

Estudo Experimental e Numérico da Evolução da Tensão Horizontal em Amostras Sintéticas Durante Dissolução

Cecília Maria Mota Silva Lins 1

Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Recife, Brasil, cecilia.lins@gmail.com

Analice Lima 2

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Brasil, analicelima@hotmail.com

Leonardo José do Nascimento Guimarães 3

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Brasil, leonardo@ufpe.br

Edil Mota Lins

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, edileml@outlook.com

Katia Botelho Torres Galindo

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, katiabotelho4@gmail.com

RESUMO: A recente evolução das técnicas de ensaios de laboratório e campo, aliada ao avanço dos métodos computacionais em engenharia, permite a incorporação nas simulações numéricas de novos parâmetros e equações a fim de reproduzir o comportamento de solos e rochas de forma mais restrita. Neste sentido, a presente pesquisa teve como objetivo investigar através de estudos experimentais e numéricos a evolução da tensão horizontal e da deformação do meio poroso sintético durante o processo de dissolução dos minerais utilizando uma célula edométrica modificada, a fim de representar e entender o fenômeno da compactação induzida quimicamente e seu impacto no comportamento geomecânicos e geoquímico do meio poroso. Para alcançar tais objetivos, ensaios com um meio poroso sintético (misturas de esferas de vidro e NaCl) foram realizados empregando a célula edométrica desenvolvida nesta pesquisa. As amostras foram carregadas a uma tensão vertical constante e exposta a um fluido reativo com a finalidade de dissolver a cimentação do meio poroso sintético. A partir dos resultados experimentais foi verificado que com a dissolução total dos minerais a tensão horizontal sofre uma queda brusca no início do processo e em seguida aumenta gradativamente, sendo observado também deformações volumétrica de até 18%. Os resultados experimentais foram empregados na simulação numérica utilizando o modelo implementado por Silva (2012), adotando o BBM (Barcelona Modelo Basic) e o modelo desenvolvido por Castellanza e Nova (2004) para descrever deformações plásticas devido ao efeito químico. Durante a dissolução do NaCl, a simulação numérica conseguiu representar a queda acentuada da deformação do meio poroso sintético. O modelo também foi capaz de reproduzir as alterações da tensão horizontal efetiva observada nos experimentos. Desta forma, uma satisfatória relação entre os dados experimentais e numéricos foram alcançados.

PALAVRAS-CHAVE: Célula edométrica, Dissolução, Tensão horizontal, Simulação numérica.

1 INTRODUÇÃO

A recente evolução das técnicas de ensaios de laboratório e campo, onde podem ser

executadas medições simultâneas de variáveis de diferentes naturezas (térmicas, hidráulicas, mecânicas e químicas) em um mesmo experimento, aliada ao avanço dos métodos

computacionais em engenharia, permite a incorporação nas simulações numéricas de novos parâmetros e equações a fim de reproduzir o comportamento de solos e rochas de forma mais restrita. Na engenharia geotécnica, tais modelos estão principalmente relacionados aos efeitos da percolação em meio não saturado e as consequências das ações químicas sobre os meios porosos, onde a sucção (matricial e osmótica) e concentrações químicas são incluídas como variáveis de estado do problema mecânico (ALONSO *et al.*, 1990; CASTELLANZA E NOVA, 2004; GENS E NOVA, 1993; GUIMARÃES *et al.*, 2013).

Adicionalmente, a injeção e a extração de fluidos pode causar dissolução do mineral, alterações de pressão, temperatura e saturação que afetam o estado de tensão, resultando em deformações na rocha reservatório, bem como alterações da permeabilidade e porosidade do meio poroso. Portanto, isto é um problema acoplado onde o fluxo de fluido na rocha reservatório e o comportamento geomecânicos e geoquímico da rocha estão correlacionados (GUIMARÃES *et al.*, 2009).

Desta forma, a dissolução química vem sendo estudada para explicar os processos de intemperismo químico de rochas (natural ou artificial) como resultado de processos geológicos ou de engenharia, tais como a estimulação de reservatórios de petróleo, degradação do mineral, sequestro geológico de dióxido de carbono, diagênese e dissolução/formação de hidratos (CHEN *et al.*, 2009). A dissolução química tem como consequências a alteração na porosidade e na permeabilidade ou até mesmo a compactação induzida quimicamente do reservatório e o decréscimo da resistência ao cisalhamento.

Consequentemente, torna-se fundamental a análise dos efeitos geomecânicos na deformação de rochas e solos induzidas por processos de dissolução química, sendo o conhecimento do estado de tensão da rocha e das relações de tensões (k_0) um importante parâmetro nesta análise, e essencial para muitas aplicações na Engenharia Civil, de Petróleo e de Minas.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é investigar a evolução das tensões horizontais e

da deformação do meio poroso durante o processo de dissolução química utilizando uma célula edométrica especialmente construída para estudar os efeitos geomecânicos devido à injeção de fluidos reativos. Além disso, os resultados experimentais foram empregados na simulação numérica utilizando o modelo implementado por Silva (2012) e o programa *in house* CODE_BRGIHT.

2 EQUIPAMENTO E PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Célula Edométrica Modificada

A Figura 1 apresenta o esquema da célula edométrica modificada utilizada para realizar os ensaios com o meio poroso sintético. O equipamento foi desenvolvido e instrumentado na Universidade Federal de Pernambuco/Brasil e na Universidad Politécnica de Cataluña/Espanha com base em especificações definidas por Castellanza & Nova (2004), sendo projetada especificamente para medir as tensões horizontais.

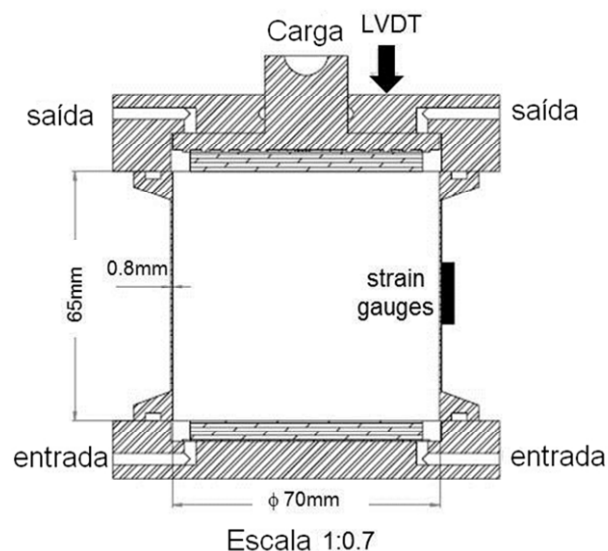


Figura 1. Esquema da célula edométrica modificada.

A célula edométrica modificada foi constituída por uma liga de alumínio-bronze sendo composta por um anel de 70mm de diâmetro, 65mm de altura, 0,8mm de espessura e válvulas de entrada e saída para percolação do fluido localizadas na base e no topo da célula. É

importante salientar que este anel, com uma espessura muito fina, permite uma deformação horizontal muito pequena, assegurando com isto uma condição quase-edométrica, mesmo com deformação lateral. Desta forma, é possível obter a tensão horizontal através da medição da deformação da parede do anel usando os *strain-gauges*, devidamente calibrados para leitura desta tensão.

Para realização dos ensaios, a amostra foi colocada no interior do anel entre duas pedras porosas, sendo todo o conjunto fixado por tampas de topo e de fundo. A entrada e saída do fluido reativo são realizadas a partir de válvulas localizadas nas extremidades da célula. Os deslocamentos verticais e a tensão horizontal foram medidos pelo LVDT e pelo *strain-gauges*, respectivamente.

2.2 Programa Experimental

Os ensaios experimentais foram realizados com amostras sintéticas com a finalidade de representar e compreender os fenômenos químicos envolvidos durante os processos de dissolução e o impacto sobre as propriedades hidráulicas e mecânicas do meio poroso, simulando assim os efeitos químicos sobre as rochas reservatório.

As amostras utilizadas nos ensaios consistiram de uma mistura de esferas de vidro, com 2mm de diâmetro e de cloreto de sódio (NaCl). Diferentes diâmetros de NaCl foram utilizados nos ensaios: 2mm (NaCl-2) e 0,3mm (NaCl-0,3).

Inicialmente, a amostra foi preparada a partir da mistura de esferas de vidro e NaCl, em seguida colocado na célula edométrica modificada e saturado com uma solução de NaCl para evitar uma pré-dissolução. Em seguida, uma tensão vertical de 5kPa foi aplicada para assegurar o contato entre a amostra e o sistema de carregamento, em seguida a tensão vertical foi aumentada para 25kPa. Durante o ensaio, uma pressão de líquido constante de 8kPa foi aplicada com o objetivo de promover um fluxo através do meio poroso e assim dissolver o NaCl da amostra. A permeabilidade e a condutividade elétrica foram medidas durante todo o processo de

dissolução. Os ensaios foram finalizados quando a leitura de deslocamento vertical permaneceu constante e o valor da condutividade elétrica ficou inferior a 3mS/cm, indicando a completa dissolução de NaCl.

Os ensaios foram realizados a temperatura controlada a 22°C e o procedimento experimental da segunda etapa foi repetido para diferentes concentrações de NaCl (6%, 12% e 20%).

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As Figuras 2a, 3a, e 4a mostram a evolução temporal da deformação volumétrica nas fases de carregamento e de dissolução do sal para diferentes concentrações de NaCl-2.

Após a etapa de carregamento e de dissolução do NaCl as amostras foram consolidadas alcançando uma deformação volumétrica de 3, 8 e 17% para as concentrações de 6, 12 e 20% de NaCl, respectivamente. Como esperado, foi observado que as amostras com maiores concentrações de NaCl obtiveram maiores deformações volumétricas, devido à perda de massa sólida durante a dissolução de NaCl. O mesmo comportamento foi observado com os ensaios apresentados por Shin e Santamarina (2009), em que as deformações volumétricas obtidas foram de 2, 4, e 6% para as concentrações de 5, 10 e 15% de NaCl, respectivamente.

As Figuras 2b, 3b, e 4b apresentam a evolução temporal da tensão horizontal efetiva para as diferentes concentrações de NaCl-2. Durante o processo da dissolução do NaCl foi verificado, no primeiro momento, uma queda da tensão horizontal efetiva devido à perda de massa sólida. Em seguida, foi constatado um aumento na tensão horizontal efetiva devido ao rearranjo da estrutura granular interna (desenvolvimento das deformações plásticas).

Este aumento da tensão efetiva horizontal pode ser explicado pelo desenvolvimento da deformação elástica horizontal de compressão. Estando também diretamente relacionado com o desenvolvimento da deformação plástica horizontal de expansão quando a amostra é

submetida a condições edométricas.

O aumento da tensão efetiva horizontal foi mais fortemente observado nos ensaios com a concentração de NaCl-2 de 20%. Verificou-se no final dos ensaios que o valor da tensão horizontal efetiva final foi inferior ao valor da tensão no início do processo da dissolução dos minerais para as amostras com concentração de 6 e 12% de NaCl-2. Já para as amostras com concentração de 20% de NaCl-2, a tensão horizontal efetiva foi maior que o valor inicialmente observado.

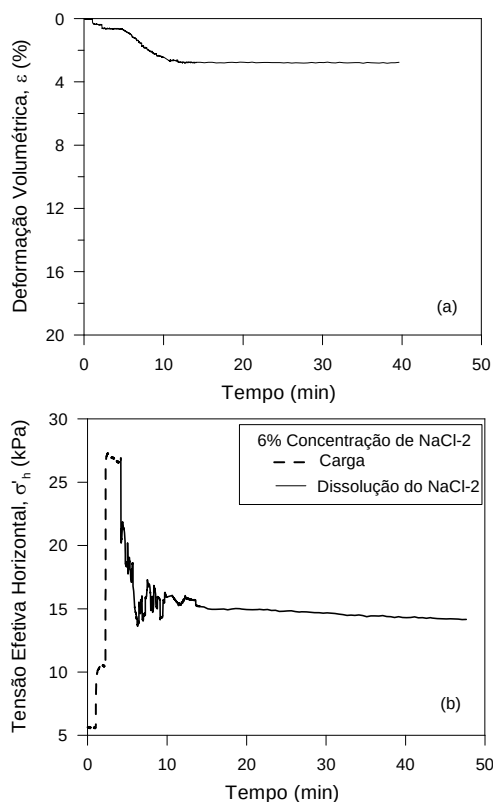


Figura 2. Evolução temporal da deformação volumétrica e da tensão horizontal efetiva para a concentração de 6% de NaCl-2.

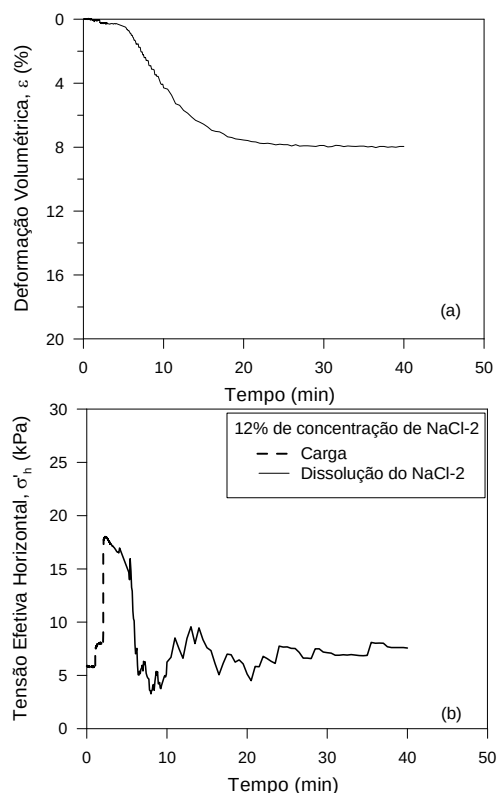


Figura 3. Evolução temporal da deformação volumétrica e da tensão horizontal efetiva para a concentração de 12% de NaCl-2.

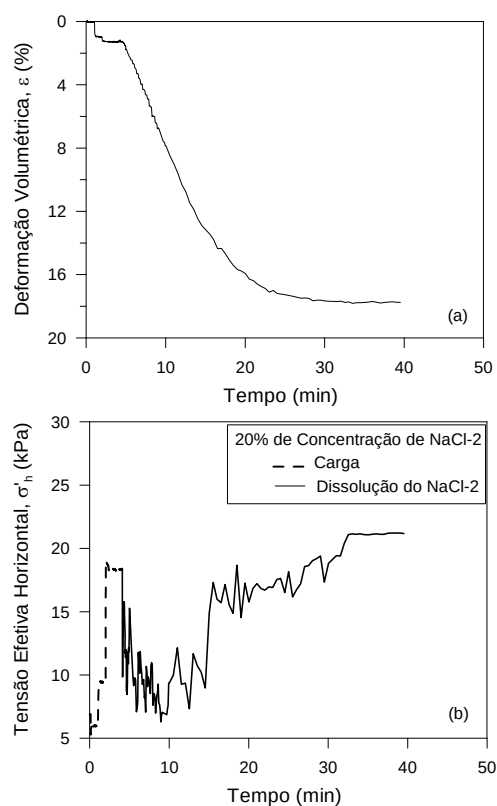


Figura 4. Evolução temporal da deformação volumétrica e da tensão horizontal efetiva para a concentração de 20% de NaCl-2.

Durante o ensaio de dissolução foram medidas a condutividade elétrica e a permeabilidade. Foi observado uma redução na condutividade elétrica provocada pela dissolução do NaCl. A condutividade elétrica diminuiu rapidamente no início do ensaio e o ensaio terminou depois de 40min, quando a condutividade elétrica atingiu valores inferiores 3mS/cm. A permeabilidade média obtida durante o ensaio de dissolução foi de $2,6 \times 10^{-5}$ m/s.

A Figura 5 mostra a evolução temporal da deformação volumétrica e da tensão horizontal efetiva para o meio poroso sintético composto pelo NaCl-0,3 (com diâmetro de 0,3 mm) com 12% de concentração de NaCl.

Verificou-se que após o processo de dissolução dos minerais a deformação volumétrica do meio poroso foi de 6%. Esta deformação volumétrica é menor do que a apresentada na amostra NaCl-2 (diâmetro de 2mm, ver Figura 3a) para a mesma concentração. Neste caso, o tamanho dos grãos de NaCl influenciou na deformação volumétrica, ex. quanto maior o grão de NaCl maior a deformação volumétrica. A tensão horizontal efetiva mostrou o mesmo comportamento obtido durante o ensaio com a amostra de NaCl-2. Verifica-se que o valor final da tensão horizontal efetiva é menor do que a tensão inicial devido ao rearranjo das partículas.

Quanto a condutividade elétrica, observou-se que ao longo do tempo a evolução da condutividade para NaCl 0,3 com 12% de concentração diminuiu até alcançar um valor inferior a 3mS/cm.

Os resultados médios de permeabilidade para NaCl 0,3 foram $2,77 \times 10^{-5}$ m/s, sem variações significativas durante o ensaio.

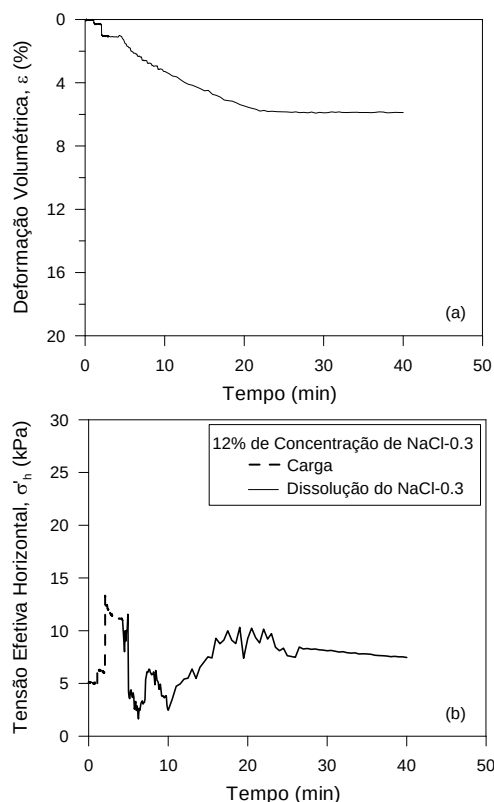


Figura 5. Evolução temporal da deformação volumétrica e da tensão horizontal efetiva para a concentração de 12% de NaCl-0,3.

4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1. Modelo Constitutivo para Materiais Cimentados

Com o objetivo de considerar o efeito da degradação química nos resultados de dissolução do material, foi proposta uma modificação ao BBM com base no modelo desenvolvido por Castellanza e Nova (2004) e por Silva (2012).

A seguir, se descreve o modelo constitutivo proposto por Castellanza e Nova (2004) para materiais cimentados e também é proposto uma modificação para incluir alterações de deformação e tensão devido à perda de massa de grãos.

O modelo foi implementado em um código de elementos finitos (OLIVELLA *et al*, 1994; GUIMARÃES *et al*, 2009) capaz de realizar (THMC) análise acoplada termo-hidro-mecânica e química de problemas de engenharia. O modelo foi implementado como uma extensão do Modelo Básico de Barcelona

(BBM) para solos não saturados, agora incorporando efeitos de cimentação. A variável química selecionada para afetar a cimentação do material é a concentração do cimento, representado no modelo químico (problema de transporte reativo) como um mineral precipitado.

O modelo BBM considera duas variáveis de tensões independentes para descrever o comportamento de solos não saturados, que são: as tensões efetivas ($\sigma' = \sigma - p_a \mathbf{I}$) e a sucção ($s = p_a - p_l$), obtidas como uma função das tensões totais (σ) e das pressões de ar e de líquido (p_a, p_l). Consiste em um modelo elastoplástico de endurecimento com uma superfície de escoamento definida como uma função da tensão efetiva média (p), da tensão desviadora (q) e da sucção (s) em um espaço tridimensional (ALONSO *et al.*, 1990).

A fim de considerar o efeito da degradação química foi proposto uma modificação no BBM com base no modelo desenvolvido por Castellanza e Nova (2004), implementação esta realizada por Silva (2012) e aplicada nesta pesquisa. Neste caso, a superfície de escoamento é função também de variáveis de estado relacionadas com a deformação plástica e a cimentação. Assim, a superfície de escoamento é expressa como:

$$f = f(p, q, s, \varepsilon_v^p, X_d) =$$

$$f = q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (1)$$

Sendo:

$$p = \sigma_m - \max(p_a, p_l); \quad \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3)$$

onde, σ_1, σ_2 e σ_3 são as tensões principais totais, σ_m é a tensão média, ε_v^p é a deformação volumétrica plástica, M é inclinação da linha do estado crítico e p_s está relacionado com as

forças cisalhantes do material como função da sucção e da degradação química. X_d é um escalar que corresponde ao grau de degradação química.

Outro elemento importante da presente formulação é o modelo para o comportamento elástico do material. Nesta formulação a deformação volumétrica elástica está relacionada com as mudanças de tensão, sucção e degradação química da seguinte forma:

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{\nu} \frac{dp}{p} + \frac{1}{3G} dq + \frac{\kappa_s}{\nu} \frac{ds}{(s + p_{atm})} + \frac{\alpha \kappa}{\nu} \frac{dX_d}{p} \quad (4)$$

onde G é o módulo cisalhante, κ_s é a rigidez elástica relacionada com sucção, p_{atm} é a pressão atmosférica, e α é um parâmetro químico-elástico. Na presente pesquisa, um termo (α) relacionado a mudanças de X_d foi introduzido na Equação (4), com o objetivo de reproduzir a contração do meio poroso devido à perda de massa do sal. Uma descrição mais detalhada do modelo pode ser encontrada em Lins (2014).

4.2. Validação do Modelo

Uma validação preliminar do modelo proposto foi realizada utilizando os resultados do programa experimental. As simulações dos ensaios edométricos foram realizados com concentrações de NaCl de 12% misturadas com as esferas de vidro. A fim de validar o modelo constitutivo foi imposta uma dissolução uniforme ao longo da amostra.

Nas simulações numéricas foi adotada uma malha de elementos finitos unidimensional de 20 elementos, com a finalidade de representar o meio poroso sintético ensaiado. Para o problema mecânico foram adotadas as seguintes condições de contorno: carga aplicada na parte superior da amostra, não sendo permitido o deslocamento da parte inferior, conforme realizado nos ensaios edométricos. A célula foi considerada rígida e o atrito entre a célula e a amostra foi negligenciado.

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros utilizados nas validações do modelo

constitutivo. Foram adotados os valores típicos para areias (solos granulares) para o coeficiente de Poisson (ν), ângulo de atrito (ϕ) e inclinação da linha de estado crítico (M). Os valores da tensão de pré-adensamento (p_o^*), inclinação da linha de descarregamento-recarregamento (κ), a inclinação da linha de adensamento do solo virgem (λ) e da permeabilidade à água (k) foram obtidos a partir dos resultados dos ensaios edométricos. A variável interna relacionada com as forças de cimentação (p_t) e o parâmetro que controla a taxa de degradação mecânica (ρ_t) foram obtidos a partir do ajuste entre os dados experimentais e numéricos.

Tabela 1. Parâmetros adotados para o meio poroso sintético nas análises HMQ.

Parâmetros	Valores
Inclinação da linha de descarregamento-recarregamento, κ	$1,4e^{-3}$
Inclinação da linha de adensamento do solo virgem, λ	$7,2e^{-3}$
Tensão de pré-adensamento, p_o^*	20kPa
Coeficiente de Poisson, ν	0,40
Permeabilidade, k	$2,6 \times 10^{-5}$ m/s
Porosidade, n (%)	30
Angulo de atrito, ϕ	30°
Inclinação da linha de estado crítico, M	1,00
Variável interna relacionada com as forças de cimentação, p_t	0,010
Parâmetro que controla a taxa de degradação mecânica, ρ_t	10,0

4.3. Resultados Numéricos

A Figura 6a apresenta a evolução temporal da deformação volumétrica para os resultados obtidos experimentalmente em comparação com os dados das simulações numéricas a concentração de 12% de NaCl-2. A Figura 6b mostra a evolução no tempo da tensão

horizontal efetiva.

Nestas figuras, pode-se observar que para a deformação volumétrica foi obtida uma satisfatória relação entre os dados experimentais e numéricos. Esta boa concordância foi alcançada a partir do emprego no modelo proposto do parâmetro químico-elástico α , cujo parâmetro está relacionado com as mudanças de X_d e tem a função de reproduzir a contração do meio poroso devido à perda de massa do sal. Na calibração do modelo foram obtidos valores de α de 0,07 para a amostra sintética estudada com concentração de NaCl-2 de 12%.

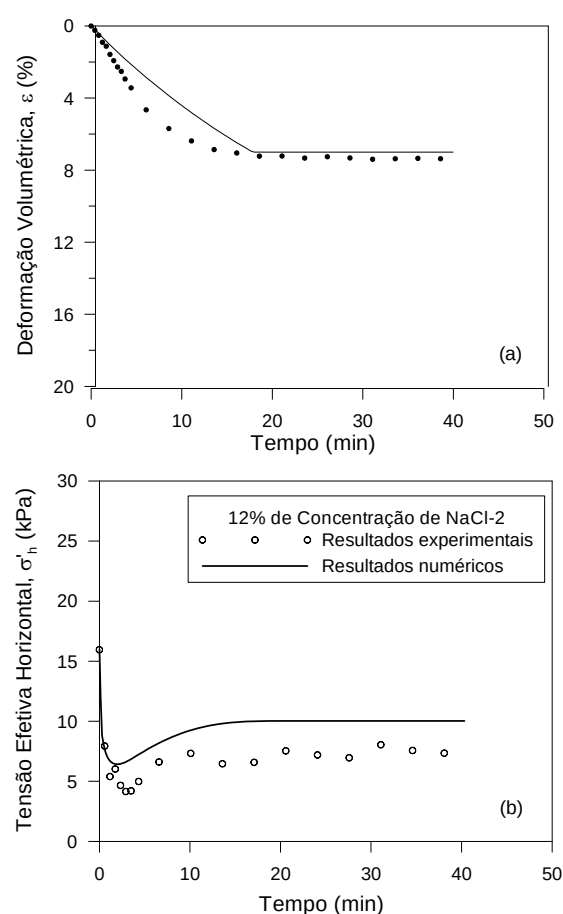


Figura 6. Evolução temporal da deformação volumétrica e da tensão horizontal efetiva dos resultados experimentais e numéricos para a concentração de NaCl-2 de 12%.

5. CONCLUSÃO

Uma série de ensaios de carregamento/descarregamento e caminhos de dissolução de NaCl foram realizados para estudar os efeitos geomecânicos causados no

meio poroso durante a dissolução do sal. Os ensaios foram realizados em uma célula edométrica instrumentada com LVDT e *strain gauges*, especialmente construída para medir tensões horizontais.

Foi apresentado e discutido os resultados de um programa experimental detalhado sobre amostras sintéticas (mistura de esferas de vidro e de NaCl) com concentração de 12% de NaCl em relação as medidas simultâneas de deformações volumétricas e tensões horizontais durante o ensaio de dissolução.

Durante a etapa de dissolução de NaCl, o volume da amostra diminuiu. Observou-se uma queda brusca da tensão horizontal efetiva e, em seguida, um aumento. O esforço horizontal foi afetado pelo processo de dissolução do sal, como um resultado do colapso dos poros induzida quimicamente e devido ao rearranjo da matriz sólida.

Satisfatórios ajustes dos dados experimentais e numéricos foram obtidos a partir da validação da formulação proposta. Durante a dissolução do NaCl-2, a simulação numérica conseguiu representar a queda acentuada da deformação do meio poroso sintético. O modelo também foi capaz de reproduzir as alterações da tensão horizontal efetiva observada nos experimentos, exceto para a amostra com maior concentração de NaCl (20%), onde os resultados numéricos da tensão horizontal não atingiram os valores experimentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pela PETROBRAS, CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e Fundação CMG (Chair on Reservoir Simulation at UFPE).

REFERÊNCIAS

- Alonso E. E., Gens A., Josa A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*. 40(3):405–430.
- Castelanza, R., and R. Nova. (2004). Oedometric tests on artificially weathered carbonatic soft rocks. *J. Geotech. & Geoenv. Eng.*, 130: 728-739.
- Chen, J.S., C.W. Liu, G.X. Lai, and C.F. Ni. (2009). Effects of mechanical dispersion on the morphological evolution of a chemical dissolution front in a fluid-saturated porous medium. *J. of Hydrology*. 373: 96-102.
- Gens, A. & Nova, R. (1993). Conceptual bases for a Constitutive Model for Bonded Soils and Weak Rocks. *Proceedings of International Symposium On Geomechanical Engineering of Hard Soils and Soft Rocks*, Athens, pp. 485-494.
- Guimarães, L.J.N., Gens, A., Sánchez, M., Olivella, S. (2013). A chemo-mechanical constitutive model accounting for cation exchange in expansive clays. *Geotechnique* 63, No. 3: 221–234.
- Guimarães, L.J.N., I.F. Gomes, and J.P. Valadares. (2009). Influence of mechanical constitutive model on the coupled hydro-geomechanical analysis of fault reactivation. In: *Reservoir Simulation Symposium - Society of Petroleum Engineers SPE, The Woodlands*, 2-4 February 2009, SPE-119168-PP. Texas: EUA.
- Korsnes, R.I., M.V. Madland, K.A.N. Vorland, T. Hildebrand-habel, T.G. Kristiansen, and A. Hiorth. (2008). Enhanced chemical weakening of chalk due to injection of CO₂ enriched water. In: *International Symposium of The Society of Core Analysts*, Abu Dhabi, October 29--November 2 2008, 1-12, UAE.
- Lins, C. M. M. S. (2014). Desenvolvimento de uma célula edométrica para estudo da evolução da tensão horizontal durante a dissolução química. PhD Thesis, Federal University of Pernambuco, Pernambuco, Brazil. 125 p.
- Olivella S, Carrera J, Gens A, Alonso EE. (1994). Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. *Transport in Porous Media*; 15:271–293.
- Shin, H., and J.C. Santamarina. (2009). Mineral dissolution and the evolution of k_0 . *J. of Geotech. & Geoenv. Eng.* 135:1141-1147.
- Silva, N.V.S. (2012). Modeling the phenomenon of capillary and chemical compaction in petroleum Reservoirs. PhD Thesis, Federal University of Pernambuco, Pernambuco, Brazil.