do concreto e a formação de um gel de álcali-sílica. Este gel, por possuir propriedades higroscópicas, é capaz de absorver a água presente e ter sua estrutura cristalina expandida, promovendo variação volumétrica, perda de resistência e brusca redução no módulo de elasticidade do concreto. As obras mais afetadas, portanto, são aquelas em contato constante com a umidade, como barragens e piers. (MEHTA; MONTEIRO, 2005).

Diversos modelos numéricos e analíticos foram propostos para a satisfatória modelagem da RAS em estruturas de concreto. É possível elencar alguns modelos, principalmente quanto a forma em que a umidade é considerada.

Muitos estudos recentes fazem uso do modelo de Larive (1997) para representar a expansão por RAS. Tal modelo é expresso por uma equação regida por dois parâmetros chamados de tempo de latência (τ_l) e tempo característico (τ_c). A variação da quantidade de umidade disponível para a ocorrência da RAS altera os tempos de latência e característico, e por consequência a curva de expansão da amostra.

Também fazendo uso do modelo de Larive, há o modelo de Farage(2004), que é capaz de representar o comportamento de degradação do concreto frente as mudanças nas condições de carregamento pela mecânica do dano. Trata-se, portanto, de um modelo macroscópico de expansão do concreto. Em seu modelo, a umidade é considerada da mesma forma que em Larive (1997).

No trabalho de Pignatelli, Comi e Monteiro (2013) é desenvolvido um modelo poro-mecânico que leva em consideração duas variáveis isotrópicas internas, o dano químico e o mecânico. O dano químico provém da pressão causada pela expansão do gel de RAS, enquanto o dano mecânico descreve a degradação da resistência e rigidez pelas cargas externas. Através do cálculo da pressão oriunda da expansão do gel de álcali-sílica, é possível obter a expansão do concreto devido a RAS, como função do grau de saturação (S_w) e determinação de parâmetros através de ensaios experimentais sob diferentes condições de umidade.

Capra e Bournazel (1998) propõem um modelo para a expansão por RAS que leva em consideração fatores relevantes como temperatura, umidade, reatividade e estado de tensões. Seu modelo é basicamente o modelo de Arrhenius multiplicado por funções de tensão e umidade. Neste modelo a umidade passa a ser considerada como uma função exponencial do grau de umidade relativa H .

Pappalardo Jr. et al. (2000) apresentou seu modelo matemático para descrever a expansão promovida pela RAS. Tal modelo trata dos fatores de influência da reação (reatividade, temperatura, umidade, porosidade e tensões confinantes) através de parâmetros. A taxa de expansão é dada pela Eq. (1)

$$\dot{\varepsilon}^{raa} = \frac{\varepsilon_{vol}^{m\acute{a}x}(A_2 g_T)}{[(A_2 g_T) + (t - t_p g_p)]^2} \sqrt{g_U g_C} \quad (1)$$

em que $\varepsilon_{vol}^{m\acute{a}x}$ representa a expansão máxima volumétrica, A_2 é o tempo de estabilização do processo expansivo, g_T, g_C são os fatores de influência devidos à temperatura e tensões de confinamento respectivamente e $t_p g_p$ é o tempo requerido para o preenchimento total dos poros pelo gel. A umidade é considerada através do fator de influência g_U .

2 MODELAGEM DA RAS

O modelo adotado é o modelo paramétrico adaptado desenvolvido em Carrazedo (2004), em que a modelagem da RAS é realizada através de parâmetros que atuam sobre a estrutura. A Eq. (2) mostra a taxa da expansão por RAS, em função de parâmetros que representam os principais fatores de influência da patologia.

$$\dot{\varepsilon}_{RAA} = H(t - t_p) \varepsilon_{Vol}^{max} \left[\frac{e^{-\frac{(t-t_p)}{A_2 F_T}}}{A_2 F_T} \right] \sqrt{F_C F_M} \quad (2)$$

em que t é o tempo decorrido, t_p é o tempo de preenchimento dos poros e H é uma função Heaviside, para que a taxa de expansão somente ocorra após o preenchimento completo dos poros, F_C é o fator de confinamento das tensões, F_T é o fator de temperatura, F_M é o fator de umidade, A_2 é o índice de reatividade do concreto e ε_{Vol}^{max} é a expansão volumétrica máxima livre.

Todos os fatores de influência são correlacionados através de fatores de calibração do modelo (k_c, k_m, k_t) elucidados a seguir. A umidade é considerada através do fator de influência F_M , embora seja considerado apenas o caso de regime uniforme de umidade.

2.1 Temperatura

A temperatura influencia diretamente na reatividade da RAS. Quanto maior for a temperatura, mais rápida se dará a expansão. No modelo paramétrico a temperatura é considerada através do parâmetro F_T que altera diretamente o parâmetro A_2 . Vale notar que, quanto maior a temperatura, menor será A_2 e portanto mais rápida será a reação química.

A Fig. (1) demonstra F_T em função de k_t com valores máximos e mínimos adotados de forma indicativa.

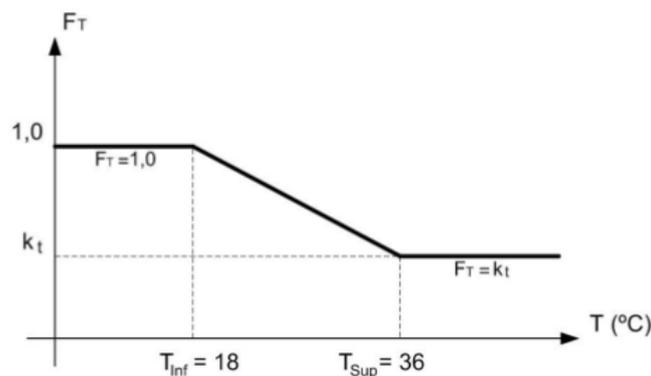


Figura 1. Parâmetro F_T em função de k_t .

Fonte: Carrazedo (2004)

2.2 Tensões Confinantes

O estado de tensões confinantes é um fator importante a se levar em consideração. Em Multon e Toutlemonde (2006) fica evidenciado o conceito de “transferência de expansão” em que nos casos de estruturas de concreto submetidas à carregamentos ou restrições, as expansões oriundas da RAS são transferidas para as direções menos comprimidas, resultando em expansões volumétricas aproximadamente constante.

Para o modelo paramétrico, as tensões atuantes são refletidas através do parâmetro F_T e sua relação com o fator de calibração k_c e σ é dada pela Fig. (2). As tensões limites são adotadas de acordo com Léger et. al (1996).

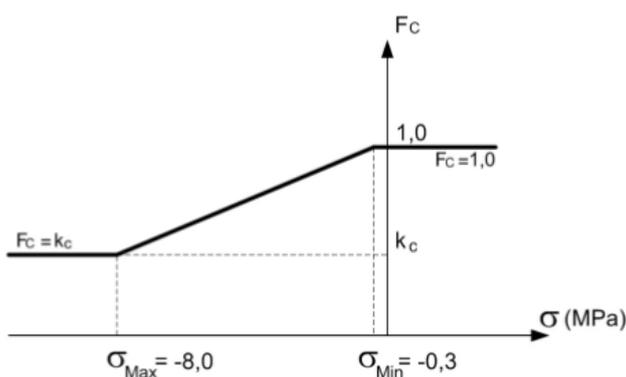


Figura 2. Gráfico para o parâmetro F_T

Fonte: Carrazedo (2004)

2.3 Umidade

A água é necessária tanto para a ocorrência da reação como para o processo de expansão do gel de álcali-silica. É indispensável a presença de água diluída nos poros do concreto para a solubilização dos íons alcalinos e formação do gel. Por fim, o gel possui propriedades higroscópicas, absorvendo a umidade ambiente e provocando o processo de inchamento do gel.

Inicialmente, a umidade é considerada através do parâmetro F_M e sua relação com a umidade ambiente e fator k_m é dada pela Fig. (3).

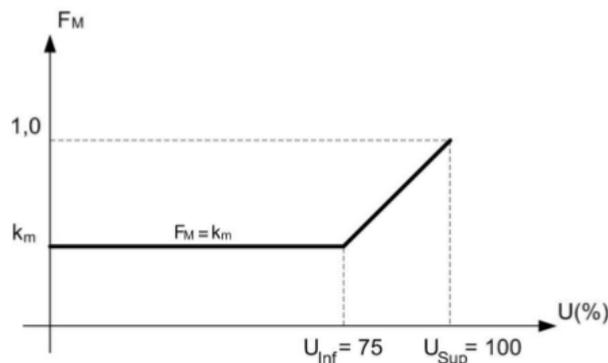


Figura 3. Gráfico do parâmetro F_M

Fonte: Carrazedo (2004)

Na grande maioria dos ensaios e resultados laboratoriais realizados, o regime de umidade é mantido constante ao longo de todo o período de tempo, o que pode não refletir a realidade das obras correntes. Segundo Multon e Toutlemonde (2010) e seu experimento da viga semi-imersa, é possível perceber que ao retardar o abastecimento de água a um corpo de concreto susceptível à RAS, seu processo de expansão é diferente se submetido integralmente em contato com água. Mais especificamente, com a atraso no fornecimento de umidade, há uma diminuição nos valores de ε_{RAA} e A_2 , provocando uma expansão de menor magnitude e taxa mais acelerada, ou seja, o gel continua se formando, porém, como não há água disponível suficiente, não há expansão.

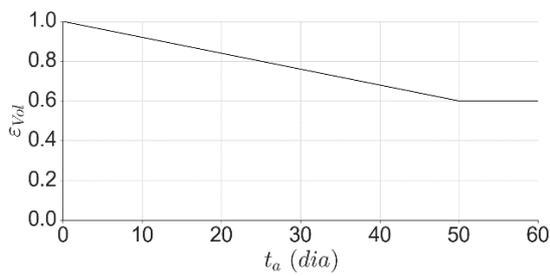
Para refletir este comportamento, é então proposta uma alteração no modelo paramétrico, aos moldes da forma em que é considerada a redução do módulo de elasticidade E em Pietruszczak (1996). Esta alteração contempla agora uma redução na expansão volumétrica final ε_{Vol}^{max} e A_2 que agora passam a ser funções de um novo parâmetro t_a chamado de tempo de atraso do fornecimento de água e do parâmetro t_f que é o tempo final de medição experimental destas reduções.

Nas Eqs. (3) e (4) são representadas as funções de decaimento da expansão e reatividade da RAS respectivamente. t_a é o tempo de atraso no fornecimento de água e t_f é o tempo final, seja do ensaio, ou do modelo a ser calibrado. Os valores $\Delta\varepsilon_{Vol}$ e ΔA_2 representam a redução da expansão e reatividade, respectivamente, em percentual. Para um valor de t_a maior que t_f não há mais decaimento nos valores de ε_{Vol} e A_2 .

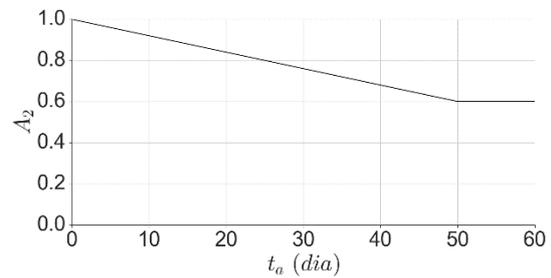
$$\varepsilon_{Vol} = \varepsilon_{Vol}^{max} \left(1 - \Delta\varepsilon_{Vol} \frac{t_a}{t_f} \right) \quad (3)$$

$$A_2 = A_2 \left(1 - \Delta A_2 \frac{t_a}{t_f} \right) \quad (4)$$

Através das Figs. (4a) e (4b) é possível perceber que as funções de expansão e reatividade são funções lineares e atingem o valor mínimo quando $t_a \geq t_f$. Para ambos os casos, os valores adotados para $\Delta\varepsilon_{Vol}$ e ΔA_2 são de 0.4 e $t_f = 50$.



(a) ε_{Vol} em função de t_a



(b) A_2 em função de t_a

Figura 4. Variações de ε_{Vol} e A_2 em função de t_a .

O modelo paramétrico agora assume a forma da Eq. (5). Agora, a variável t_a é apenas incrementada quando não há umidade suficiente para a formação de gel ou expansão do mesmo e neste caso a expansão por RAS fica estagnada. Quando há umidade suficiente para o processo, então t_a se torna fixo e a expansão volta a ocorrer, mas com os valores de ε_{Vol} e A_2 dados de acordo com as Eqs. (3) e (4).

$$\dot{\varepsilon}_{RAA} = H(t - t_p) \varepsilon_{Vol} \left[\frac{e^{-\frac{(t-t_p-t_a)}{A_2 F_T}}}{A_2 F_T} \right] \sqrt{F_C F_M} \quad (5)$$

Vale lembrar que é possível mudar e implementar para ε_{Vol} e A_2 qualquer equação, função de t_a , representando assim o comportamento do decaimento destes parâmetros com a privação no fornecimento de umidade, de acordo com ensaios experimentais ou lei desejável.

No que diz respeito aos ciclos de molhagem e secagem, Poyet et al. (2006) realizaram ensaios laboratoriais e concluíram que a presença de gel proveniente da RAS é capaz de provocar inchamento e retração adicionais em comparação com corpos de prova de concreto são. Eles argumentam que a retração excedente é causada pela perda de água do gel, o que

reduziria seu volume e por consequência a pressão exercida nos poros do concreto. Tal retração adicional estaria na ordem de 0.04%.

Entretanto, em Multon e Toutlemonde (2010), também foram realizados ensaios similares para averiguar o comportamento do concreto sob efeito da RAS quando submetido à ciclos de molhagem e secagem. A retração por secagem ficou na ordem de 0.05% e os resultados das amostras com RAS foram comparados com amostras sem a patologia. Dos resultados, a variação de massa e deformação entre as amostras foram da mesma magnitude. A cinética e amplitude da deformação por retração foi exatamente a mesma não importando a extensão do dano causado pela RAS e direção de tomada das medidas. A fissuração provocada pela RAS não alterou os valores últimos de retração e a deformação devida ao inchamento do gel permanece irreversível. Por fim, a deformação aparenta ser acumulativa e permanente com o fornecimento de água.

Neste trabalho foi adotado para o modelo os resultados e conclusões obtidos em Multon e Toutlemonde (2010). Portanto, não há retração e redução nos valores de deformação para o modelo de expansão para a RAS quando submetido à secagem. O fenômeno de retração é devido, exclusivamente, à pasta de cimento e agregados. A interrupção no fornecimento de água e secagem causam apenas uma interrupção no processo de expansão do gel.

3 MODELO HIGROMECAÂNICO

A seguir serão apresentados as formulações dos modelos higrométrico, mecânico e como ocorre o acoplamento entre os mesmos.

3.1 Modelo Higrométrico

O problema higrométrico se trata de encontrar a superfície freática livre em um meio poroso. Primeiramente, define-se o potencial hidráulico ϕ como:

$$\phi = \frac{p}{\gamma} + z \quad (6)$$

com p sendo a pressão hidrostática, γ a densidade específica do fluido e z a altura do ponto analisado em relação ao datum, uma altura de referência.

O escoamento do fluido deverá obedecer a lei de Darcy, dada na Eq. (7), ao longo de todo o domínio.

$$Q = -KA \frac{\phi_2 - \phi_1}{l_2 - l_1} \quad (7)$$

sendo Q o fluxo do fluido, K é a permeabilidade do meio, $\phi_2 - \phi_1$ é a diferença de potencial hidráulico entre os pontos de saída e entrada e $l_2 - l_1$ é a distância entre os dois pontos.

Partindo da Eq. (7), fazendo-se q o fluxo específico e generalizando para todas as direções é possível obter a Eq. (8):

$$q = -K\nabla\phi \quad (8)$$

Fazendo uso da equação de continuidade para fluxo estacionário, que deve ser válida em todo o domínio do problema, obtém-se a Eq. (9):

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = \text{div}\mathbf{q} = 0 \quad (9)$$

Por fim, juntando-se a Eq. (8) com a Eq. (9), é obtida a equação de Laplace para o campo higrométrico:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (10)$$

As condições de contorno do problema de percolação em meios porosos assumem a seguinte forma, expressada nas Eqs. (11) a (15) e representada na Fig. (5).

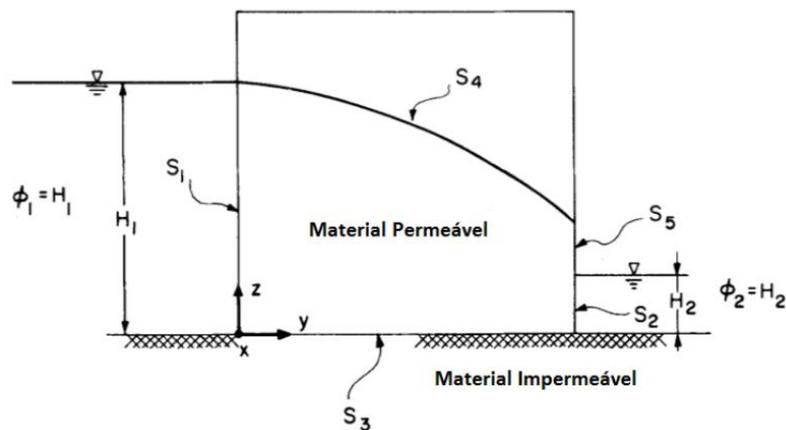


Figura 5. Condições de contorno num problema de percolação em meios porosos.

Fonte: Adaptado de Bathe e Koshgoftaar (1979)

$$\phi = \phi_1 \text{ em } S_1 \quad (11)$$

$$\phi = \phi_2 \text{ em } S_2 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \text{ em } S_3 \quad (13)$$

$$\begin{cases} \phi = z \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \end{cases} \text{ em } S_4 \quad (14)$$

$$\phi = z \text{ em } S_5 \quad (15)$$

Na modelagem do problema higrométrico foi utilizado o algoritmo desenvolvido por Bathe e Koshgoftaar (1979). Embora tal algoritmo possua desvantagens e falhas como dependência de malha, problemas de convergência e processo não linear na busca de solução, o resultado é bom o suficiente para este trabalho.

Para contornar algumas de suas limitações, foi também utilizado uma função quasi-heaviside, como descrito em Zheng (2009), no momento de levar em consideração a permeabilidade de elementos que se encontrem acima da linha de percolação. Tal função é expressa na Eq. (16) e representada na Fig. (6). Desta forma é possível levar em consideração elementos finitos que são parcialmente atravessados pela superfície freática e garantir melhor estabilidade para alcançar a convergência.

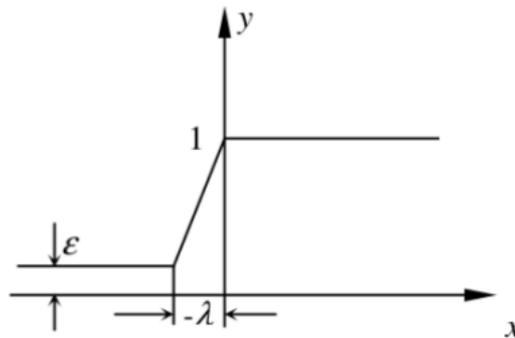


Figura 6. Representação da função quasi-heaviside.

Fonte: Zhang (2009)

$$H_\varepsilon^\lambda = \begin{cases} 1 & \text{para } x \geq 0 \\ \frac{1-\varepsilon}{\lambda}x + 1 & \text{para } -\lambda < x < 0 \\ \varepsilon & \text{para } x \leq -\lambda \end{cases} \quad (16)$$

Para o acoplamento entre o modelo higrométrico e o mecânico, realiza-se o cálculo da superfície de percolação para cada passo de tempo. A informação de quais pontos de integração estão acima ou abaixo da superfície freática irá alimentar o modelo mecânico, onde será realizada a expansão por RAS de acordo com o modelo adotado.

3.2 Modelo Mecânico

A solução do problema mecânico foi realizada pelo método dos elementos finitos posicional. Sua formulação já foi descrita em diversos artigos, sendo alguns deles Coda (2003), Carrazedo e Coda (2010), Coda e Paccola (2011), Pascon e Coda (2015) e Nogueira, Paccola e Coda (2016). A seguir é feita uma breve apresentação da formulação e de suas considerações.

Nesta pesquisa foram utilizados elementos finitos planos triangulares de 10 nós, com 7 pontos de integração de Hammer, como representado na Fig. (7). Considera-se uma função f chamada de função mudança de configuração, que faz a alteração de uma configuração inicial para uma atual de um sólido. Conjuntamente existe o seu gradiente, denominado como \mathbf{A} .

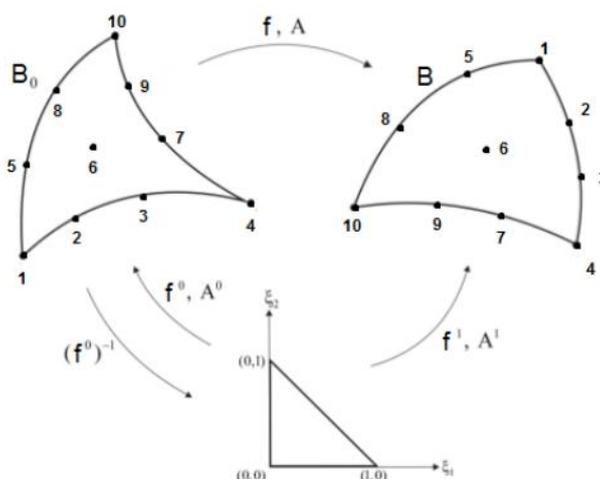


Figura 7. Função mudança de configuração e seu gradiente.

Fonte: Adaptado de Sampaio (2014)

O tensor de deformação utilizado é o tensor de Green-Lagrange, definido na Eq. (17)

$$\mathbf{E}_{\text{elastico}} = \frac{1}{2}(\mathbf{A}^T \mathbf{A} - \mathbf{I}) \quad (17)$$

Foi adotado uma composição aditiva entre as deformações por RAS e elástica, ao se considerar que em estruturas de concreto as deformações são predominantemente de pequena magnitude. Desta forma a deformação total é dada pela Eq. (18)

$$\mathbf{E}_{\text{total}} = \mathbf{E}_{\text{Elastico}} + \mathbf{E}_{\text{RAS}} \quad (18)$$

A lei constitutiva utilizada é a lei de Saint-Venant-Kirchhoff e sua energia específica está definida na Eq. (19). Para o estado plano de deformação, a energia específica de Saint-Venant-Kirchhoff assume a forma da Eq. (20):

$$u_e = \frac{1}{2} \mathbf{E} : \mathbf{D} : \mathbf{E} \quad (19)$$

$$u_e^{SVK} = \frac{1}{2} [(1 - \nu)K(E_{11}^2 + E_{22}^2) + 2\nu K(E_{11}E_{22}) + 2G(E_{12}^2 + E_{21}^2)] \quad (20)$$

com K e G definidos nas Eqs. (21) e (22).

$$K = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (21)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (22)$$

Por fim, pelo princípio da energia potencial total estacionária, a configuração final é atingida através da minimização da energia do sólido, assim definido pelas Eqs. (23) e (24), fazendo-se uso do algoritmo de Newton-Raphson.

$$\Pi = U_e + P \quad (22)$$

em que Π é a energia total do sólido, U_e é a energia interna de deformação e P é o trabalho realizado pelas forças externas.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \vec{Y}} = \vec{F}_{int} - \vec{F}_{ext} = 0 \quad (24)$$

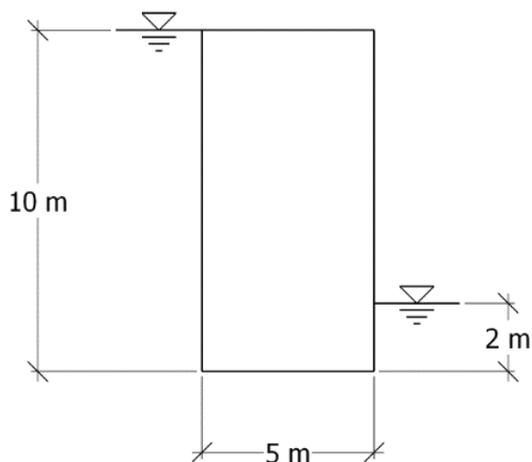
em que \vec{Y} é o vetor de posições nodais, \vec{F}_{int} é o vetor de forças internas e \vec{F}_{ext} é o vetor de forças externas.

4 EXEMPLOS NUMÉRICOS

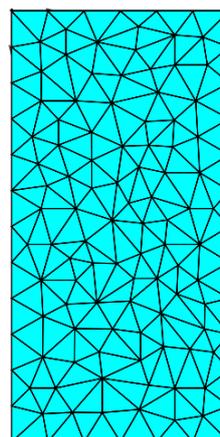
Seguem-se alguns exemplos numéricos, demonstrando o funcionamento de diversos aspectos do algoritmo desenvolvido.

4.1 Validação da Superfície Freática

Para validar o campo higrométrico, decidiu-se reproduzir o exemplo de uma barragem retangular encontrada em Borja e Kishnani (1991). Trata-se de uma barragem de altura 10 m e largura 5 m, com nível d'água à montante de 10 m e a jusante de 2 m e sua base é considerada impermeável. A representação do problema e sua malha de elementos finitos é dada pela Fig. (8). Para a malha foram utilizados 218 elementos finitos e 1036 nós.



(a) Geometria da barragem retangular



(b) Malha de elementos finitos para a barragem retangular.

Figura 8. Barragem retangular e a sua respectiva malha.

A Fig. (9) mostra a superfície freática de percolação calculada.

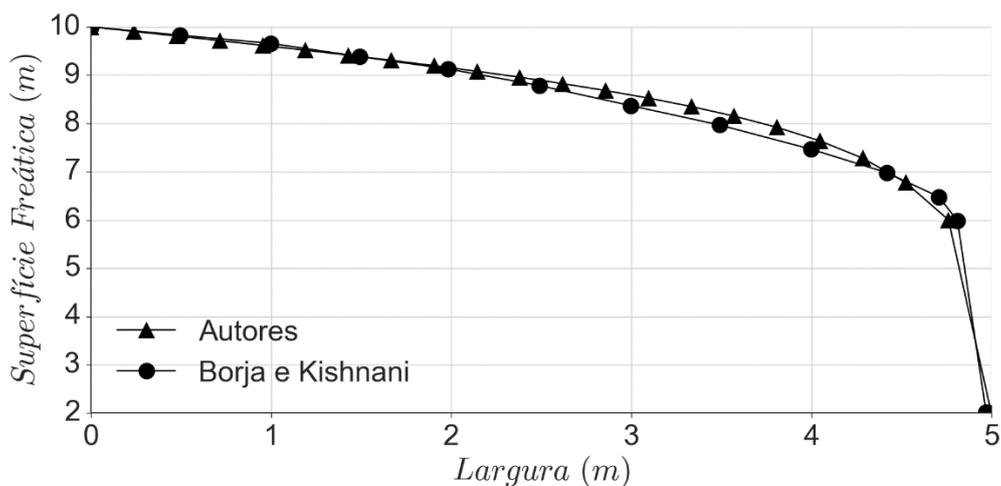


Figura 9. Superfície de percolação em meio poroso.

Os resultados estão coerentes de acordo com os obtidos através do método de Borja e Kishnani (1991). Percebe-se que a curva da superfície freática obedece a condição de contorno que é o nível de 2 m à jusante.

4.2 Validação do Modelo de Umidade Tardia

Para validar a alteração do modelo paramétrico para contemplar o provimento de umidade tardia, foi realizado um exemplo numérico do ensaio realizado em Multon e Toutlemonde (2010). Neste ensaio foram realizados corpos de prova cilíndricos com 28 cm de altura por 14

cm de diâmetro e separados em dois grupos. O primeiro grupo foi mantido com umidade relativa em 100% todo o período, caracterizando assim o caso de umidade constante desde o tempo inicial. O segundo grupo foi mantido selado com alumínio e exposto à umidade somente após 676 dias. Neste trabalho foi simulado o mesmo ensaio e foram tomadas as medidas na meia altura do corpo de prova. Foi realizada a calibração do modelo segundo a curva de expansão do primeiro grupo e calibração dos parâmetros t_f , $\Delta\varepsilon_{Vol}$ e ΔA_2 . As curvas de expansão experimental e do modelo paramétrico são dadas na Fig. (10). Foi desconsiderada a deformação inicial para o caso do provimento tardio de umidade, pois não é garantia de que seja proveniente da RAS, ou ainda, que o isolamento por alumínio seja perfeito, permitindo contato com a umidade. Percebe-se que o modelo atende suficientemente bem aos resultados experimentais, tanto do primeiro caso quanto do caso de provimento tardio de umidade.

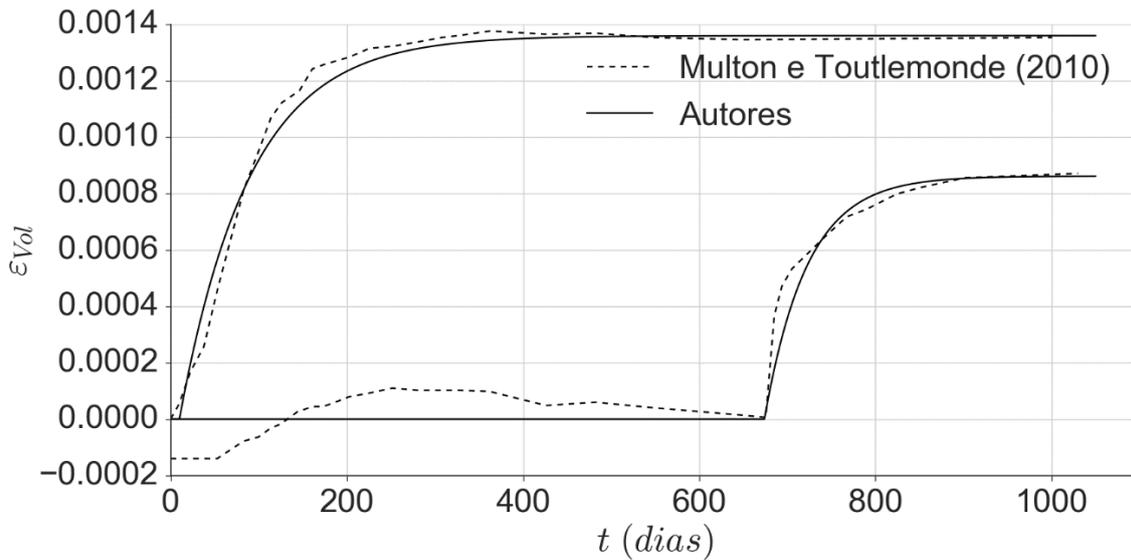
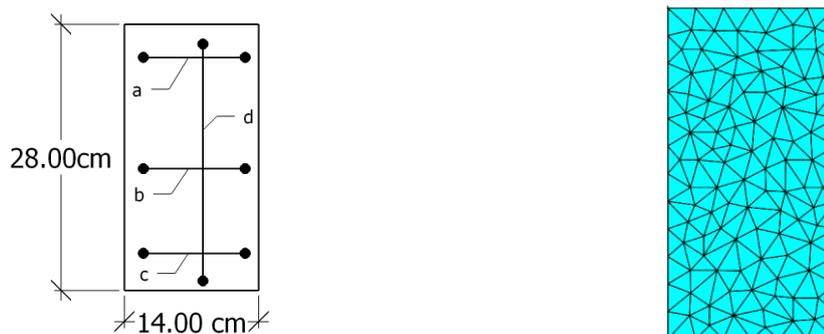


Figura 10. Curvas de expansão experimental e do modelo paramétrico.

Os valores obtidos para o modelo paramétrico são $\varepsilon_{Vol}^{Max} = 0.00137$, $\Delta\varepsilon_{Vol}^{Max} = 0.37$, $A_2 = 400.0$ dias, $\Delta A_2 = 0.4$, $t_f = 676$ dias, $t_p = 10$ dias, $k_c = 1.0$, $k_t = 0.2$ e $k_m = 0.0$.

4.3 Validação da RAS em Regime de Umidade Variável

Pretende-se validar o modelo quanto aos casos de umidade variável e ciclos de molhagem e secagem. Para tanto foi realizado um exemplo que consiste num corpo de prova de concreto de 28 cm x 14 cm submetido à diversos níveis de umidade ao longo do tempo. Dividiu-se sua altura em 3 segmentos iguais e foram tomadas medidas transversais na meia altura de cada segmento. A geometria do problema e sua respectiva malha é dada na Fig. (11).



(a) Geometria do exemplo, posição dos medidores de deformação e respectiva nomenclatura.

(b) Malha do corpo de prova. Para o exemplo, foi considerado o sólido como apoiado em $y = 0$.

Figura 11. Descrição do exemplo, com sua geometria e respectiva malha de elementos finitos.

Para a modelagem, foi empregado um concreto com módulo de elasticidade de 20GPa e Poisson de 0.2. Os dados do modelo de RAS são $\varepsilon_{Vol}^{Max} = 0.00137$, $\Delta\varepsilon_{Vol}^{Max} = 0.37$, $A_2 = 400.0$ dias, $\Delta A_2 = 0.4$, $t_f = 676$ dias, $t_p = 10$ dias, $k_c = 1.0$, $k_t = 0.2$, $k_m = 0.0$. Foram utilizados 216 elementos e 1027 nós.

Na Fig. (12) são demonstrados 3 casos típicos de regime não uniforme de umidade. Primeiramente têm-se a curva de umidade permanente, demonstrada pelo extensômetro (c), sendo a mesma curva de expansão encontrada em Multon e Toutlemonde (2010). Seguidamente, têm-se a curva que representa o caso em que somente houve fornecimento de umidade após 676 dias, representada pelo extensômetro (a). É possível perceber que a expansão final se deu num valor significativamente inferior à primeira curva e esta ocorreu de forma mais aguda. Por fim, a terceira curva (b), de umidade intermitente, representa a situação de ciclos de molhagem e secagem do concreto. O período de interrupção no fornecimento de umidade suficiente para a RAS provoca uma interrupção no processo de expansão, incrementa o valor de t_a e provoca uma redução nos valores finais de ε_{Vol} e A_2 . A curva (d) mostra o valor da deformação vertical ao longo de todo o corpo de prova. É possível perceber que o valor final é inferior ao valor máximo da expansão livre, devido ao fato de parte do concreto não ter sido exposta à umidade permanentemente.

Na mesma figura é possível perceber as condições de contorno de umidade em cada intervalo de tempo e o deslocamento na direção x do sólido ao fim deste intervalo. Entre $0 < t \leq 50$ há um processo de expansão tanto da parte inferior quanto da parte média, enquanto a parte superior permanece inalterada. No intervalo de $50 < t \leq 400$ há interrupção de fornecimento de umidade na parte média, o que causa interrupção no seu processo de expansão e incremento no valor de t_a do modelo. Em $400 < t \leq 676$ há o retorno de umidade para a condição inicial e o extensômetro (b) retorna a registrar deformações, entretanto, pelo fato de ter sido privado de umidade, este não chega a atingir o valor máximo de expansão volumétrica. Por fim, para $t > 676$, todo o corpo de concreto se encontra submerso e finalmente a parte superior começa a expandir. É justamente esta parte que registra o menor nível de deformação.

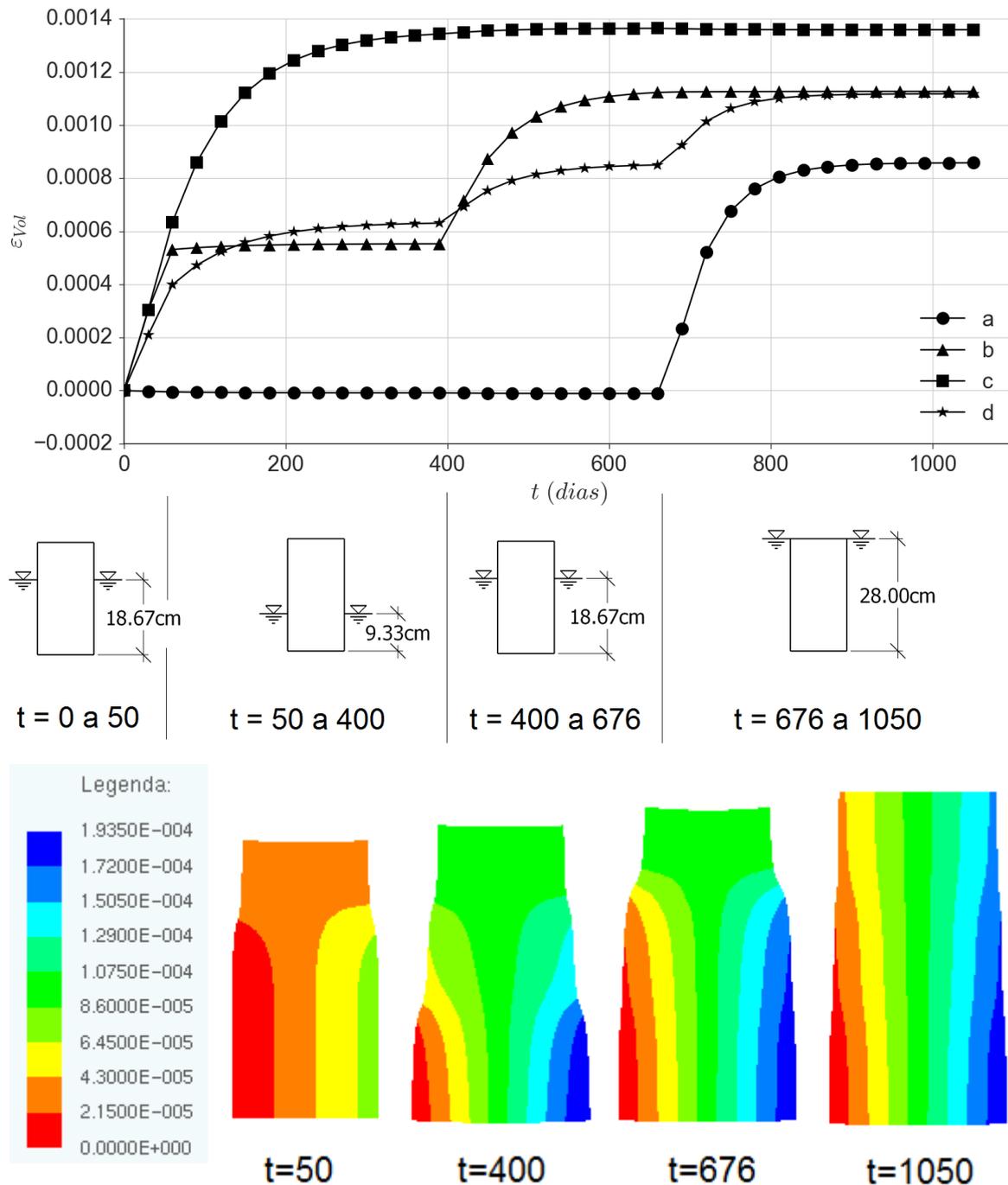


Figura 12. Curva de expansão numérica ao longo do tempo e deslocamento em x (m).

4.4 Barragem do tipo Pine Flat com Variação do Nível d'Água.

Usou-se como exemplo a barragem encontrada em Carrazedo, Sanches e Lacerda (2014) mas agora também levando em consideração a variação do nível d'água à montante. Na Fig. (13) está representada a geometria da barragem junto com o posicionamento dos medidores de deformação, totalizando 7 e sua respectiva malha de elementos finitos. Foram usados 3 medidores horizontais (*a*, *b* e *c*) e mais 4 medidores verticais (*d*, *e*, *f* e *g*). O nível d'água máximo à montante é de 70 m e mínimo de 20 m, enquanto o nível à jusante foi mantido constante em 10 m. O concreto possui um módulo de elasticidade de 20GPa e Poisson de 0.2. Para o modelo

de RAS foram empregados os seguintes parâmetros: $\varepsilon_{Vol}^{Max} = 0.001737$, $A_2 = 250.989$, $t_p = 52$ dias, $t_f = 200$, $\Delta\varepsilon_{Vol} = 0.4$, $\Delta A_2 = 0.4$, $k_m = 0.0$, $k_c = 1.0$ e $k_t = 0.2$. Foi considerada sua base como engastada e tempo máximo de 500 dias. Foram utilizados 285 elementos e 1366 nós.

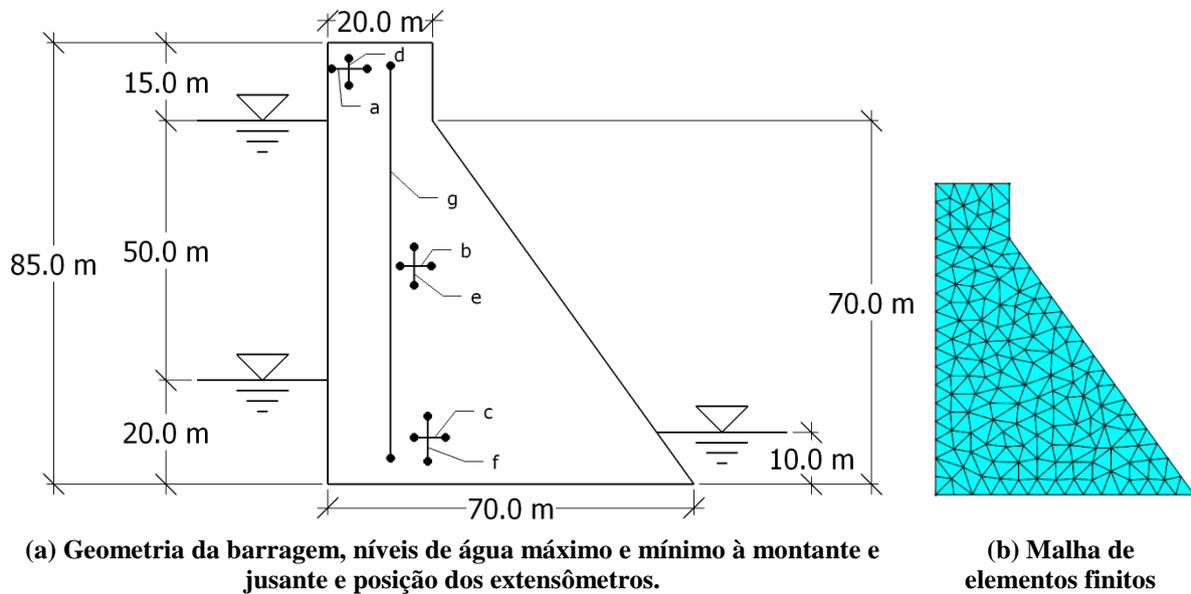


Figura 13. Geometria do problema e malha empregada.

A Fig. (14) mostra os deslocamentos nas direções x e y, respectivamente, em metros.

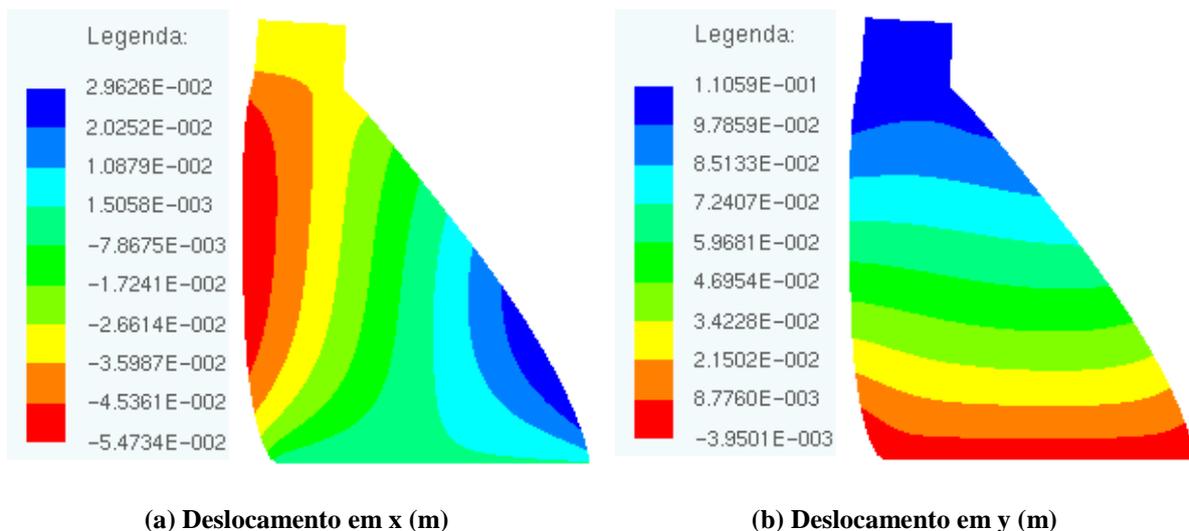


Figura 14. Deslocamentos da estrutura.

O nível d'água à montante obedece a curva senoidal da Fig. (15).

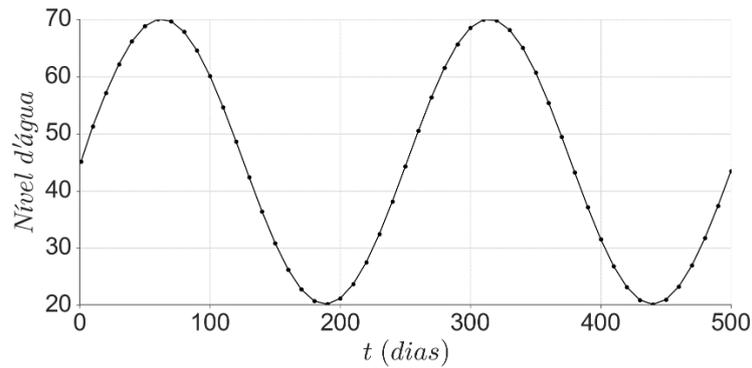


Figura 15. Nível d'água da barragem

As Figs. (16) e (17) mostram as curvas de deformação dos medidores horizontais e verticais respectivamente.

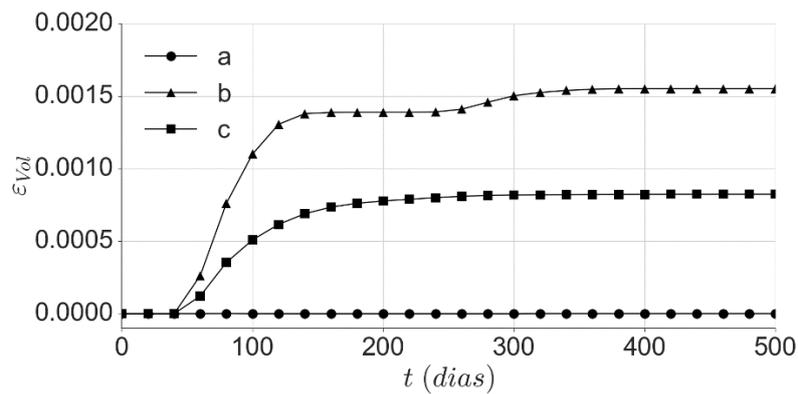


Figura 16. Deformação dos medidores horizontais.

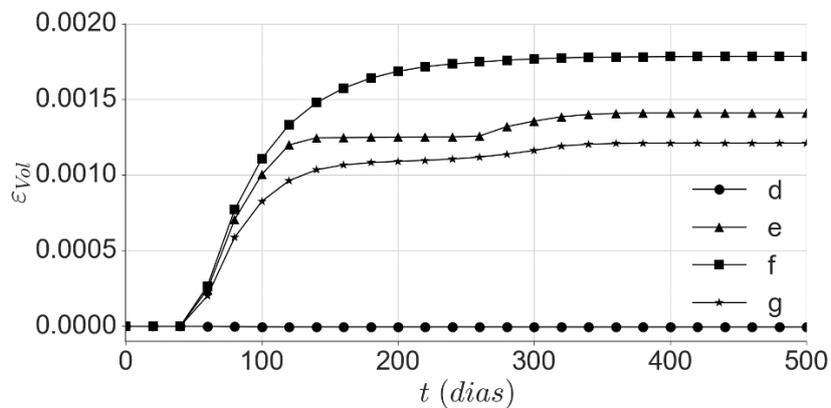


Figura 17. Deformação dos medidores verticais.

É possível perceber que a influência da variação do nível d'água afeta não apenas o valor final de expansão por RAS, mas também o seu comportamento. Em períodos de baixo nível, há uma redução na taxa de expansão, que volta a subir com a subida do nível de água do reservatório. Dos medidores, percebe-se que os medidores (a) e (d), que estiveram sempre acima da superfície freática, não registraram deformações, enquanto que os medidores (c) e (f), por estarem sempre submersos, registraram contínua expansão. Atribui-se o fato de (c) não registrar a maior expansão dentre os medidores horizontais por estar localizado próximo da base engastada. Maior diferença no comportamento é perceptível nos medidores à meia altura, região em que há mudança frequente no nível de água.

5 CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um algoritmo para o cálculo da superfície livre de percolação em meios porosos fazendo uso de malha fixa de elementos finitos, com precisão suficiente para os casos estudados. Posteriormente foi feito o acoplamento com um algoritmo para a resolução do problema mecânico e utilizado o modelo paramétrico de Carrazedo (2004) para a expansão da RAS. O modelo se mostrou satisfatório para a modelagem do comportamento macroscópico do concreto. Foi possível alterar o modelo originalmente proposto para contemplar ciclos de molhagem e secagem e regimes não uniformes de umidade, representando o comportamento esperado para o caso de provimento tardio de umidade. Foi possível representar numericamente a equação proposta e por fim, a modelagem de uma barragem de gravidade de concreto submetida a variação no nível de água a montante. Os resultados obtidos mostram que o comportamento da deformação pode se tornar complexo numa estrutura de concreto quando submetida a RAS e ciclos de umidade não uniformes.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro da CAPES que permitiram o desenvolvimento deste trabalho. Ao Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/SET.

REFERENCES

- BATHE, K.-J.; KHOSHGOFTAAR, M. R. Finite element free surface seepage analysis without mesh iteration. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 3, pp. 13–22, 1979.
- BORJA, R. I; KISHNANI, S. S. On the solution of elliptic free-boundary problems via Newton's method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 88, pp. 341–361, 1991.
- CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P. Modeling of induced mechanical effects of alkali aggregate reactions. *Cement and Concrete Research*, v. 28, pp. 251–260, 1998.
- CARRAZEDO, R. *Modelagem numérica da expansão do concreto devido a reação Álcali-Agregado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- CARRAZEDO, R.; CODA, H. B. Alternative positional FEM applied to thermomechanical impact of truss structures. *Finite Element in Analysis and Design*, v. 46, pp. 1008–1016, 2004.
- CARRAZEDO, R.; LACERDA, L. A. A Parametric Model Discussion For The Concrete Expansion Due to AAR. *Proceedings of 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, 2004.

- CARRAZEDO, R.; SANCHES, R. A. K.; LACERDA, L. A. Numerical Modeling of Orthotropic Concrete Expansion due to Alkali-Aggregate Reaction with a Parametric Model. *10th World Congress on Computational Mechanics*, 2012.
- CODA, H. B. An exact FEM geometric non-linear analysis of frames based on position description. *17th International Congress of Mechanical Engineering*, Novembro, São Paulo, SP, 2003.
- CODA, H. B.; PACCOLA, R. R. A FEM procedure based on positions and unconstrained vectors applied to non-linear dynamic of 3D frames. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 47, pp. 319–333, 2011.
- FARAGE, M. C. R.; ALVES, J. L. D.; FAIRBAIN, E. M. R. Macroscopic model of concrete subjected to alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 34, pp. 495–505, 2004.
- LARIVE, C. *Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques*. 335 p. Tese (Doutorado) — l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1997.
- LÉGER, P.; COTÉ, P.; TINAWI, R. Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams. *Computers and Structures*, v.60, pp. 601–611, 1996.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. 3. ed. McGraw-Hill Education, 2005.
- MULTON, S.; TOUTLEMONDE, F. Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions. *Cement and Concrete Research*, v. 36, pp. 912–920, 2006.
- MULTON, S.; TOUTLEMONDE, F. Effect of moisture conditions and transfers on alkali silica reaction damaged structures. *Cement and Concrete Research*, v. 40, pp. 924–934, 2010.
- NOGUEIRA, G. V.; PACCOLA, R. R.; CODA, H. B. A positional Unconstrained Vector Layerwise (UVLWT) FEM formulation for laminated frame element modeling. *Composite Structures*, v. 148, pp. 97–112, 2016.
- PAPPALARDO, A.; PAULETTI, R. M. O.; PIMENTA, P. M. Simulação numérica da reação álcali-agregado em barragens de concreto. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, v. 1, pp. 181–199, 2000.
- PASCON, J. P.; CODA, H. B. Large deformation analysis of functionally graded elastoplastic materials via solid tetrahedral finite elements. *Computers and Structures*, v. 146, pp. 59–75, 2015.
- PIETRUSZCZAK, S. On the mechanical behavior of concrete subjected to alkali-aggregate reaction. *Computers & Structures*, v. 58, pp. 1093–1097, 1996.
- PIGNATELLI, R.; COMI, C.; MONTEIRO, P. J. M. A coupled mechanical and chemical damage model for concrete affected by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 53, pp. 196–210, 2013.
- POYET, S. et al. Influence of water on alkali-silica reaction: experimental study and numerical simulation. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, v. 18, pp. 588–596, 2006.
- ZHENG, H.; DAI, H. C.; LIU, D. F. A variational inequality formulation for unconfined seepage problems in porous media. *Applied Mathematical Modelling*, v. 33, p. 437–450, 2009.